

# RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 04/03/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**MAYKON ANDRÉ MONTANHERA**

**SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE MICROTUBOS DE TiO<sub>2</sub>-Ag EM  
ÁGUAS CONTAMINADAS POR COLIFORMES TOTAIS E *E. coli***

Ilha Solteira  
2022

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS**

**MAYKON ANDRÉ MONTANHERA**

**SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE MICROTUBOS DE TiO<sub>2</sub>-Ag EM  
ÁGUAS CONTAMINADAS POR COLIFORMES TOTAIS E *E. coli***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências do Materiais.

Prof. Dr. Fernando Rogério de Paula  
**Orientador**

Ilha Solteira  
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Montanhera, Maykon André.

M764s Síntese, caracterização e aplicação de microtubos de TiO<sub>2</sub>-Ag em  
águas contaminadas por coliformes totais e E. coli/ Maykon André  
Montanhera. -- Ilha  
Solteira: [s.n.], 2022

144 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Física da  
Matéria Condensada, 2022

Orientador: Fernando Rogério de Paula

Inclui bibliografia

1. TiO<sub>2</sub>. 2. Microtubos de TiO<sub>2</sub>. 3. Coliformes totais e E. coli. 4.  
Dióxido de titânio. 5. Incorporação de Ag ao TiO<sub>2</sub>

  
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação  
CRB/8 - 9999

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: Síntese, caracterizações e aplicações de microtubos de TiO<sub>2</sub>-Ag em águas contaminadas por coliformes totais e E. coli

**AUTOR: MAYKON ANDRÉ MONTANHERA**

**ORIENTADOR: FERNANDO ROGERIO DE PAULA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: Física da Matéria Condensada pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FERNANDO ROGERIO DE PAULA (Participação Virtual)  
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. MARIA ANGELA DE MORAES CORDEIRO (Participação Virtual)  
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. HAROLDO NAOYUKI NAGASHIMA (Participação Virtual)  
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. VERA LUCIA MORES RALL (Participação Virtual)  
BB- Unesp Botucatu / Unesp- Botucatu

Prof. Dr. RENATO GARCIA DE FREITAS SOBRINHO (Participação Virtual)  
ICET/ Departamento de Química / Universidade Federal de Mato Grosso- Cuiabá

Ilha Solteira, 04 de março de 2022

## **DEDICO**

Ao meu pai Luiz (*in memoriam*) e minha mãe Rosemeire, por todo amor e educação que recebi ao longo da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por iluminar minha caminhada, por todas as oportunidades a mim concedidas e por possibilitar a conclusão de mais uma etapa em minha vida.

Agradeço ao orientador Fernando Rogério de Paula por todos os anos de orientação, desde a iniciação científica, mestrado e por fim o doutorado. Sou grato por todos os momentos de conversas, contribuições, orientações e ensinamentos que influenciaram em minha formação academia desde o período de graduação até a finalização do doutorado.

Agradeço a toda minha família pelo apoio, e por todos os momentos descontração e, principalmente, por sempre fortalecerem a busca pelos objetivos, até nos momentos mais difíceis. Agradeço em especial, minha namorada Juliana, pelo companheirismo, paciência e todo o apoio durante o período de desenvolvimento do presente trabalho.

Agradeço principalmente a minha mãe e ao meu falecido pai, que não mediram esforços para me educar e possibilitar a busca dos meus sonhos e meus objetivos. Muito obrigado, mãe, por todo apoio e carinho que fortaleceram a caminhada para o desenvolvimento desse trabalho e para minha formação. Ao meu pai só tenho a agradecer, pelo exemplo de vida, luta, superação e ao legado que nos deixou.

Agradeço aos técnicos, professores e companheiros de grupo (GPOL) que contribuíram para o meu desenvolvimento. Em especial quero agradecer aos amigos do DFQ que me acompanharam, apoiaram e ajudaram em todos esses anos de pesquisa e desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também ao Laboratório de Análises de Águas pela parceria no desenvolvimento do trabalho. Muito obrigado!

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, a Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Agradeço de maneira geral a todos os amigos, professores e familiares que, sem dúvida alguma, contribuíram com o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

## RESUMO

Com o crescimento da população mundial e da indústria, houve um expressivo aumento no nível de poluição em geral. Grande parte dessa poluição está relacionada ao descarte incorreto de efluentes que poluem as águas de rios, lagos, etc. A demanda por técnicas que possam minimizar tais problemas tem sido crescente nos últimos anos. Uma dessas técnicas envolve as Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), que possuem o potencial para degradar contaminantes orgânicos e eliminar bactérias, como os coliformes totais e a *Escherichia coli* (*E. coli*). Um dos materiais mais utilizados na produção de EROs é o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), material semicondutor que se destaca devido à sua propriedade fotocatalítica. Quando este material é fotoativado por luz ultravioleta, ocorre a formação dos EROs, permitindo a eliminação de contaminantes orgânicos. Neste trabalho, o  $\text{TiO}_2$  foi utilizado no desenvolvimento de um sistema de filtro fotocatalítico que possibilitou a eliminação de bactérias presentes em água contaminada por coliformes totais e *E. coli*. O  $\text{TiO}_2$  foi sintetizado por uma rota sintética envolvendo oxisulfato de titânio dissolvido em água deionizada e peróxido de hidrogênio. Na síntese, foi avaliada a influência da temperatura na eficiência fotocatalítica e na morfologia do  $\text{TiO}_2$ . Verificou-se que, a síntese a 36 °C proporcionou a formação de microtubos de  $\text{TiO}_2$  com heterojunção das fases anatase/rutilo, o que promoveu um aumento na eficiência fotocatalítica com a mistura de fase. Um aumento da eficiência fotocatalítica também foi alcançado com a incorporação de prata (Ag) na superfície dos microtubos de  $\text{TiO}_2$ . A otimização da atividade fotocatalítica foi alcançada com incorporação de aproximadamente 0,9% de Ag em relação à massa de  $\text{TiO}_2$ . Os filtros fotocatalíticos obtidos com a incorporação de microtubos de  $\text{TiO}_2$  mostraram alta eficiência na formação de EROs. A eficiência foi avaliada utilizando o corante Rodamina-B e água contaminada com coliformes totais e a *E. coli*. Os resultados mostraram uma grande redução no número de bactérias e na degradação do corante. Com a utilização do sistema de filtração duplo com incorporação de microtubos de  $\text{TiO}_2$ -Ag, houve a erradicação total dos coliformes totais e *E. coli* com apenas uma passagem da água contaminada pelo sistema com um fluxo máximo de 264 litros por hora. Em síntese, os resultados obtidos neste trabalho demonstram que os filtros fotocatalíticos desenvolvidos se mostraram eficientes para a descontaminação de águas contaminadas com micro-organismos como os coliformes totais e a *E. coli*.



## ABSTRACT

In face of the world population and industry growth, there has been a huge increase in the level of pollution in general. A large part of this pollution is related to the incorrect disposal of effluents that pollute the waters of rivers, lakes, etc. The demand for techniques that can minimize such problems has been increasing in recent years. One of these techniques involves Reactive Oxygen Species (ROS), which have the potential to degrade organic contaminants and eliminate bacteria, such as total coliforms and *Escherichia coli* (*E. coli*). One of the most used materials in the production of ROS is titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>), a semiconductor material that stands out due to its photocatalytic property. When this material is photoactivated by ultraviolet light, the formation of ROS occurs, which allows the elimination of organic contaminants. In this research, TiO<sub>2</sub> was used in the development of a photocatalytic filter system that allowed the elimination of bacteria present in water that was contaminated by total coliforms and *E. coli*. TiO<sub>2</sub> was synthesized by a synthetic route involving titanium oxysulfate dissolved in deionized water and hydrogen peroxide. In the synthesis, the influence of temperature on the photocatalytic efficiency and the morphology of TiO<sub>2</sub> was evaluated. It was found that, when the synthesis occurs at 36 °C, it provides the formation of TiO<sub>2</sub> microtubes with heterojunction of the anatase/rutile phases, which promoted an increase in photocatalytic efficiency with the phase mixture. An increase in photocatalytic efficiency was also achieved with the incorporation of silver (Ag) on the surface of the TiO<sub>2</sub> microtubes. The optimization of the photocatalytic activity was achieved with the incorporation of approximately 0.9% of Ag concerning the mass of TiO<sub>2</sub>. The photocatalytic filters obtained with the incorporation of TiO<sub>2</sub> microtubes showed high efficiency in the formation of ROS. Efficiency was evaluated using Rhodamine-B dye and water contaminated with total coliforms and *E. coli*. The results showed reduction in the number of bacteria and the degradation of the dye. With the use of the double filtration system with the incorporation of TiO<sub>2</sub>-Ag microtubes, the total eradication of total coliforms and *E. coli* was observed with only one passage of contaminated water through the system with a maximum flow of 264 liters per hour. In short, the results obtained in this work showed that the photocatalytic filters developed proved to be efficient for the decontamination of water contaminated with microorganisms such as total coliforms and *E. coli*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção da população do Brasil.....	18
Figura 2 - Perfil dos usuários de água subterrânea no Brasil.....	20
Figura 3 - Destinação do esgoto urbano no Brasil .....	21
Figura 4 - Contaminação do lençol freático .....	22
Figura 5 - Ciclo de transmissão da <i>E. coli</i> .....	23
Figura 6 - Estrutura cristalográfica do TiO <sub>2</sub> nas fases bruquita (ortorrômbica), anatase (tetragonal) e rutilo (tetragonal) .....	26
Figura 7 - Cristalinidade e área superficial do TiO <sub>2</sub> em função do tratamento térmico .....	27
Figura 8 - Representação esquemática da fotoativação do semicondutor e geração dos radicais .....	29
Figura 9 - Representação esquemática da recombinação do par elétron-buraco em materiais com gap direto (a) e indireto (b).....	31
Figura 10 - Ilustração esquemática da heterojunção das fases anatase e rutilo do TiO <sub>2</sub> .....	33
Figura 11 - Representação esquemática da transferência eletrônica entre TiO <sub>2</sub> -Ag.....	35
Figura 12 - Estrutura molecular da Rodamina-B .....	35
Figura 13 - Espectro de absorção da Rodamina-B .....	36
Figura 14 - Ilustração esquemática da composição da parede celular das bactérias Gram negativa e Gram positiva.....	37
Figura 15 - Ilustração do mecanismo plausível da atividade antimicrobiana na presença do fotocatalisador TiO <sub>2</sub> na fase anatase.....	38
Figura 16 - Processo de síntese do TiO <sub>2</sub> .....	40
Figura 17 – Processo de incorporação de Ag ao TiO <sub>2</sub> .....	43
Figura 18 - Representação esquemática da fotorredução das nanopartículas de Ag na superfície dos microtubos de TiO <sub>2</sub> .....	44
Figura 19 - Reator fotocatalítico composto por uma lâmpada de 250 W de vapor de mercúrio sem o bulbo e um agitador magnético.....	46
Figura 20 – Pré-filtro Purificador Fit 230.....	47
Figura 21 - Adaptação do sistema de filtração .....	48
Figura 22 - Ilustração esquemática do sistema de filtração fotocatalítico .....	49
Figura 23 - Peças para fixação da lâmpada e vedação no refil.....	49

Figura 24 - Incorporação do fotocatalisador ao filtro .....	50
Figura 25 – Sistema de filtração fotocatalítica .....	51
Figura 26 - Ensaio fotocatalítico do sistema de filtração com o corante RhB.....	52
Figura 27 - Frascos utilizados para a realização dos testes e flaconetes COLItest ..	53
Figura 28 - Sistema de filtração fotocatalítico utilizado para os testes com flaconetes da COLItest .....	54
Figura 29 - Amostras com o flaconete COLItest.....	55
Figura 30 - Chromocult do fabricante Sartorius.....	58
Figura 31 - Procedimento de utilização do conjunto de Pads Nutritivos.....	59
Figura 32 - Placa de petri com filtro de membrana sobre o Pad Nutrivo .....	60
Figura 33 - Crescimento de colônias de coliformes totais e E. coli .....	60
Figura 34 - Sistema de filtração com dois filtros fotocatalíticos em série .....	64
Figura 35 - Sistema de filtração com dois filtros fotocatalíticos e um terceiro de carvão ativado.....	66
Figura 36 - Imagens de MEV do precursor $TiOSO_4$ .....	68
Figura 37 – Imagens de MEV das amostras de $TiO_2$ sintetizadas à diferentes temperaturas: 5, 23, 35, 50 e 65 °C .....	69
Figura 38 - Imagens de MEV para as amostras de $TiO_2$ sintetizadas a 35 °C com períodos distintos de agitação: 6, 12 e 48 horas.....	70
Figura 39 – Proposta para o processo de dissolução do $TiOSO_4$ para formação da morfologia tubular.....	71
Figura 40 - Diagrama de raios-X referentes as amostras de $TiO_2$ sintetizadas à diferentes temperaturas e tratadas termicamente a 600 °C .....	72
Figura 41 - Degradação da RhB em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta das amostras sintetizadas a diferentes temperaturas.....	73
Figura 42 - Cinética de degradação da RhB para as amostras sintetizadas em diferentes temperaturas .....	74
Figura 43 - Constante de degradação da RhB para as amostras sintetizadas a diferentes temperaturas .....	75
Figura 44 - Difractogramas de raios-X das amostras de $TiO_2$ sintetizadas a 5 °C e submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico.....	77
Figura 45 – Degradação da RhB em função do tempo para as amostras de $TiO_2$ com diferentes percentuais de fase rutilo.....	78

Figura 46 - Cinética de degradação da RhB para as amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes percentuais de fase rutilo .....	79
Figura 47 - Constante de degradação da RhB para as amostras com diferentes percentuais de fase rutilo .....	80
Figura 48 - Cinética de degradação da RhB para as amostras de TiO <sub>2</sub> tratadas termicamente em diferentes temperaturas .....	81
Figura 49 - Degradação da RhB em função do tempo de exposição a luz UV para as amostras de TiO <sub>2</sub> tratadas a diferentes temperaturas .....	82
Figura 50 - Constante de degradação (k) da RhB para as amostras submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico .....	83
Figura 51 - Difratoformas de raios-X das amostras de TiO <sub>2</sub> submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico .....	84
Figura 52 - Refinamento Rietveld para as amostras de TiO <sub>2</sub> tratadas em diferentes temperaturas: 600, 700, 740, 800 e 1000 °C .....	86
Figura 53 - Tamanho médio do cristalito em função da temperatura de tratamento térmico .....	88
Figura 54 - Mapas de densidade eletrônica de Fourier das amostras tratadas a diferentes temperaturas a) 600 °C, b) 700 °C, c) 740 °C e d) 800 °C. ....	89
Figura 55 – Mudança na coloração da solução com TiO <sub>2</sub> durante o processo de fotorredução da Ag.....	90
Figura 56 - Difratoformas de raios-X referente a amostra de TiO <sub>2</sub> puro e com diferentes concentrações de AgNO <sub>3</sub> .....	91
Figura 57 - Imagens de MEV da amostra de TiO <sub>2</sub> puro e com diferentes concentrações de AgNO <sub>3</sub> , após o processo de fotorredução .....	93
Figura 58 – EDX das amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes concentrações de AgNO <sub>3</sub> obtidas após fotorredução .....	94
Figura 59 - Degradação fotocatalítica da RhB em função do tempo para as amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes concentrações de Ag .....	96
Figura 60 - Degradação da RhB em função do tempo de exposição a luz UV para amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes concentrações de Ag .....	97
Figura 61 - Constantes de degradação (k) da RhB para as amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes percentuais de Ag.....	98
Figura 62 – Degradação da RhB em função do tempo de filtração fotocatalítico nos filtros com diferentes concentrações de TiO <sub>2</sub> Degussa P25.....	101

Figura 63 - Degradação da RhB em função do tempo de filtração com diferentes concentrações de TiO <sub>2</sub> Degussa P25.....	102
Figura 64 - Coeficiente de degradação em função da massa de TiO <sub>2</sub> P25 incorporada nos filtros .....	103
Figura 65 - Água submetida ao processo de filtração fotocatalítica com filtro incorporado com TiO <sub>2</sub> Degussa P25 .....	104
Figura 66 - Imagem de MEV do (a)TiO <sub>2</sub> Degussa P25 e (b)Filtro de Polipropileno.	105
Figura 67 - Microtubos de TiO <sub>2</sub> aderidos no filtro de polipropileno.....	106
Figura 68 - Degradação fotocatalítica da RhB em função do tempo de filtração para os filtros com diferentes massas de MtTiO <sub>2</sub> .....	107
Figura 69 - Degradação da RhB em função do tempo de filtração com diferentes massas de MtTiO <sub>2</sub> .....	108
Figura 70 - Coeficiente de degradação em função da massa de microtubos de TiO <sub>2</sub> incorporado nos filtros .....	109
Figura 71 - Água submetida ao processo de filtração fotocatalítica com filtros incorporados com TiO <sub>2</sub> Degussa P25 e microtubos de TiO <sub>2</sub> .....	110
Figura 72 - Amostra A1: água retirada do poço semi-artesiano após o período de incubação.....	111
Figura 73 - Ensaios para detecção de coliformes totais nas amostras de água com meio de cultura COLItest com diferentes tempos de passagem no filtro fotocatalítico .....	113
Figura 74 – Imagens após o período de incubação com meio de cultura COLItest da amostra de água coletada (A8) e amostras submetidas ao sistema de filtração com incorporação de MtTiO <sub>2</sub> (A9 – A13) .....	114
Figura 75 - Imagens após o período de incubação com meio de cultura COLItest da amostra de água coletada (A14) e as amostras de água submetidas ao sistema de filtração com a incorporação de MtTiO <sub>2</sub> -Ag (A15 – A20).....	116
Figura 76 - Amostra de água retirada do poço sem nenhum tipo de tratamento ou diluição .....	118
Figura 77 - Colônias após 24 horas de incubação para a amostra retirada do poço e diluída 1/10 (B1).....	118
Figura 78 – Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli após o processo de filtração com diferentes períodos de tempo (15, 30, 45 e 60 minutos) com o filtro de MtTiO <sub>2</sub> .....	119

Figura 79 – Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli após o processo de filtração com diferentes períodos de tempo (5, 10, 15 e 20 minutos) com o filtro de MtTiO <sub>2</sub> -Ag .....	120
Figura 80 – Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli após o processo de filtração fotocatalítico com o filtro de MtTiO <sub>2</sub> -Ag em diferentes fluxos: V1 (30 l/h), V2 (102 l/h) e V3 (264 l/h) .....	122
Figura 81 – Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli para a amostra retirada do poço antes das atividades na propriedade rural.....	123
Figura 82 - Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli da amostra diluída (C), e amostras após o processo de filtração com filtro de MtTiO <sub>2</sub> (C1), MtTiO <sub>2</sub> -Ag (C2) e MtTiO <sub>2</sub> -Ag sem luz UV (C3).....	124
Figura 83 - Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli após o processo de filtração com o filtro de MtTiO <sub>2</sub> -Ag em diferentes fluxos: 264 (C2), 102 (C4) e 30 (C5) litros por hora.....	125
Figura 84 – Meio de cultura (Chromocult) de coliformes totais e E. coli para a amostra coletada no poço e sem tratamento prévio.....	127
Figura 85 - Cultivo de coliformes totais e E. coli para amostra diluída retirada do poço (D0) e após o processo de filtração dupla nos filtros com MtTiO <sub>2</sub> -Ag com diferentes fluxos: 264 (D1), 102 (D2) e 30 (D3) litros por hora.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão bacteriológico da água para consumo humano .....	24
Tabela 2 - Descrição das amostras de água analisadas com o COLItest .....	54
Tabela 3 - Descrição da amostra coletada no poço (A8) e as amostras submetidas ao sistema de filtração com o filtro incorporado com MtTiO <sub>2</sub> .....	56
Tabela 4 - Descrição da amostra coletada no poço (A14) e das amostras submetidas ao sistema de filtração com o filtro incorporado com MtTiO <sub>2</sub> -Ag.....	57
Tabela 5 - Descrição da amostra coletada no poço (B0), diluída (B1) e as submetidas ao sistema de filtração fotocatalítico com diferentes tempos de circulação .....	61
Tabela 6 - Descrição da amostra coletada no poço (B0) e submetidas a filtração fotocatalítica com diferentes fluxos de passagem da água contaminada.....	62
Tabela 7 - Amostras de água submetidas a análise detecção de coliformes totais e E. coli .....	63
Tabela 8 - Descrição da amostra de água coletada no poço (C) e submetidas ao sistema de filtração com diferentes fluxos.....	64
Tabela 9 - Descrição da amostra coletada no poço (D), diluída (D0) e submetidas ao sistema de filtração com dois filtros fotocatalíticos em série em diferentes fluxos ....	65
Tabela 10 - Rendimento das amostras de TiO <sub>2</sub> sintetizadas em diferentes temperaturas .....	67
Tabela 11 - Tamanho médio do cristalito para as amostras de TiO <sub>2</sub> sintetizadas a diferentes temperaturas e tratadas a 600 °C.....	72
Tabela 12 - Constante de degradação da RhB para as amostras sintetizadas em diferentes temperaturas .....	75
Tabela 13 - Percentual de fase das amostras de TiO <sub>2</sub> sintetizadas a 5 °C e submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico.....	77
Tabela 14 - Coeficiente de degradação das amostras com diferentes percentuais de fase rutilo.....	79
Tabela 15 - Constantes de degradação da RhB para as amostras de TiO <sub>2</sub> submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico.....	83
Tabela 16 - Percentual de fase e tamanho do cristalito em função da temperatura de tratamento térmico .....	87

Tabela 17 - Tamanho médio do cristalito obtido pela Eq. de Scherrer para as amostras de TiO <sub>2</sub> com diferentes concentrações de AgNO <sub>3</sub> .....	92
Tabela 18 – Percentual de AgNO <sub>3</sub> utilizado e a Ag obtida no processo de fotorredução em relação a massa de TiO <sub>2</sub> de acordo com o EDX.....	95
Tabela 19 - Constantes de degradação da RhB para as amostras submetidas a diferentes concentrações de Ag.....	97
Tabela 20 - Coeficiente de degradação dos filtros com diferentes massas de TiO <sub>2</sub> Degussa P25.....	103
Tabela 21 - Coeficiente de degradação da RhB para os filtros com diferentes massas de microtubos de TiO <sub>2</sub> .....	108
Tabela 22 - Descrição da amostra de água coletada do poço (A1) e submetidas ao sistema de filtração com MtTiO <sub>2</sub> e MtTiO <sub>2</sub> -Ag.....	112
Tabela 23 - Descrição da amostra de água coletada (A8) e submetidas ao sistema de filtração com MtTiO <sub>2</sub> .....	115
Tabela 24 - Descrição da amostra de água coletada (A14) e das amostras de água submetidas ao sistema de filtração fotocatalítico com incorporação de MtTiO <sub>2</sub> -Ag.....	116
Tabela 25 – Descrição da amostra de água coletada (B1) e amostras água submetidas ao sistema de filtração fotocatalítico com incorporação de MtTiO <sub>2</sub> .....	120
Tabela 26 - Descrição da amostra coletada (B1) e amostras submetidas ao sistema de filtração fotocatalítico com incorporação de MtTiO <sub>2</sub> -Ag.....	121
Tabela 27 - Descrição da amostra de água coletada (B1) e amostras águas submetidas ao sistema de filtração com MtTiO <sub>2</sub> -Ag em diferente fluxos.....	122
Tabela 28 - Descrição da amostra coletada do poço (C) e amostras submetidas ao sistema de filtração com diferentes filtros.....	124
Tabela 29 - Descrição da amostra diluída (C) e amostras submetidas ao sistema de filtração com o filtro de MtTiO <sub>2</sub> -Ag em diferentes fluxos.....	126
Tabela 30 – Descrição da amostra diluída (D0) e amostras submetidas ao sistema de filtração fotocatalítico com dois filtros de MtTiO <sub>2</sub> -Ag em série.....	128



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
OMS	Organização Mundial da Saúde
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
Ag	Prata
MtTiO <sub>2</sub>	Microtubos de dióxido de titânio
MtTiO <sub>2</sub> -Ag	Microtubos de dióxido de titânio com incorporação de prata
ONU	Organização das Nações Unidas
BEN	Balanço Energético Nacional
SUS	Sistema Único de Saúde
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EROs	Espécies reativas de oxigênio
ANA	Agência Nacional de Água
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peroxido de hidrogênio
TiOSO <sub>4</sub>	Oxisulfato de titânio
AgNO <sub>3</sub>	Nitrato de prata
e <sup>-</sup>	Elétron
h <sup>+</sup>	Buraco
OH <sup>•</sup>	Radical hidroxilo
<i>v</i>	Frequência
<i>h</i>	Constante de Planck
RhB	Rodamina-B
UV	Ultravioleta
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UV-vis	Espectroscopia de UV-vis
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X

## SUMÁRIO

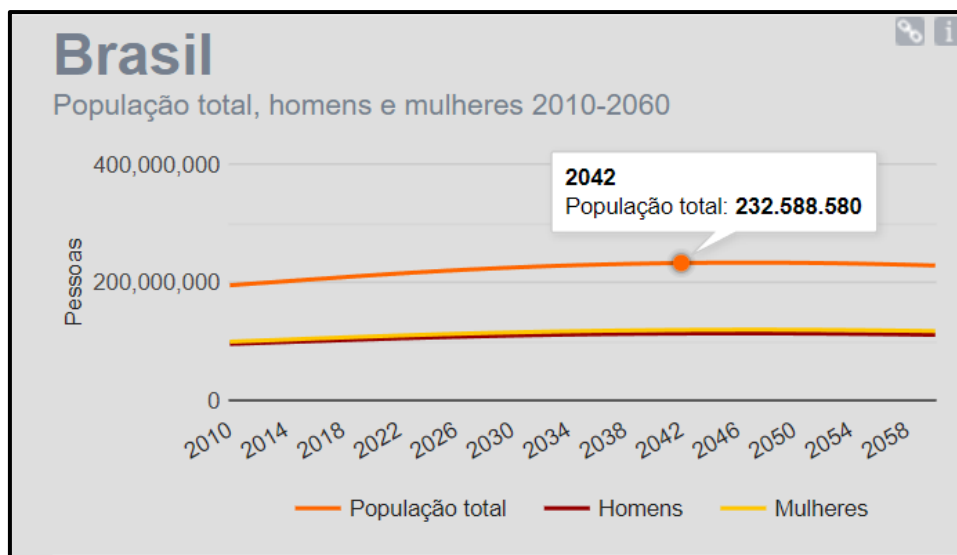
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	25
<b>2.1 – Objetivo geral</b> .....	25
<b>2.2 – Objetivos específicos</b> .....	25
<b>3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
<b>3.1 – Dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>)</b> .....	26
3.1.1 – <i>Atividade fotocatalítica</i> .....	28
<b>3.2 – Incorporação de prata ao TiO<sub>2</sub></b> .....	34
<b>3.3 - Rodamina-B</b> .....	35
<b>3.4 – Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)</b> .....	37
<b>4 - MATERIAL E MÉTODO</b> .....	40
<b>4.1 - Variação na temperatura de síntese do TiO<sub>2</sub></b> .....	40
<b>4.2 – Variação na temperatura de tratamento térmico</b> .....	41
4.2.1 – <i>Síntese a temperatura de 5 °C</i> .....	42
4.2.2 – <i>Síntese a temperatura de 35 °C</i> .....	42
<b>4.3 - Incorporação de nanopartículas de Ag ao TiO<sub>2</sub></b> .....	42
<b>4.4 – Caracterizações</b> .....	44
4.4.1 – <i>Difração de raios-X</i> .....	44
4.4.2 – <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i> .....	45
4.4.3 – <i>Ensaio fotocatalítico</i> .....	45
<b>4.5 – Aplicação do TiO<sub>2</sub> no filtro</b> .....	47
4.5.1 - <i>Adaptação do filtro para a aplicação do TiO<sub>2</sub></i> .....	47
4.5.2 – <i>Ensaio fotocatalítico com o indicador Rodamina-B</i> .....	51
4.5.3 – <i>Ensaio bactericidas com coliformes totais e E. coli</i> .....	52
<b>5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	67
<b>5.1 – Variação na temperatura de síntese do pó de TiO<sub>2</sub></b> .....	67
<b>5.2 – Variação na temperatura de tratamento térmico</b> .....	76
5.2.1 – <i>Variação na temperatura de tratamento térmico para as amostras sintetizadas a 5 °C</i> .....	76
5.2.2 – <i>Variação na temperatura de tratamento térmico para as amostras sintetizadas a 35 °C</i> .....	81
<b>5.3 - Incorporação de nanopartículas de Ag ao TiO<sub>2</sub></b> .....	90

<b>6 – APLICAÇÕES</b> .....	100
<b>6.1 - Degradação do contaminante Rodamina-B</b> .....	100
6.1.1 – Sistema de filtração com $TiO_2$ Degussa P25.....	100
6.1.2 – Sistema de filtração com microtubos de $TiO_2$ .....	105
<b>6.2 – Ensaios bactericidas com coliformes totais e <i>E. coli</i></b> .....	110
6.2.1 - Detecção de coliformes totais com COLItest.....	111
6.2.2 - Detecção de coliformes totais e <i>E. coli</i> com Chromocult.....	117
<b>7 – CONCLUSÃO</b> .....	129
<b>8 – IMPACTO/RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL</b> .....	131
<b>9 – REFERÊNCIAS</b> .....	132
<b>10 - ANEXOS</b> .....	140
<b>Anexo A</b> – Relatório de análises da amostra coletada no poço semi-artesiano..	140
<b>Anexo B</b> - Relatório de análises da amostra submetida ao sistema de filtração fotocatalítico com incorporação de $TiO_2$ -Ag.....	141

## 1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a população mundial é de aproximadamente 7,8 bilhões de pessoas e de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) estima-se que em 2050 a tendência é que esse número alcance 9,7 bilhões<sup>1</sup>. Neste contexto, o Brasil vem seguindo a tendência mundial, apresentando crescimento populacional. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira é de aproximadamente 213,7 milhões e estima-se que em 2042 seja de aproximadamente 232,6 milhões, como apresentado na Figura 1<sup>2</sup>.

Figura 1 - Projeção da população do Brasil



Fonte: IBGE<sup>2</sup>

Com o crescimento populacional, também há o aumento na necessidade da disponibilidade de recursos, tais como nos setores energéticos, industriais e tecnológicos. Como consequência, acaba acarretando alguns problemas, principalmente os voltados a questões ambientais. Por exemplo, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), 65,2% da energia elétrica no Brasil é gerada por meio das usinas hidroelétricas<sup>3</sup>, portanto, em períodos de estiagem, se faz necessário a utilização de usinas termoelétricas que usam combustíveis fósseis e assim emitindo gases poluentes na atmosfera. O setor industrial também contribui para os impactos ambientais, liberando gases poluentes e descartando seus efluentes em rios e lagos sem os devidos tratamentos<sup>4,5</sup>.

Normalmente, a população menos favorecida é a que mais sofre pelo aumento da poluição, na sua maioria não tem acesso à água em condições ideais de uso, o que influencia diretamente na qualidade de vida<sup>6,7</sup>.

O consumo de água fora das condições ideais está relacionado as más condições de saneamento básico, fator esse que ocasiona doenças advindas de micro-organismos patogênicos<sup>8</sup>.

As doenças contraídas pela falta de saneamento básico, tais como, cólera, hepatite A, febre tifoide, a ancilostomíase (amarelão), a ascaridíase (lombriga), esquistossomose, geram um gasto expressivo para o Sistema Único de Saúde (SUS). Uma pesquisa realizada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) afirma que a cada U\$ 1,00 gasto com tratamento com esgoto, são economizados U\$ 4,00 em atendimento hospitalares<sup>9</sup>. Infelizmente, as crianças são as mais atingidas pelas doenças contraídas pela falta de saneamento básico, sendo os casos de diarreia os mais recorrentes nos internamentos em hospitais. Esta realidade poderia ser minimizada com mecanismos que possibilitassem a remoção de bactérias presentes na água, como a *Escherichia coli* (*E. coli*).

No Brasil, os serviços públicos de abastecimento são os responsáveis por fornecer água nas cidades e são regulamentados de acordo com a portaria do Ministério da Saúde GM/MS nº 888, de 4 maio de 2021. O documento apresenta os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade<sup>10</sup>. No entanto, em propriedades rurais os procedimentos de controle, normalmente, não se aplicam, uma vez que é comum o uso de águas subterrâneas por meio de poços cacimba, semi-artesiano ou artesianos.

Os poços artesianos são perfurados nos solos até atingirem um lençol aquífero, captando água subterrânea. Esses poços são caracterizados por possuírem pequeno diâmetro, em média 20 centímetros e profundidade superior a 40 metros. Alguns poços não necessitam de bomba para que a água chegue até a superfície, mas os semi-artesianos que apresentam profundidade de, aproximadamente, 20 a 60 metros, necessitam de processos de bombeamento para levar água até a superfície<sup>11</sup>.

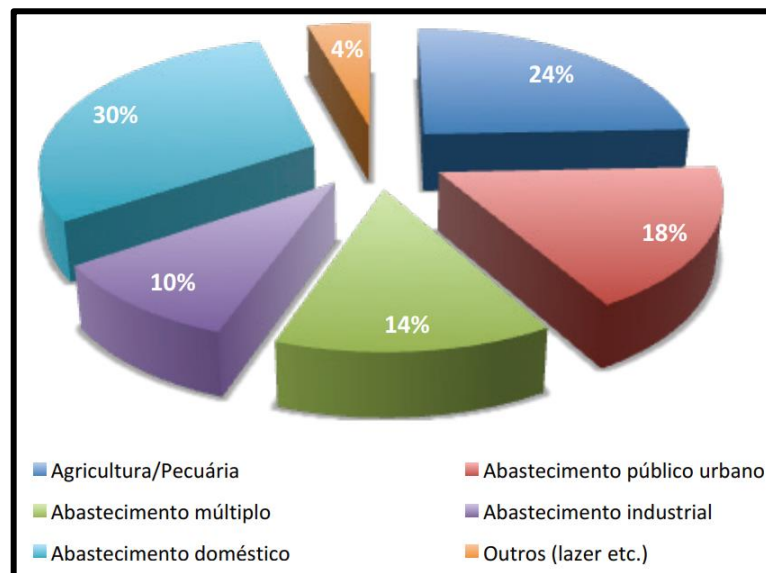
Estima-se que no Brasil existem mais de 2,5 milhões de poços tubulares, fazendo com que a água subterrânea seja o recurso natural mais extraído do solo brasileiro. Em cidades de menor porte e regiões periféricas de grandes cidades,

normalmente, as águas subterrâneas são essenciais para os abastecimentos, mesmo as que apresentam rede pública. Estes poços contribuem na redução de problemas recorrente as estiagens, assim evitando o colapso no abastecimento urbano<sup>12</sup>.

De acordo com Hirata *et al.* (2019), o número de pessoas que faz uso de água subterrânea é muito maior do que as estatísticas apresentam, uma vez que são utilizados por quem não tem acesso ao serviço público de água e usuários de poços privados em centros urbanos<sup>12</sup>.

A Figura 2 apresenta o perfil dos usuários de águas subterrâneas no Brasil. Podemos observar que 30% da água é utilizada para suprir demandas do atendimento doméstico e 18% para o abastecimento público urbano, assim é possível constatar a grande dependência dos recursos hídricos subterrâneos. Do percentual apresentado para a utilização em abastecimento doméstico, milhares de pessoas utilizam águas subterrâneas sem serem submetidas a testes de qualidade, como análises físico-química e microbiológicas, que avaliam potabilidade<sup>12</sup>.

Figura 2 - Perfil dos usuários de água subterrânea no Brasil



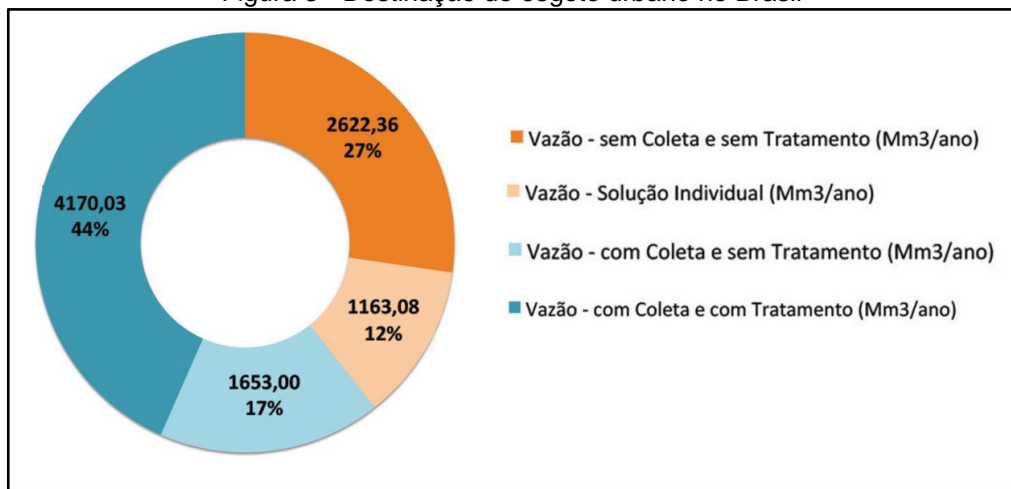
Fonte: Hirata *et al.* (2019)<sup>12</sup>

Como ressaltado na Figura 2, os recursos das águas subterrâneas são muito utilizados nos diversos setores, como abastecimento industrial, agricultura, domésticos, entre outros. Com a extração de água subterrânea pode-se obter água de excelente qualidade, como as consideradas minerais, que são naturalmente potáveis. Mas com a ampla gama de perfurações de poços, algumas situações

acabam acarretando problemas na qualidade da água obtida, principalmente devido a contaminação advinda da falta de rede de esgoto sanitário ou pelas precárias condições devido a falhas nos projetos ou até mesmo pela falta de manutenção<sup>13</sup>.

De acordo com a Agência Nacional de Água (ANA) e a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, no Brasil, cerca de 12% do esgoto não é coletado, mas é submetido a sistemas individuais de tratamento *in situ*. Como apresentado na Figura 3, 27% do esgoto não é coletado e tampouco passa por algum tipo de tratamento, totalizando 39% que não é coletado, e sendo apenas 44% coletado e tratado<sup>12,14</sup>.

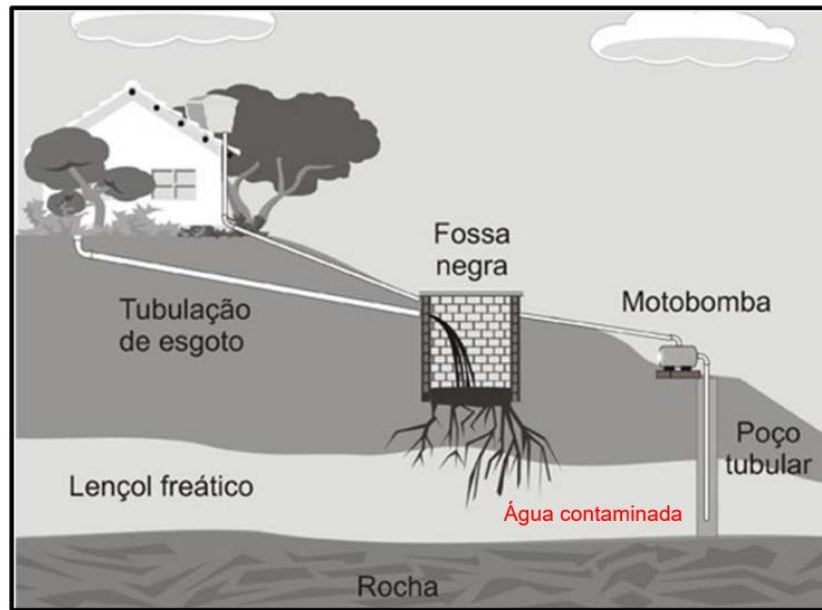
Figura 3 - Destinação do esgoto urbano no Brasil



Fonte: Hirata et al. (2019)<sup>12</sup>

Com a falta de tratamento adequado, grande parte do esgoto é descartado no solo por meio de fossas negras. Esse problema é acentuado em regiões como favelas, assentamentos e residências rurais, onde na maioria das vezes não há acesso a saneamento e/ou água encanada<sup>15</sup>. Como alternativa, acabam recorrendo às fossas sépticas e fossas negras, que podem contaminar águas subterrâneas (Figura 4) que, posteriormente, poderão ser utilizadas e levar à problemas graves de saúde<sup>16,17</sup>.

Figura 4 - Contaminação do lençol freático



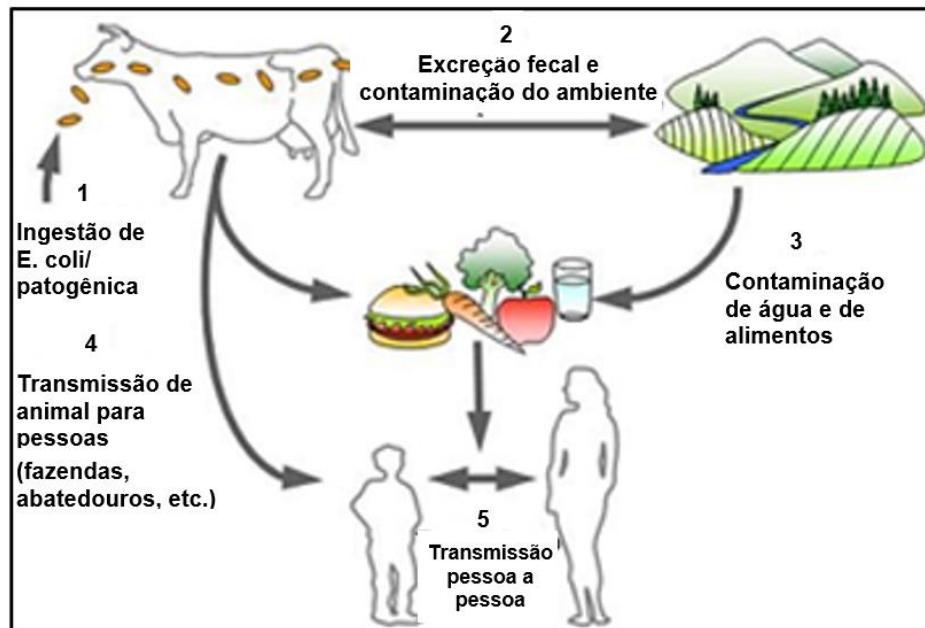
Fonte: Ribeiro (2014)<sup>18</sup>

A relação entre fossas sépticas e contaminação de águas em lençóis freáticos foi descrito pelo trabalho de Guimarães *et al.* (2010) e Castro (2011). Os resultados apontam para uma provável causa da contaminação por coliformes totais e *E. coli* dos poços nas propriedades rurais, sendo a falta de manutenção e adequação dos poços, assim como a perfuração dos mesmos próximos a fossas negras<sup>19,20</sup>.

Em estudos sobre a qualidade da água utilizada por meio de poços artesianos, Ferreira e Oliveira (2018) analisaram a qualidade da água em escolas localizadas em um assentamento no estado de Mato Grosso. Os resultados das análises microbiológicas identificaram a presença de coliformes totais. Os autores do trabalho acreditam que a contaminação da água pode ser devido a localização dos poços serem próximos as fossas sépticas<sup>21</sup>.

Além do processo de contaminação de seres humanos por *E. coli* através de águas contaminadas provenientes de lençóis freáticos, pode ocorrer por meio da contaminação do ambiente como apresentado na Figura 5. Neste processo de contaminação, a transmissão da *E. coli* ocorre via animais que, com seus dejetos, pode contaminar o ambiente. Estes dejetos contaminados podem ser levados para rios, lagos, que são utilizados, por exemplo, no cultivo de alimentos que serão ingeridos por outros animais e pelos seres humanos<sup>19,20</sup>.



Figura 5 - Ciclo de transmissão da *E. coli*

Fonte: Homero (2006)<sup>22</sup>

De acordo com os padrões apresentados na portaria GM/MS nº 888, de 4 maio de 2021, a água para consumo humano deve apresentar a ausência de *E. coli*, como apresentado na Tabela 1. Sendo assim, os resultados obtidos por Ferreira e Oliveira (2018), mostram que a água retirada dos poços estudados não segue os padrões exigidos para o consumo humano<sup>22</sup>.

Tabela 1 - Padrão bacteriológico da água para consumo humano

Formas de abastecimento		Parâmetro		VMP(1)
SAI		<i>Escherichia coli</i> (2)		Ausência em 100 ml
SAA e SAC	Na saída do tratamento	Coliformes totais (3)		Ausência em 100 ml
	Sistema de distribuição e pontos de consumo	<i>Escherichia coli</i> (2)		Ausência em 100 ml
		Coliformes totais (4)	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes	Apenas uma amostra entre as amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, poderá apresentar resultado positivo.
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes	Ausência em 100 ml em 95% das amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água.

## NOTAS:

- (1) Valor Máximo Permitido
- (2) Indicador de contaminação fecal
- (3) Indicador de eficiência de tratamento
- (4) Indicador da condição de operação e manutenção do sistema de distribuição de SAA e pontos de consumo e reservatório de SAC em que a qualidade da água produzida pelos processos de tratamento seja preservada (indicador de integridade).

Fonte: Brasil (2021)<sup>10</sup>.

Portanto, a busca por técnicas que possam reduzir ou mesmo eliminar bactérias como os coliformes totais e *E. coli* em locais onde o saneamento básico é precário, não oferecendo água tratada adequada, se torna necessário. Dentre as técnicas, tem-se as espécies reativas de oxigênio (EROs) que podem matar micro-organismos em água ou diferentes superfícies sem afetar a saúde humana<sup>24,25</sup>. A formação dos EROs pode ser por meio de materiais semicondutores, como o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), que se destaca devido a sua alta atividade fotocatalítica<sup>26-33</sup>.

Dessa maneira, o presente trabalho busca sintetizar e otimizar a atividade fotocatalítica do TiO<sub>2</sub>, através da alteração da morfologia, misturas de fases cristalográficas e incorporação de prata (Ag). Com a maior atividade fotocatalítica, busca-se a eliminação, com maior eficiência, de bactérias como coliformes totais e *E. coli* em águas provenientes de poços por meio de um sistema de filtração composto por um filtro de polipropileno com a incorporação de microtubos de TiO<sub>2</sub>-Ag sob radiação ultravioleta, de forma que a água, na presença de bactérias, possa ser descontaminada através da formação dos EROs e assim melhorar sua qualidade, tornando-se própria para o consumo humano e animal.

## 7 – CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que a rota sintética desenvolvida com  $\text{TiOSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  se mostrou eficiente na obtenção do  $\text{TiO}_2$  em diferentes morfologias, de acordo com a temperatura de síntese. Com a síntese ocorrendo a  $5\text{ }^\circ\text{C}$  observou-se a formação de aglomerados com formas indefinidas. Quando tratada termicamente a  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , os resultados de difração de raios-X mostraram a presença da fase anatase pura e com o acréscimo da temperatura de tratamento térmico ocorre a coexistência de fase anatase/rutilo. Os ensaios fotocatalíticos expuseram que, à medida que ocorre o acréscimo da fase rutilo na amostra, há uma redução na atividade fotocatalítica.

Por outro lado, as amostras sintetizadas a  $35\text{ }^\circ\text{C}$  apresentaram uma morfologia de estrutura tubular e com o tratamento térmico a  $600\text{ }^\circ\text{C}$  apresentou fase anatase pura e, com o acréscimo da temperatura de tratamento térmico para  $740\text{ }^\circ\text{C}$ , há mistura de fase anatase/rutilo, com aproximadamente 12% de rutilo. Os resultados dos ensaios fotocatalíticos mostraram que a mistura de fase proporcionou uma maior atividade fotocatalítica em comparação com as demais, evidenciando a sinergia entre as fases anatase/rutilo, o que pode ser devido a morfologia tubular obtida no processo de síntese desenvolvido no presente trabalho.

O processo de incorporação de Ag na superfície dos microtubos de  $\text{TiO}_2$  por meio da fotorredução de  $\text{AgNO}_3$  em solução aquosa na presença do  $\text{TiO}_2$  foi bem sucedida, uma vez que, com a adição de 1,5% de  $\text{AgNO}_3$  em relação a massa de  $\text{TiO}_2$ , foi obtido aproximadamente 0,9% de Ag na superfície dos microtubos de  $\text{TiO}_2$ . Os resultados referentes a difração de raios-X evidenciaram que a incorporação de Ag ao  $\text{TiO}_2$  não influenciou na cristalinidade do material, tendo em vista que as amostras tratadas termicamente a  $600\text{ }^\circ\text{C}$  apresentaram fase anatase e sem variação significativa no tamanho médio do cristalito. A morfologia tubular do  $\text{TiO}_2$  também não sofreu variações de acordo com as imagens obtidas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura. Já os ensaios fotocatalíticos, mostraram que, com a incorporação de Ag aos microtubos de  $\text{TiO}_2$ , houve uma melhora na eficiência fotocatalítica em comparação com a amostra de  $\text{TiO}_2$  puro. A amostra contendo aproximadamente 0,9% de Ag em relação a massa de  $\text{TiO}_2$  apresentou a maior atividade fotocatalítica. Desta maneira, os microtubos de  $\text{TiO}_2$  com a incorporação de Ag se mostraram mais promissores na degradação de contaminantes orgânicos.

O desenvolvimento do filtro fotocatalítico se mostrou eficiente para a degradação de corantes como a Rodamina-B. A degradação total ocorreu em aproximadamente 80 minutos de circulação no sistema utilizando filtros com a incorporação de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  Degussa P25 e microtubos de  $\text{TiO}_2$  sintetizados.

O  $\text{TiO}_2$  comercial P25 aplicado na preparação dos filtros fotocatalíticos não demonstrou ser a melhor opção, pois suas nanopartículas apresentam dimensões inferiores as tramas do filtro de polipropileno, não permanecendo aderidas ao filtro, sendo removidas do sistema de filtração à medida que ocorre a circulação da solução. Já os microtubos de  $\text{TiO}_2$  se mostraram mais promissores na aderência aos filtros, pois apresentam dimensões da ordem de grandeza das tramas.

Os ensaios bactericidas mostraram que o sistema de filtração fotocatalítico desenvolvido é eficiente na eliminação de coliformes totais e *E. coli* presentes em águas contaminadas. Com os ensaios verificou se que, apenas na presença da lâmpada UV no interior do filtro, não houve a eliminação dos micro-organismos, assim como os filtros originais sem nenhuma incorporação de fotocatalisador. No entanto, com a incorporação de microtubos de  $\text{TiO}_2$  puro no filtro ocorreu uma redução significativa no número de colônias de coliformes totais e *E. coli* na água analisada, mas o filtro com microtubos de  $\text{TiO}_2$ -Ag apresentou uma maior eficiência na eliminação das bactérias em comparação com o filtro de  $\text{TiO}_2$  puro. A eliminação dos micro-organismos é atribuída à atividade fotocatalítica desenvolvida pelo  $\text{TiO}_2$ , o que proporcionou a geração dos EROs, os quais são responsáveis pela morte das bactérias.

Com o sistema de filtração fotocatalítico duplo, ocorreu a erradicação total dos coliformes totais e da *E. coli* presente na amostra, mesmo com o maior fluxo de solução. Portanto, mesmo que as bactérias não sejam totalmente eliminadas durante a passagem pelo primeiro filtro, as que permaneceram vivas, podem ser eliminadas na interação com o segundo filtro fotocatalítico, o que o torna favorável para a aplicação em locais que a população não tem acesso a água tratada, permitindo a eliminação de micro-organismo que possam estar presentes em águas contaminadas.

## 8 – IMPACTO/RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL

O desenvolvimento de projetos que possam contribuir para minimizar os prejuízos causados pelo homem ao meio ambiente é sem dúvida um aspecto positivo, podendo gerar praticidade para a sociedade e evitar uma possível crise socioambiental. O presente trabalho desenvolveu uma rota de síntese verde para a produção de um dos materiais mais utilizados na sociedade devido a sua propriedade fotocatalítica. Esta propriedade propicia a degradação de contaminantes presentes no ar em águas contaminadas.

É sabido que uma grande parcela da população brasileira não possui saneamento básico. Dentre essa parcela, nota-se um descuido com os moradores de zonas rurais, como sítiantes e moradores de assentamentos, que não recebem as orientações necessárias para a perfuração de seus poços, que será extraída a água para o seu próprio consumo. Por consequência, acabam consumindo água fora dos padrões de qualidade exigidos, contendo a presença de bactérias nocivas à saúde humana.

Em resumo, no presente trabalho foi desenvolvido um sistema de filtração fotocatalítico que se mostrou promissor na eliminação de bactérias como os coliformes totais e *Escherichia coli* (*E. coli*), sistema esse que pode ser utilizado principalmente em regiões que não tem acesso à água tratada.

## 9 – REFERÊNCIAS

1. Population Matters. Population: The Numbers. Disponível em: <<https://populationmatters.org/population-numbers>>. Acesso em: 21 nov. 2021.
2. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. *Projeção da população* Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 11 nov. 2021.
3. Brasil - Ministério de Minas e Energia - MME. *Balanço Energético Nacional - BEN 2021. Relatório Final*. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>. Acesso em: 21 nov. 2021.
4. Tera Ambiental. Efluentes industriais: entenda o impacto do descarte sem o tratamento correto. 1–10 <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/efluentes-industriais-o-impacto-do-descarte-sem-tratamento-correto> (2019).
5. Zanoni, M. V. B. & Carneiro, P. A. O descarte dos corantes têxteis. *Ciência Hoje* **29**, 61–64 (2001).
6. Geneva: World Health Organization. Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment. **2021**, 194 (2021).
7. Huang, J. *et al.* Performance of ceramic disk filter coated with nano ZnO for removing Escherichia coli from water in small rural and remote communities of developing regions. *Environ. Pollut.* **238**, 52–62 (2018).
8. Conte, D., Colombo, M., Zanrosso, A. & Salvador, M. Qualidade microbiológica de águas tratadas e não tratadas na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Microbiol.* 2003–2004 (2004).
9. Organization, W. H. UN reveals major gaps in water and sanitation – especially in rural areas. <https://www.who.int/news/item/19-11-2014-un-reveals-major-gaps-in-water-and-sanitation-especially-in-rural-areas> (2014).
10. Brasil. Ministério da Saúde. *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potab.* 127 (Diário Oficial da União, 2021).
11. Peixoto, S. C., Merlugo, C. D., Maciel, A. & Solner, T. B. Potabilidade da água de poços artesianos: diagnóstico de amostras dos municípios do Rio Grande do Sul. *Ciência e Nat.* **41**, 1 (2019).
12. Hirata, R., Suhogusoff, A. V., Marcellini, S. S. & VILLAR, P. C. M. *A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento.* (2019).
13. An, C. J. *et al.* Multi-soil-layering systems for wastewater treatment in small and remote communities. *J. Environ. Informatics* **27**, 131–144 (2016).
14. ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Atlas Esgotos - Despoluição de bacias hidrográficas.* (2017).
15. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Senar. *Saúde: saneamento rural.*

- (2019).
16. Hirata, R. *As águas subterrâneas e sua importância ambiental e econômica para o Brasil*. doi:10.11606/9788563124074.
  17. Grumicker, M. G. *et al.* Qualidade Da Água De Poços Artesianos Em Um Assentamento Do Município De Mundo Novo, Mato Grosso Do Sul. *Rev. Gestão Sustentabilidade Ambient.* **7**, 807 (2018).
  18. Ribeiro, C. G. Tratamento e captação de água no campo. 1–3 <https://www.cpt.com.br/artigos/tratamento-e-captacao-de-agua-no-campo> (2014).
  19. Guimarães, J. R., Santos, L. U. dos, Assalin, M. R. & Figueiredo, R. F. de. Inativação de Escherichia Coli Por Fotólise e Fotocatálise Heterogênea. *Rev. DAE* **58**, 35–42 (2010).
  20. Castro, R. P. T. de. Avaliação das condições construtivas das captações de água do assentamento canudos em goiás. (Universidade Federal de Goiás, 2011).
  21. Ferreira, J. R. dos S. & Oliveira, J. R. de. Caracterização microbiológica da água de poços artesianos em escolas do assentamento antônio conselheiro – MT. (Anais do IX Seminário Regional de Extensão Universitária da Região Centro Oeste, 2018).
  22. Homero, V. E. coli patogênica em rebanhos é risco mundial de saúde pública. <http://www.faperj.br/?id=830.2.9> (2006).
  23. Burgos, T. das N., Schuroff, P. A., Marim, A. L., Lima, N. & Pelayo, J. Água de consumo humano proveniente de poços rasos como fator de risco de doenças de veiculação hídrica. *Rev. Ciência Saúde* **16**, 34–38 (2014).
  24. LI, Y., MA, M., WANG, X. & WANG, X. Inactivated properties of activated carbon-supported TiO<sub>2</sub> nanoparticles for bacteria and kinetic study. *J. Environ. Sci.* **20**, 1527–1533 (2008).
  25. Wang, N., Zhang, X., Wang, Y., Yu, W. & Chan, H. L. W. Microfluidic reactors for photocatalytic water purification. *Lab Chip* **14**, 1074–1082 (2014).
  26. Foster, H. A., Ditta, I. B., Varghese, S. & Steele, A. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **90**, 1847–1868 (2011).
  27. Coleman, H. M., Marquis, C. P., Scott, J. A., Chin, S. S. & Amal, R. Bactericidal effects of titanium dioxide-based photocatalysts. *Chem. Eng. J.* **113**, 55–63 (2005).
  28. Gupta, K., Singh, R. P., Pandey, A. & Pandey, A. Photocatalytic antibacterial performance of TiO<sub>2</sub> and Ag-doped TiO<sub>2</sub> against *S. Aureus*, *P. Aeruginosa* and *E. Coli*. *Beilstein J. Nanotechnol.* **4**, 345–351 (2013).
  29. Sharon, M. *et al.* Photocatalysis-assisted water filtration: Using TiO<sub>2</sub>-coated vertically aligned multi-walled carbon nanotube array for removal of Escherichia coli O157:H7. *Mater. Sci. Eng. C* **33**, 4392–4400 (2013).
  30. Le, T. S., Dao, T. H., Nguyen, D. C., Nguyen, H. C. & Balikhin, I. L. Air purification equipment combining a filter coated by silver nanoparticles with a nano-TiO<sub>2</sub> photocatalyst for use in hospitals. *Adv. Nat. Sci. Nanosci.*

- Nanotechnol.* **6**, (2015).
31. Ochiai, T. *et al.* Fabrication of a TiO<sub>2</sub> nanoparticles impregnated titanium mesh filter and its application for environmental purification. *Catal. Sci. Technol.* **1**, 1324–1327 (2011).
  32. Xu, C., Xie, W., Si, X., Zhang, J. & Yang, J. Photocatalytic degradation of cooking fume on a TiO<sub>2</sub>-coated carbon nanotubes composite filter. *Environ. Res.* **166**, 167–174 (2018).
  33. Joost, U. *et al.* Photocatalytic antibacterial activity of nano-TiO<sub>2</sub> (anatase)-based thin films: Effects on *Escherichia coli* cells and fatty acids. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **142**, 178–185 (2015).
  34. Amado, C. M., Minahk, C. J., Cilli, E., Oliveira, G. & Dupuy, F. G. *Journal of Membrane Science*. *BBA - Biomembr.* 183135 (2019) doi:10.1016/j.bbame.2019.183135.
  35. Pierpaoli, M. *et al.* Enhanced photocatalytic activity of transparent carbon nanowall/TiO<sub>2</sub> heterostructures. *Mater. Lett.* **262**, 127155 (2020).
  36. Mahyad, B. Biomedical Applications of TiO<sub>2</sub> Nanostructures: Recent Advances. 3447–3470 (2020).
  37. Ram Kumar, R., Jaya Suthahar, S. T., Sakthivel, C., Vijayan, V. & Yokeshwaran, R. Performance analysis of solar water heater by using TiO<sub>2</sub> nanofluids. *Mater. Today Proc.* **21**, 817–819 (2020).
  38. Ali, I., Suhail, M., Alothman, Z. A. & Alwarthan, A. Recent advances in syntheses, properties and applications of TiO<sub>2</sub> nanostructures. *RSC Adv.* **8**, 30125–30147 (2018).
  39. Haggerty, J. E. S. *et al.* High-fraction brookite films from amorphous precursors. *Sci. Rep.* **7**, 1–11 (2017).
  40. Morais, L. H. *et al.* The structural and electronic properties of TiO<sub>2</sub> polymorphs towards water splitting reaction. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **29**, 18282–18289 (2018).
  41. Oi, L. E. *et al.* Recent advances of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) for green organic synthesis. *RSC Adv.* **6**, 108741–108754 (2016).
  42. Hanaor, D. A. H. & Sorrell, C. C. Review of the anatase to rutile phase transformation. *J. Mater. Sci.* **46**, 855–874 (2011).
  43. Zhang, J., Zhou, P., Liu, J. & Yu, J. New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO<sub>2</sub>. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 20382–20386 (2014).
  44. Spada, E. R. *et al.* Preparation, characterization and application of phase-pure anatase and rutile TiO<sub>2</sub> nanoparticles by new green route. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **28**, 16932–16938 (2017).
  45. Satoh, N., Nakashima, T. & Yamamoto, K. Metastability of anatase: Size dependent and irreversible anatase-rutile phase transition in atomic-level precise titania. *Sci. Rep.* **3**, 3–8 (2013).
  46. Li, W., Ni, C., Lin, H., Huang, C. P. & Shah, S. I. Size dependence of thermal stability of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *J. Appl. Phys.* **96**, 6663–6668 (2004).
  47. Diebold, U. The surface science of titanium dioxide. *Surf. Sci. Rep.* **48**, 53–229



- (2003).
48. Gupta, S. M. & Tripathi, M. A review of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Chinese Sci. Bull.* **56**, 1639–1657 (2011).
  49. Kudo, A. & Miseki, Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem. Soc. Rev.* **38**, 253–278 (2009).
  50. Wang, W. K. *et al.* Self-induced synthesis of phase-junction TiO<sub>2</sub> with a tailored rutile to anatase ratio below phase transition temperature. *Sci. Rep.* **6**, 1–10 (2016).
  51. Su, R. *et al.* How the anatase-to-rutile ratio influences the photoreactivity of TiO<sub>2</sub>. *J. Phys. Chem. C* **115**, 24287–24292 (2011).
  52. She, H. *et al.* Photocatalytic H<sub>2</sub> production activity of TiO<sub>2</sub> modified by inexpensive Cu(OH)<sub>2</sub> cocatalyst. *J. Alloys Compd.* **821**, (2020).
  53. Bian, Z., Tachikawa, T., Kim, W., Choi, W. & Majima, T. Superior electron transport and photocatalytic abilities of metal-nanoparticle-loaded TiO<sub>2</sub> superstructures. *J. Phys. Chem. C* **116**, 25444–25453 (2012).
  54. Yang, X. H. *et al.* Synthesis of silver-titanium dioxide nanocomposites for antimicrobial applications. *J. Nanoparticle Res.* **16**, (2014).
  55. Sobana, N., Muruganadham, M. & Swaminathan, M. Nano-Ag particles doped TiO<sub>2</sub> for efficient photodegradation of Direct azo dyes. *J. Mol. Catal. A Chem.* **258**, 124–132 (2006).
  56. Leyland, N. S. *et al.* Highly Efficient F, Cu doped TiO<sub>2</sub> anti-bacterial visible light active photocatalytic coatings to combat hospital-acquired infections. *Sci. Rep.* **6**, 1–10 (2016).
  57. Herrmann, J. M. Heterogeneous photocatalysis: State of the art and present applications. *Top. Catal.* **34**, 49–65 (2005).
  58. Ahmadi, Y., Bhardwaj, N., Kim, K. H. & Kumar, S. Recent advances in photocatalytic removal of airborne pathogens in air. *Sci. Total Environ.* **794**, 148477 (2021).
  59. Regmi, C., Joshi, B., Ray, S. K., Gyawali, G. & Pandey, R. P. Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Front. Chem.* **6**, 1–6 (2018).
  60. Natarajan, T. S., Thomas, M., Natarajan, K., Bajaj, H. C. & Tayade, R. J. Study on UV-LED/TiO<sub>2</sub> process for degradation of Rhodamine B dye. *Chem. Eng. J.* **169**, 126–134 (2011).
  61. Wilhelm, P. & Stephan, D. Photodegradation of rhodamine B in aqueous solution via SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> nano-spheres. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **185**, 19–25 (2007).
  62. Gao, M., Zhu, L., Ong, W. L., Wang, J. & Ho, G. W. Structural design of TiO<sub>2</sub>-based photocatalyst for H<sub>2</sub> production and degradation applications. *Catal. Sci. Technol.* **5**, 4703–4726 (2015).
  63. Nogueira, R. F. P. & Jardim, W. F. A FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA E SUA APLICAÇÃO AMBIENTAL Raquel F. P. Nogueira e Wilson F. Jardim. *Quim. Nova* **2**, 69–72 (1998).

64. Skorb, E. V. *et al.* Antibacterial activity of thin-film photocatalysts based on metal-modified TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>:In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite. *Appl. Catal. B Environ.* **84**, 94–99 (2008).
65. Ribao, P., Corredor, J., Rivero, M. J. & Ortiz, I. Role of reactive oxygen species on the activity of noble metal-doped TiO<sub>2</sub> photocatalysts. *J. Hazard. Mater.* 45–51 (2019) doi:10.1016/j.jhazmat.2018.05.026.
66. Sun, M. *et al.* Synthesis and photocatalytic activity of calcium antimony oxide hydroxide for the degradation of dyes in water. *J. Phys. Chem. C* **113**, 13825–13831 (2009).
67. Yu, K. *et al.* Visible light-driven photocatalytic degradation of rhodamine B over NaBiO<sub>3</sub>: Pathways and mechanism. *J. Phys. Chem. A* **113**, 10024–10032 (2009).
68. He, Z. *et al.* Photocatalytic degradation of rhodamine B by Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> with electron accepting agent under microwave irradiation: Mechanism and pathway. *J. Hazard. Mater.* **162**, 1477–1486 (2009).
69. Horikoshi, S., Saitou, A., Hidaka, H. & Serpone, N. Environmental Remediation by an Integrated Microwave/UV Illumination Method. V. Thermal and Nonthermal Effects of Microwave Radiation on the Photocatalyst and on the Photodegradation of Rhodamine-B under UV/Vis Radiation. *Environ. Sci. Technol.* **37**, 5813–5822 (2003).
70. Xu, M. *et al.* Photocatalytic activity of bulk TiO<sub>2</sub> anatase and rutile single crystals using infrared absorption spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.* **106**, 1–4 (2011).
71. Luttrell, T. *et al.* Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO<sub>2</sub> films. *Sci. Rep.* **4**, 1–8 (2015).
72. Kittel, C. *Introduction to Solid State Physics. Physics Bulletin* vol. 8 (2005).
73. Odling, G. & Robertson, N. Why is anatase a better photocatalyst than rutile? the importance of free hydroxyl radicals. *ChemSusChem* **8**, 1838–1840 (2015).
74. Ding, L. *et al.* TiO<sub>2</sub> nanobelts with anatase/rutile heterophase junctions for highly efficient photocatalytic overall water splitting. *J. Colloid Interface Sci.* **567**, 181–189 (2020).
75. Bojinova, A., Kralchevska, R., Poullos, I. & Dushkin, C. Anatase/rutile TiO<sub>2</sub> composites: Influence of the mixing ratio on the photocatalytic degradation of Malachite Green and Orange II in slurry. *Mater. Chem. Phys.* **106**, 187–192 (2007).
76. Scanlon, D. O. *et al.* Band alignment of rutile and anatase TiO<sub>2</sub>. *Nat. Mater.* **12**, 798–801 (2013).
77. Deák, P., Aradi, B. & Frauenheim, T. Band lineup and charge carrier separation in mixed rutile-anatase systems. *J. Phys. Chem. C* **115**, 3443–3446 (2011).
78. Silva, W. L. da, Lansarin, N. A. & Moro, C. C. Síntese, caracterização e atividade fotocatalítica de catalisadores nanoestruturados de TiO<sub>2</sub> dopados com metais. *Quim. Nova* **36**, 382–386 (2013).
79. Albitzer, E. *et al.* A comparative study of photo-assisted deposition of silver

- nanoparticles on TiO<sub>2</sub>. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **13**, 4943–4948 (2013).
80. Bahadur, J., Agrawal, S., Panwar, V., Parveen, A. & Pal, K. Antibacterial properties of silver doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized via sol-gel technique. *Macromol. Res.* **24**, 488–493 (2016).
  81. Viet, P. Van *et al.* Silver nanoparticle loaded TiO<sub>2</sub> nanotubes with high photocatalytic and antibacterial activity synthesized by photoreduction method. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **352**, 106–112 (2018).
  82. Mandari, K. K., Kwak, B. S., Police, A. K. R. & Kang, M. In-situ photo-reduction of silver particles and their SPR effect in enhancing the photocatalytic water splitting of Ag<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> photocatalysts under solar light irradiation: A case study. *Mater. Res. Bull.* **95**, 515–524 (2017).
  83. Albiter, E., Valenzuela, M. A., Alfaro, S., Valverde-Aguilar, G. & Martínez-Pallares, F. M. Photocatalytic deposition of Ag nanoparticles on TiO<sub>2</sub>: Metal precursor effect on the structural and photoactivity properties. *J. Saudi Chem. Soc.* **19**, 563–573 (2015).
  84. Janczarek, M. & Kowalska, E. On the origin of enhanced photocatalytic activity of copper-modified titania in the oxidative reaction systems. *Catalysts* **7**, (2017).
  85. Behnajady, M. A., Modirshahla, N., Shokri, M. & Rad, B. Enhancement of photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by Silver doping: Photodeposition versus liquid impregnation methods. *Glob. Nest J.* **10**, 1–7 (2008).
  86. Ma, J., Xiong, Z., David Waite, T., Ng, W. J. & Zhao, X. S. Enhanced inactivation of bacteria with silver-modified mesoporous TiO<sub>2</sub> under weak ultraviolet irradiation. *Microporous Mesoporous Mater.* **144**, 97–104 (2011).
  87. Aliabadi, M. & Sagharigar, T. Photocatalytic removal of Rhodamine B from aqueous solutions using TiO<sub>2</sub> nanocatalyst. *J. Appl. Environ. Biol. Sci* **1**, 620–626 (2011).
  88. Qi, P. *et al.* Development of a rapid, simple and sensitive HPLC-FLD method for determination of rhodamine B in chili-containing products. *Food Chem.* **164**, 98–103 (2014).
  89. Samian, Zaidan, A. H., Anggraeni, M. P., Yasin, M. & Supadi. Detection of Rhodamine B levels in distilled water based on displacement sensor using fiber coupler and concave mirror. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **18**, 988–992 (2016).
  90. Messner, M. J., Berger, P. & Javier, J. Total coliform and E. coli in public water systems using undisinfected ground water in the United States. *Int. J. Hyg. Environ. Health* **220**, 736–743 (2017).
  91. Daub, N. A. *et al.* A Mini Review on Parameters Affecting the Semiconducting Oxide Photocatalytic Microbial Disinfection. *Water. Air. Soil Pollut.* **231**, 81310 (2020).
  92. Ganguly, P., Byrne, C., Breen, A. & Pillai, S. C. Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances. *Appl. Catal. B Environ.* **225**, 51–75 (2018).
  93. Khezerlou, A., Alizadeh-Sani, M., Azizi-Lalabadi, M. & Ehsani, A. *Nanoparticles and their antimicrobial properties against pathogens including bacteria, fungi,*

- parasites and viruses. Microbial Pathogenesis* vol. 123 (Elsevier Ltd, 2018).
94. Teodoro, A., Boncz, M. Á., Paulo, P. L. & Junior, A. M. Desinfecção de água cinza por fotocatalise heterogênea. *Eng. Sanit. e Ambient.* **22**, 1017–1026 (2017).
  95. Huang, Z. *et al.* Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **130**, 163–170 (2000).
  96. Durango-Giraldo, G., Cardona, A., Zapata, J. F., Santa, J. F. & Buitrago-Sierra, R. Titanium dioxide modified with silver by two methods for bactericidal applications. *Heliyon* **5**, e01608 (2019).
  97. Pasquale, I. De *et al.* Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-Based Nanostructured Materials for Microbial Inactivation. *Catalysts* (2020).
  98. Natarajan, C. & Nogami, G. Cathodic Electrodeposition of Nanocrystalline Titanium Dioxide Thin Films. *J. Electrochem. Soc.* **143**, 1547–1550 (1996).
  99. Maijenburg, A. W. *et al.* Electrochemical synthesis of coaxial TiO<sub>2</sub>-Ag nanowires and their application in photocatalytic water splitting. *J. Mater. Chem. A* **2**, 2648–2656 (2014).
  100. Karuppuchamy, S., Nonomura, K., Yoshida, T., Sugiura, T. & Minoura, H. Cathodic electrodeposition of oxide semiconductor thin films and their application to dye-sensitized solar cells. *Solid State Ionics* **151**, 19–27 (2002).
  101. Choudhury, B. & Choudhury, A. Local structure modification and phase transformation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles initiated by oxygen defects, grain size, and annealing temperature. *Int. Nano Lett.* **3**, 1–9 (2013).
  102. PHILIPS Lighting. TUV PL-S 11W/2P 1CT/6X10BOX A. 16–17 [https://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-tubos-convencionais/special-lamps/purificationwater-and-air/residential-water-and-air/tuv-pl-s/927902304007\\_EU/product](https://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-tubos-convencionais/special-lamps/purificationwater-and-air/residential-water-and-air/tuv-pl-s/927902304007_EU/product) (2021).
  103. Sartorius. Ensaio Microbiológico de Alimentos, Bebidas, Água Potável e Produtos Farmacêuticos. (2014).
  104. Boulares, A., Dhouibi, L., Berçot, P. & Rezrazi, E. M. Analytical Studies Of Titanium Oxyhydroxide/Manganese Oxide Elaborated on Pure Copper Electrode: Influence of the Composite on the Electrochemical Behavior of the Substrate in 3% NaCl Medium. *Chem. Africa* **1**, 127–144 (2018).
  105. Montanhera, M. A., Venancio, R. H. D. & Alves, É. Synthesis of TiO<sub>2</sub> Tubes Via Dissolution of TiOSO<sub>4</sub> Rod Using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Mater. Res.* **24**, (2021).
  106. Tian, G. *et al.* Controlled synthesis of thorny anatase TiO<sub>2</sub> tubes for construction of Ag-AgBr/TiO<sub>2</sub> composites as highly efficient simulated solar-light photocatalyst. *J. Mater. Chem.* **22**, 2081–2088 (2012).
  107. Shao, C. *et al.* Fabrication of large-diameter tube-like mesoporous TiO<sub>2</sub> via homogeneous precipitation and photocatalytic decomposition of papermaking wastewater. *Chem. Eng. J.* **230**, 227–235 (2013).
  108. Zeng, L., Song, W. & Xie, C. Fabrication of TiO<sub>2</sub> rod in tube nanostructure with enhanced photocatalytic activity: Investigation of the effect of the states of the precursor on morphology. *RSC Adv.* **4**, 36708–36712 (2014).

109. Wong, C. L., Tan, Y. N. & Mohamed, A. R. A review on the formation of titania nanotube photocatalysts by hydrothermal treatment. *J. Environ. Manage.* **92**, 1669–1680 (2011).
110. Macak, J. M., Zlamal, M., Krysa, J. & Schmuki, P. Self-organized TiO<sub>2</sub> nanotube layers as highly efficient photocatalysts. *Small* **3**, 300–304 (2007).
111. Lee, S. Y. & Park, S. J. TiO<sub>2</sub> photocatalyst for water treatment applications. *J. Ind. Eng. Chem.* **19**, 1761–1769 (2013).
112. Zarhri, Z. *et al.* Synthesis, structural and crystal size effect on the optical properties of sprayed TiO<sub>2</sub> thin films: Experiment and DFT TB-mbj. *J. Alloys Compd.* **819**, (2020).
113. Hussain, M. *et al.* Ag–TiO<sub>2</sub> nanocomposite for environmental and sensing applications. *Mater. Chem. Phys.* **181**, 194–203 (2016).
114. FILTRAÇÃO, B. ELEMENTO POLIPROPILENO 9.3/4" ROSCA. 950 <https://bbifiltracao.com.br/produto/elemento-polipropileno-934-rosca/#revendedor>.
115. Kim, B., Kim, D., Cho, D. & Cho, S. Bactericidal effect of TiO<sub>2</sub> photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria. *Chemosphere* **52**, 277–281 (2003).