

Fotoatividade e capacidade de absorção óptica por fibras cerâmicas de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 obtidas por electrospinning

Photoativity and optical absorption capability by ceramic fibers of TiO_2 and TiO_2/WO_3 obtained by electrospinning

DOI:10.34115/basrv5n1-009

Recebimento dos originais: 03/12/2020

Aceitação para publicação: 08/01/2021

Luana Góes Soares da Silva

Doutora em Engenharia- Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço :Av. Osvaldo Aranha 99, sala 705, Porto Alegre- RS, Brasil, 90035-190

E-mail: lugoes.soares@gmail.com

Annelise Kopp Alves

Doutora em Engenharia- Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço :Av. Osvaldo Aranha 99, sala 705, Porto Alegre- RS, Brasil, 90035-190

E-mail: annelise.alves@ufrgs.br

RESUMO

Várias propriedades ópticas nos materiais são determinadas por imperfeições, por exemplo aquelas que dão origem à atividade de cor, são ocasionadas por processos de absorção e emissão eletrônica em íons de impureza e outros defeitos pontuais. O fotocromismo é um dos tipos de cromogenismo mais conhecidos na literatura. Esse efeito é capaz de modificar, de maneira reversível, as propriedades ópticas do material em questão quando este é exposto a algum tipo de radiação eletromagnética (ultravioleta, visível ou infravermelho). Materiais fotocromicos têm sido utilizados em diversos ramos da indústria, como: em lentes de contato e de óculos, em sensores, em janelas inteligentes, entre outras. Os óxidos de metais de transição, como: o MoO_3 , o WO_3 , o TiO_2 , o V_2O_5 , e o Nb_2O_5 , têm sido empregados no estudo do fotocromismo. Neste trabalho, fibras dos óxidos de titânio e tungstênio foram sintetizadas por *electrospinning* e, suas propriedades ópticas e fotocatalíticas foram analisadas. As fibras sintetizadas foram submetidas a tratamentos térmicos em temperaturas de 650 °C, 700 °C, 750 °C e 800 °C, a fim de remover os resíduos poliméricos e contribuir para a formação das fases cristalinas. O TiO_2 foi escolhido devido ao seu bom desempenho como fotocatalisador, e o WO_3 por apresentar em todos os efeitos cromógenos as maiores variações na absorvância óptica, o que faz com que este óxido seja o mais utilizado em pesquisas quando deseja-se estudar o efeito fotocromico. A microestrutura das amostras foi determinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as fases cristalinas formadas foram observadas por difração de raios X (DRX), o fotocromismo e a capacidade de absorção óptica foi determinada através de um espectrofotômetro Konica Minolta e a fotoatividade das amostras foi analisada através de ensaios de fotocatalise heterogênea. Os resultados apontam que todas as fibras tiveram a sua cor modificada quando submetidos a radiação UVA-visível. Também foi possível observar que as todas as amostras sintetizadas por

electrospinning foram capazes de degradar 125 mL de uma solução 20 ppm do corante de alaranjado de metila, sendo que as amostras de TiO_2/WO_3 tratadas termicamente a temperatura de 800 °C apresentaram aproximadamente 100% de fotoatividade e de absorbância de luz na região do UVA-visível.

Palavras-chave: Fibras Cerâmicas, Fotoatividade; Electrospinning, Fotocromismo; Absorção Óptica.

ABSTRACT

Several optical properties in materials are determined by imperfections, for example those that give rise to color activity, are caused by processes of absorption and electronic emission in ions of impurity and other occasional defects. Photochromism is one of the most known types of chromogenism in the literature. This effect is capable of reversibly modifying the optical properties of the material in question when it is exposed to some type of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible or infrared). Photochromic materials have been used in several branches of industry, such as: contact lenses and glasses, sensors, intelligent windows, among others. Transition metal oxides such as MoO_3 , WO_3 , TiO_2 , V_2O_5 , and Nb_2O_5 have been used in the study of photochromism. In this work, titanium and tungsten oxide fibers were synthesized by electrospinning and their optical and photocatalytic properties were analyzed. The synthesized fibers were submitted to thermal treatments at temperatures of 650 °C, 700 °C, 750 °C and 800 °C in order to remove the polymeric residues and contribute to the formation of crystalline phases. TiO_2 was chosen due to its good performance as a photocatalyst, and WO_3 because it presents in all chromogenic effects the greatest variations in optical absorption, which makes this oxide the most used in research when the photochromic effect is to be studied. The microstructure of the samples was determined by scanning electron microscopy (SEM), the crystalline phases formed were observed by X-ray diffraction (XRD), the photochromism and the optical absorption capacity was determined by a Konica Minolta spectrophotometer and the photoactivity of the samples was analyzed through heterogeneous photocatalysis tests. The results indicate that all fibers had their color modified when submitted to UVA-visible radiation. It was also possible to observe that all samples synthesized by electrospinning were able to degrade 125 mL of a 20 ppm solution of methyl orange dye, and samples of TiO_2/WO_3 thermally treated at 800 °C had approximately 100% photoactivity and light absorption in the UVA-visible region.

Keywords: Ceramic fibers, Photoactivity; Electrospinning, Photochromism; Optical Absorption.

1 INTRODUÇÃO

A utilização dos óxidos de titânio e tungstênio na degradação de compostos orgânicos têm sido impulsionada pelo fato de ambos quando ativados opticamente apresentarem um comportamento químico e físico semelhantes, além de possuírem diversas características cromógenas em comum, entre elas o fotocromismo. A relevância do uso de materiais fotocromáticos inclui desde a obtenção de excelentes propriedades ópticas até aplicações em diversos ramos da indústria, como por exemplo: janelas

inteligentes, conversores de energia solar, camuflagem, dispositivos armazenadores de informação, brinquedos, cosméticos, indústria têxtil, joalheria, dentre outras (GALVÃO, 2003; e GONÇALVES, 2013).

Existem diversos tipos de cromogenismo, dentre eles, um dos mais conhecidos é o fotocromismo. Esse efeito é capaz de modificar, de maneira reversível, as suas propriedades ópticas quando exposto a radiação eletromagnética, ou seja, UV visível ou infravermelho. As alterações na tonalidade neste tipo de material são consequência da existência de grupos ou moléculas cromógenas, que absorvem a perturbação elétrica resultando na modificação de suas propriedades ópticas (GALVÃO, 2003; e GONÇALVES, 2013).

Esses materiais podem ser chamados de fotocromômicos, se manifestam consideráveis alterações de tonalidade, reversíveis quando submetidos a uma reação de oxidação ou redução, quer sejam alterações de transparente para colorido, quer sejam alterações entre cores (GALVÃO, 2003; GONÇALVES, 2013 e COELHO, 2008).

Diversos mecanismos são recomendados para descrever o efeito fotocromômico, os mais reconhecidos são: formação de centros de cor através da geração de vacâncias de O_2 , dupla inserção de íons e elétrons e *smallpolaron*. Este trabalho deteve-se em analisar o fotocromismo sob a ótica da formação de centros de cor, através da geração de vacâncias de O_2 . Neste processo o fotocromismo se manifesta por meio da geração de centros de absorção óptica. Estes centros se formam através da dissociação de moléculas de H_2O , ou de moléculas orgânicas que possuam O_2 e H_2 adsorvidas em sua superfície. Estas moléculas são agregadas ao material quando da sua preparação e são as fornecedoras de elétrons e de prótons, que originarão os centros de absorção óptica no óxido (GALVÃO, 2003 e SOBRINHO, 2015).

As vacâncias de O_2 são um tipo de defeitos pontuais presente na rede de todos os materiais cristalinos, em maior ou menor grau. Pois, um arranjo ideal para materiais cristalinos não existe, já que todos eles possuem inúmeros defeitos ou imperfeições e, muitas das propriedades dos materiais são definidas pela presença das imperfeições ou defeitos na rede cristalina destes materiais, como por exemplo: a condutividade elétrica, o transporte difusional, as propriedades ópticas, entre outras (CALLISTER, 2002 e CHIANG, 1997).

Entenda-se por imperfeições ou defeitos cristalinos como sendo irregularidades na rede, apresentadas na ordem de um diâmetro atômico, que podem estar localizadas em uma ou mais dimensões da rede (CALLISTER, 2002).

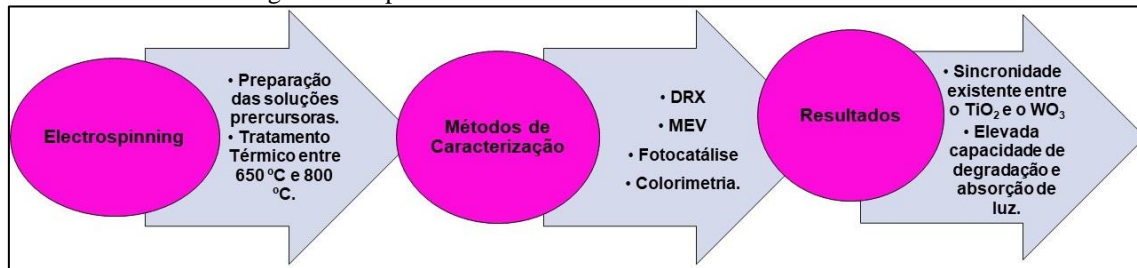
O foco deste trabalho são os defeitos pontuais, designados como mudanças no arranjo atômico perfeito: íons ausentes, íons substituídos, íons intersticiais, e, seus elétrons de valência relacionados. Defeitos pontuais surgem (em maior ou menor grau) em todos os materiais cristalinos. Os defeitos pontuais em sistemas cerâmicos podem ser formados por excitação térmica a alta temperatura, pela adição de solutos e impurezas, ou por processos de oxidação ou redução que causam uma variação na estequiometria metal/ânion do composto (CHIANG, 1997).

Sendo assim, neste trabalho avaliamos como os olhos humanos percebem as alterações de cor (fotocromismo), bem como a região de máxima absorbância e o comportamento fotocatalítico das fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 quando irradiadas com luz UVA-visível.

2 METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta um resumo esquemático das etapas envolvidas no desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 1: Etapas envolvidas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Própria autora, 2020.

2.1 ELECTROSPINNING

As fibras foram obtidas através do preparo de 2 soluções precursoras. A solução de TiO_2 foi obtida através da mistura de 2,5 mL de propóxido de titânio (TIP), 2,0 mL de ácido acético glacial e 5,0 mL de uma solução alcoólica contendo 10% em peso de polivinilpirrolidona (PVP). A solução de TiO_2/WO_3 foi preparada misturando os reagentes acima mencionados acrescida de 1 mL de peróxido de hidrogênio e 0,10 g de H_2WO_4 , que foram mantidos sob agitação magnética por 15 minutos. Em seguida, uma seringa de plástico foi carregada com 5 mL da solução precursora de TiO_2 ou de TiO_2/WO_3 que foi conectada a uma agulha de alimentação de aço inoxidável hipodérmica por uma fonte de alta tensão. A distância entre o tubo capilar e o coletor cilíndrico foi de 12 cm, a tensão foi de 13,5 kV com um fluxo de 1,8 mL /h. O coletor cilíndrico foi

recoberto com uma folha de alumínio para coletar as fibras produzidas a cada 30 minutos por um período de 4 horas. As fibras foram tratadas termicamente em um forno elétrico, tipo mufla da marca SANCHIS. As temperaturas aos quais as fibras foram tratadas foi de 650 °C, 700 °C, 750 °C ou 800 °C com patamar de 1 h e taxa de aquecimento de 1,4 C/min.

As Figuras 2 e 3 são fotografias das fibras de TiO₂ e de TiO₂/WO₃, respectivamente, sintetizadas por *electrospinning* após serem submetidas ao tratamento térmico a 800 °C.

Figura 2. Fotografia das fibras de TiO₂ após o tratamento térmico a 800 °C.



Fonte: Própria autora, 2020.

Figura 3. Fotografia das fibras de TiO_2/WO_3 após o tratamento térmico a $800\text{ }^\circ\text{C}$.



Fonte: Própria autora, 2020.

2.2 CARACTERIZAÇÃO

Utilizou-se um difratômetro PHILIPS com radiação $\text{CuK}\alpha$, com tensão de 40 kV e 40 mA, equipado com o software X'PERT HighScore, para identificar as fases presentes nas fibras. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV, JEOL 6060) equipado com EDS (espectroscopia de energia dispersiva), usado para avaliar a morfologia das fibras e identificar a presença de átomos de W, Ti e O nas amostras, dependendo da composição das fibras. O equipamento utilizado para medir a energia de *band gap* foi um espectrofotômetro de feixe duplo UV-vis- NIR (Cary 5000), com uma esfera integradora no modo de reflexão difusa de luz. Os valores da energia de *band gap* foram obtidos através da correlação de Kubelka e Munk. A colorimetria foi determinada por um espectrofotômetro (Konica-Minolta, CM 2600 d) equipado com um *software* que

registra as informações para definir o índice de cor com base no sistema Cie-La*b*. O equipamento possui uma esfera integrada a um filtro ultra-violeta. O iluminante utilizado foi D65, que corresponde a faixa espectral da luz do dia, e o observador utilizado foi o que corresponde a um campo de visão de 10°. O equipamento registra as informações para definir o índice de cor com base no sistema Cie-La*b*. Neste sistema, a cor é determinada conforme os valores positivos ou negativos das coordenadas a* (vermelho e verde) e b* (amarelo e azul). O L* define a luminescência variando entre 0 a 100%.

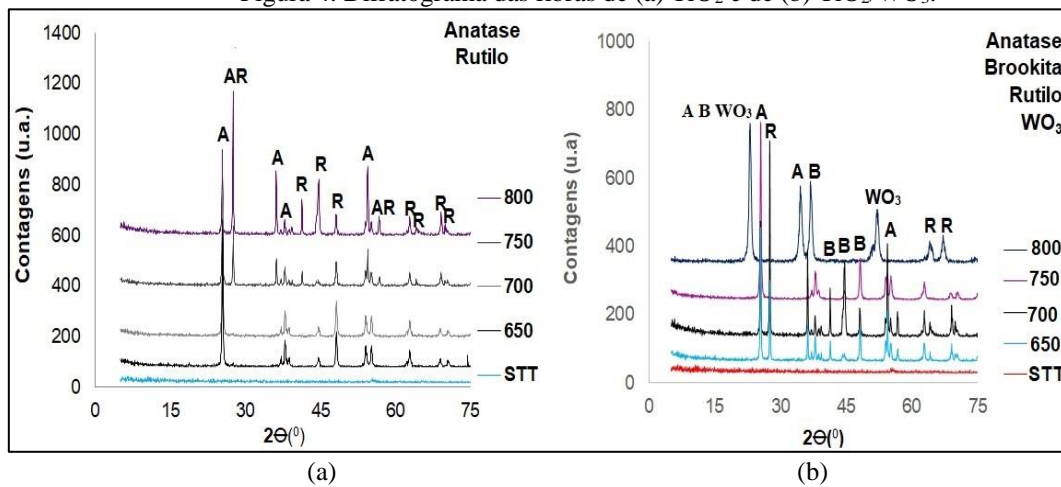
O desempenho fotocatalítico das fibras de TiO₂ e de TiO₂/WO₃ foi analisado através da alteração na concentração do corante alaranjado de metila, sob irradiação UVA. O processo de fotocatalise foi realizado em um reator fotocatalítico, de vidro *pyrex*, onde a radiação foi proporcionada por 12 lâmpadas negras UVA, de 8 W cada, modelo Flúor BLB T5 e da marca *Sadokin*. As lâmpadas estão dispostas em dois semi-cilindros, que possuem superfície interna refletora. Os outros componentes do reator fotocatalítico incluem; um agitador magnético, um sistema de aeração de ar comprimido e um banho termostático. Para a execução dos ensaios fotocatalíticos, as fibras de TiO₂ ou de TiO₂/WO₃ foram misturadas a 125 mL de uma solução contendo 20 ppm do corante alaranjado de metila. A mistura foi colocada em um ultrassom (Cole-Parmer CP-750), por 15 minutos. A solução foi então transferida para o reator fotocatalítico, sob constante agitação, e a temperatura de 30 °C. Fez-se borbulhar ar no período de exposição à luz UVA. Antes do início de cada ensaio, uma amostra de 4 mL desta solução foi coletada e definida como amostra inicial. Durante o ensaio, com sistema de luz UVA ligado, foram retiradas com uma seringa de plástico, alíquotas de 4 mL da solução, em intervalos de 15 minutos, filtradas em filtros de 0,2 µm e, colocadas em cubetas de polimetilmetacrilato (PMMA) para em seguida serem analisadas por espectrofotometria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 (a-b) apresenta o difratograma das fibras sintetizadas por *electrospinning*. As amostras antes do tratamento térmico apresentaram-se amorfas para todas as formulações. As fibras de TiO₂ (Figura 2a) tratadas até a temperatura de 700 °C apresentaram somente a presença da fase cristalina anatase (JCPDS 010782486), com o primeiro pico característico em aproximadamente $2\Theta = 25,271^\circ$. As fibras tratadas a partir de 750 °C apresentaram além da fase anatase, a fase rutilo (JCPDS 01-077-0442), com o primeiro pico característico em aproximadamente $2\Theta = 27,294^\circ$, resultado da ocorrência de uma transição de fases do TiO₂, previsto após o aumento da temperatura de

tratamento térmico (FELTRIN, 2013 e RAHIMI, 2016). Nas fibras de TiO_2/WO_3 (Figura 2b) tratadas até $650\text{ }^\circ\text{C}$ foram identificadas as fases anatase (JCPDS 01-078-2486) e brookita (JCPDS 01-075-1582) para TiO_2 com picos característicos em aproximadamente $2\theta = 25,271^\circ$ e $25,425^\circ$, respectivamente. As fibras tratadas a partir de $700\text{ }^\circ\text{C}$ apresentaram para o TiO_2 as fases anatase, brookita e rutilo (JCPDS 01-077-0442), com o primeiro pico característico em aproximadamente $2\theta = 27,294^\circ$. Para WO_3 a fase monoclinica (JCPDS 00-032-1393) apareceu em todas as temperaturas de tratamento térmico, com o primeiro pico característico a aproximadamente $2\theta = 23^\circ$.

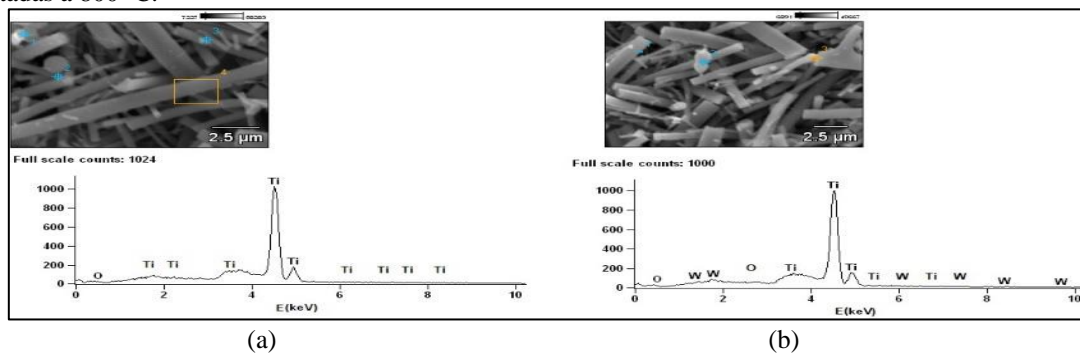
Figura 4. Difratograma das fibras de (a) TiO_2 e de (b) TiO_2/WO_3 .



Fonte: Própria autora, 2020.

A Figura 5 (a-b) apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 , tratadas termicamente a $800\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Pelas imagens, nota-se que as fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 aparentam morfologia similar, parecem ser constituídas de um aglomerado de partículas primárias, com forma alongada, contínua e sem uma orientação preferencial.

Figura 5. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras de (a) TiO_2 e de (b) TiO_2/WO_3 tratadas a $800\text{ }^\circ\text{C}$.



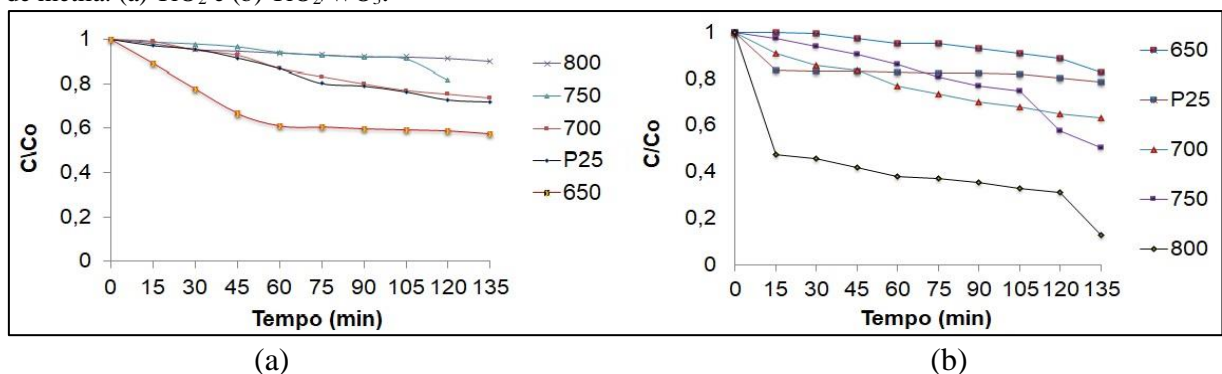
Fonte: Própria autora, 2020.

A Figura 6 (a-b) apresenta a atividade fotocatalítica das fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 na degradação do corante alaranjado de metila durante 135 minutos de exposição à luz UVA ($\lambda = 365 \text{ nm}$). Todas as fibras apresentaram atividade fotocatalítica. Para as fibras de TiO_2 , as mais fotoativas foram as que receberam tratamento térmico a $650 \text{ }^\circ\text{C}$, conseguiram degradar aproximadamente 40% do corante alaranjado de metila em 135 minutos de irradiação UVA. As fibras tratadas a $700 \text{ }^\circ\text{C}$ e o padrão P25 tiveram um comportamento similar, degradaram aproximadamente 30% do corante em 135 minutos de irradiação UVA. E as fibras tratadas a $750 \text{ }^\circ\text{C}$ e $800 \text{ }^\circ\text{C}$, degradaram aproximadamente 20% e 10%, respectivamente, do corante em 135 minutos de irradiação UVA.

Este decréscimo observado na fotoatividade das amostras é o resultado da formação da fase rutilo, que no caso das fibras surge a partir de tratamentos acima de $700 \text{ }^\circ\text{C}$. A forma rutilo é menos fotoativa do que a forma anatase e, por esta razão o seu aparecimento reduz a atividade fotocatalítica das fibras sintetizadas (FELTRIN, 2013, SILVA, 2020 e RAHIMI, 2016).

A presença de tungstênio nas amostras de TiO_2/WO_3 aumentou a atividade fotocatalítica das fibras tratadas a temperatura de $700 \text{ }^\circ\text{C}$, $750 \text{ }^\circ\text{C}$ e $800 \text{ }^\circ\text{C}$, para aproximadamente 36%, 50% e 90% de degradação, respectivamente. Tal efetividade se deve; a redução do *band gap* de 3,05 eV até 2,89 eV, inibição da recombinação do par elétron/lacuna $[(e^-)/(h^+)]$, que permitiu a transferência de cargas entre o TiO_2 e o WO_3 , e ao aumento na formação de defeitos pontuais (vacâncias de O_2). A elevação da temperatura de tratamento térmico possibilitou que as vacâncias de O_2 adquirissem a mobilidade necessária para passar para um estado desordenado na rede, aumentando a capacidade de degradação e a eficiência do processo (MUCCILLO, 2008; BHARTI, 2016 e OLIVEIRA, 2012).

Figura 6. Atividade fotocatalítica das fibras na degradação da concentração relativa do corante alaranjado de metila: (a) TiO_2 e (b) TiO_2/WO_3 .



Fonte: Própria autora, 2020.

Os resultados dos testes colorimétricos realizado no padrão P25 e nas fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 são apresentados na Tabela I. Os registros para cada amostra foram obtidos com base no sistema CIE- $L^*a^*b^*$ e, a faixa de medição abrangeu todo o espectro visível (400 a 700 nm). A Tabela I também apresenta os valores de luminescência (%L), ou seja, a quantidade de luz que é percebida em determinada cor. Se a luminescência (%L) for próxima de 0% representa a ausência total de luz refletida (preto) e se for próxima de 100% representa a reflexão total da luz (branco) (MINOLTA, 2007). **E os valores de ΔL^* , que informam a respeito das diferenças entre as tonalidades em mais claro ou escuro. Os valores positivos (+) de ΔL^* indicam a cor mais clara e os valores negativos (-) de ΔL^* indicam a cor mais escura.**

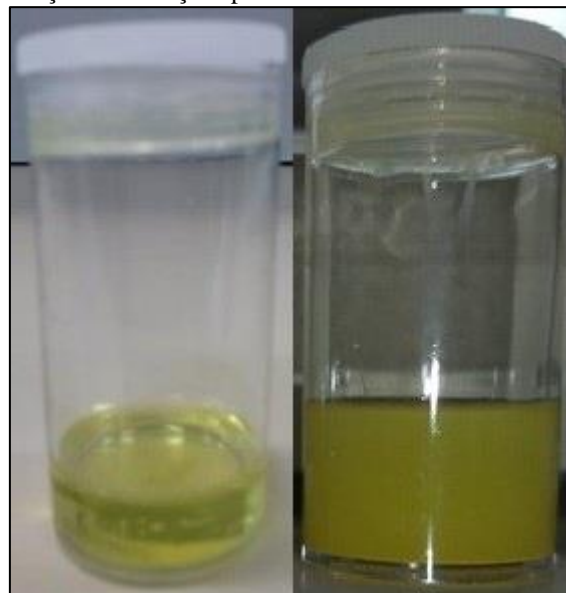
Assim, durante os testes colorimétricos o padrão P25 e as fibras de TiO_2 tiveram máxima absorvância na região da cor azul-escuro, influência dos valores positivos de a^* (cor vermelho) e negativos de b^* (cor azul). A tonalidade escura das amostras foi determinada com base nos valores negativos de ΔL^* . As fibras de TiO_2/WO_3 tiveram máxima absorvância na região da cor azul-claro, influência dos valores negativos de a^* (cor verde) e negativos de b^* (cor azul). A tonalidade clara das amostras foi determinada com base nos valores positivos de ΔL^* . A máxima absorvância na região da cor azul alcançada pelas fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 já era esperada, visto que ambas soluções precursoras (Figura 7) possuem coloração amarela, diferindo apenas na tonalidade. E, em análises colorimétricas o máximo de absorvância ocorre na região da coloração complementar e, neste caso a cor complementar ao amarelo é o azul.

Tanto o padrão P25 como as fibras de TiO_2 e de TiO_2/WO_3 tiveram uma boa quantidade de luz percebida, conforme os valores de luminescência (%L) demonstrados na Tabela I.

Tabela I. Resultados colorimétricos das amostras.

Amostras	a*	b*	Diferença de tonalidade (claro/escuro) ΔL^*	Cor absorvida	%L
Fibras TiO ₂ 650 °C	+ 1,47	- 12,51	- 35,99	Azul-escuro	83,33
Fibras TiO ₂ 700 °C	+ 3,29	- 2,68	- 57,43	Azul-escuro	61,42
Fibras TiO ₂ 750 °C	+ 7,16	- 10,44	- 24,32	Azul-escuro	92,14
Fibras TiO ₂ 800 °C	+ 4,14	- 8,21	- 42,86	Azul-escuro	86,76
Fibras TiO ₂ /WO ₃ 650 °C	- 3,13	- 1,45	+ 66,91	Azul-claro	59,73
Fibras TiO ₂ /WO ₃ 700 °C	- 4,42	- 10,37	+ 58,91	Azul-claro	96,26
Fibras TiO ₂ /WO ₃ 750 °C	- 3,48	- 11,46	+ 75,41	Azul-claro	84,69
Fibras TiO ₂ /WO ₃ 800 °C	- 5,18	- 5,99	+ 56,68	Azul-claro	85,47
Padrão TiO ₂ -P25	+ 6,45	- 2,23	- 32,21	Azul-escuro	83,13

Figura 7. Fotografia da coloração das soluções precursoras antes da síntese das fibras por *electrospinning*.



Fonte: Própria autora, 2020.

A capacidade dos olhos humanos para diferenciar as alterações de cor nas fibras foi determinada através dos valores obtidos pela associação da diferença de cor (ΔE) e a Norma DIN 6174, Tabela II (SILVA, 2007).

Tabela II. Norma DIN 6174.

Diferenças (ΔE^*ab)	Classificação
0,0 – 0,2	Imperceptível
0,2 – 0,5	Muito pequena
0,5 – 1,5	Pequena
1,5 – 3,0	Distinguível
3,0 – 6,0	Facilmente distinguível
Maior que 6,0	Muito grande

A diferença de cor (ΔE) mede a capacidade dos olhos humanos para diferenciar as alterações de cor entre os materiais. Esta informação visual apresentou-se distinguível para as fibras de TiO_2 e facilmente distinguível para as fibras de TiO_2/WO_3 . Estes resultados se basearam nos valores da diferença de cor (ΔE) apresentados na Tabela III. Os olhos humanos não conseguem distinguir diferenças de cor (ΔE) menores que 1.

Tabela III. Capacidade de percepção visual da cor pelos olhos humanos nas fibras sintetizadas.

Amostras	Percepção visual da cor	
	Diferença de cor ΔE^*_{ab}	Classificação
Fibras TiO_2 650 °C	2,32	Distinguível
Fibras TiO_2 700 °C	2,43	Distinguível
Fibras TiO_2 750 °C	2,89	Distinguível
Fibras TiO_2 800 °C	2,66	Distinguível
Fibras TiO_2/WO_3 650 °C	3,79	Facilmente distinguível
Fibras TiO_2/WO_3 700 °C	3,22	Facilmente distinguível
Fibras TiO_2/WO_3 750 °C	3,51	Facilmente distinguível
Fibras TiO_2/WO_3 800 °C	3,59	Facilmente distinguível
Padrão P25	1,98	Distinguível

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as fibras sintetizadas quando da sua utilização em colorimetria e fotocatalise, é devido a sincronicidade existente entre as propriedades químicas e físicas dos óxidos de titânio e tungstênio, e pela ocorrência de fenômenos semelhantes. Em ambos os eventos a luz irradiada, a energia de *band gap*, o comprimento de onda, e a formação de defeitos (Vacâncias de O_2) foram essenciais tanto para a percepção visual das diferentes cores quanto para a fotoatividade na degradação do corante alaranjado de metila. Todas as fibras puderam ser utilizadas como fotocatalisadores e nos testes colorimétricos. Mesmo as fibras de TiO_2 tratadas em temperaturas mais elevadas (750 °C e 800 °C) que tiveram baixa fotoatividade, apresentaram capacidade de degradar o corante alaranjado de metila e absorver cor. A presença de tungstênio aumentou a eficiência fotocatalítica dos materiais, inibiu da recombinação do par elétron/lacuna [$(e^-)/(h^+)$], permitindo a transferência de cargas entre o TiO_2 e o WO_3 . A elevação da temperatura de tratamento térmico possibilitou que as vacâncias de O_2 adquirissem a mobilidade necessária para passar para um estado desordenado na rede, aumentando a capacidade de degradação e absorção de luz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- Bharti, B.; Kumar, S.; Lee, H.N.; Rajesh, K.; Formation of oxygen vacancies and Ti^{3+} state in TiO_2 thin film and enhanced optical properties by air plasma treatment, **Scientific Reports**, 2016, pp.1-12.
- Callister, William D.Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**, Rio de Janeiro: LTC, 5ª edição, 2002, 589p.
- Chiang, Y.M.; Birnie III, D., Kingery, W.D. **Physical Ceramics. Principles for Ceramics Science and Engineering**, by John Wiley & Sons, Inc, 1997, 513p.
- Coelho, E. C. de S. **Síntese, caracterização e propriedades fotocromáticas de sais derivados do ácido N (3,5 - dinitrobenzoil) - α - fenilglicina**. 2008. 78p. Dissertação de Mestrado (Centro de Ciências Exatas e da Natureza- Departamento de Química Fundamental) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Feltrin, J, Sartor, M.N.A.; De Noni; A.M.; Bernardin, A.M.; Hotza, D.; Labrincha, J.A.; Superfícies fotocatalíticas de titânia em substratos cerâmicos. Parte I: Síntese, estrutura e fotoatividade, **Cerâmica**, 2013, v.59, pp.620-632.
- Galvão, J. R.; Scarminio, J. Fotocromismo em filmes finos de óxidos de tungstênio de diferentes composições, **Química Nova**, 26 (2003) 488-492.
- Gonçalves, A. M. F, **Desenvolvimento de Tintas Fotocromáticas para Aplicação em Embalagens Inteligentes**. 2013, 82p. Dissertação de Mestrado (Faculdade de Ciências e Tecnologia) - Universidade Nova de Lisboa.
- Minolta, K.; **Precise color communication: color control from feeling to instrumentation**, Osaka, Japan (2007) p.62.
- Muccillo, E. N.S., Condutores de íons oxigênio - uma breve revisão, **Cerâmica**, 2008, v.54, pp.129-144.
- Oliveira, H.G., **Eletrodos porosos contendo TiO_2 e WO_3 : propriedades eletroquímicas e atividade fotocatalítica para remoção do corante rodamina 6G e do hormônio 17 α -etinilestradiol em solução aquosa**. 2012. 188p. Doutorado. (Tese de doutorado em Ciências) Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas SP/Campinas.
- Rahimi, N.; Pax, R.A.; Mac, E.G.; Review of functional titanium oxides. I: TiO_2 and its modifications, **Progress in Solid State Chemistry**, 2016, v.44, pp. 86-105.
- Silva, L. G. S, Alves, A. K., Obtenção, caracterização e utilização de fibras nanoestruturadas de TiO_2 dopadas com tungstênio como fotocatalisadores, **Brazilian Applied Science Review**, 2020, v.4, n.6, pp.3692-3703.
- Silva, R.A.; Petter, C.O.; Schneider, I.A.H.; Color loss evaluation of artificially stained agates. **REM: Revista Escola de Minas**, 2007, v.60, pp.477-482.
- Sobrinho, J. A. **Fotocromismo e Luminescência de Compostos a Base de Tungstênio e Íons Terras Raras Trivalentes Via Síntese Hidrotérmica**. 2015, 148p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Química) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara.