

**TRATAMENTO DAS EMISSÕES DE ACETONITRILA SOBRE  
CATALISADORES (Cu, Co ou Fe)-ZSM-5**  
**TRATAMIENTO DE EMISIONES DE ACETONITRILLO EN CATALIZADORES  
(Cu, Co o Fe) -ZSM-5**  
**TREATMENT OF ACETONITRILE EMISSIONS ON (Cu, Co or Fe)-ZSM-5  
CATALYSTS**

Bruna Carla Santos Silveira\*  
brunacarlasantossilveira@gmail.com

Marcelo da Silva Batista\*  
marcelobatista@ufs.br

---

\*Universidade Federal de São João del Rei, Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, MG, Brasil

## **Resumo**

A oxidação catalítica seletiva de acetonitrila (OCS-ACN) tem se destacado como uma alternativa mais eficiente que a combustão tradicional em altas temperaturas usada no tratamento de acetonitrila gasosa. Nesse trabalho foi estudada a oxidação de acetonitrila utilizando catalisadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5. Esses catalisadores foram preparados por trocas iônicas e caracterizados por Difractometria de Raios X (DRX) e Redução com Hidrogênio a Temperatura Programada (TPR-H<sub>2</sub>). Os resultados evidenciaram a presença de óxidos nos catalisadores (Cu e Fe)-ZSM-5. Os catalisadores (Cu e Fe)-ZSM-5 foram reduzidos em mais de uma etapa, enquanto a ausência de picos de redução em Co-ZSM-5 indicou que o cobalto está predominantemente em posição de intercâmbio. Na OCS-ACN foi observada a seguinte ordem de atividade Cu-ZSM-5 > Fe-ZSM-5 > Co-ZSM-5. Cu-ZSM-5 foi o catalisador mais ativo e altamente seletivo a N<sub>2</sub> entre 350-500 °C.

**Palavras-chave:** oxidação, acetonitrila, catalisador, Cu-ZSM-5.

## **RESUMEN**

La oxidación catalítica selectiva de acetonitrilo (OCS-ACN) se ha destacado como una alternativa más eficiente que la combustión tradicional a altas temperaturas utilizada en el tratamiento de acetonitrilo gaseoso. En este trabajo se estudió la oxidación del acetonitrilo utilizando catalizadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 y Co-ZSM-5. Estos catalizadores fueron preparados por intercambios iónicos y caracterizados por Difractometría de Rayos X (DRX) y Reducción con Hidrógeno a Temperatura Programada (TPR-H<sub>2</sub>). Los resultados mostraron la presencia de óxidos en los catalizadores (Cu y Fe)-ZSM-5. Los catalizadores (Cu y Fe)-ZSM-5 se redujeron en más de un paso, mientras que la ausencia de picos de reducción en Co-ZSM-5 indicó que el cobalto está predominantemente en la posición de intercambio. En OCS-ACN se observó el siguiente orden de actividad Cu-ZSM-5 > Fe-ZSM-5 > Co-ZSM-5.

Cu-ZSM-5 fue el catalizador más activo y altamente selectivo en N<sub>2</sub> en el intervalo 350-500 °C.

**Palabras clave:** oxidación, acetonitrilo, catalizador, Cu-ZSM-5.

## **ABSTRACT**

Selective catalytic oxidation of acetonitrile (SCO-ACN) has stood out as a more efficient alternative than traditional combustion at high temperatures used in the treatment of gas acetonitrile. In this work the acetonitrile oxidation was studied using Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 and Co-ZSM-5 catalysts. These catalysts were prepared by ionic exchange and characterized by X-Ray Diffractometry (XRD) and Temperature Programmed Reduction by Hydrogen (TPR-H<sub>2</sub>). The results showed the presence of oxides in the (Cu and Fe)-ZSM-5 catalysts. (Cu and Fe)-ZSM-5 catalysts were reduced in more than one step, while the absence of reduction peaks in Co-ZSM-5 indicated that cobalt is predominantly in interchange position. In SCO-ACN the following order of activity was observed Cu-ZSM-5 > Fe-ZSM-5 > Co-ZSM-5. Cu-ZSM-5 was the catalyst most active and highly N<sub>2</sub> selective at 350-500 °C.

**Keywords:** oxidation, acetonitrile, catalysts, Cu-ZSM-5.

---

## **1. INTRODUÇÃO**

As emissões de poluentes atmosféricos têm sido alvo de diversos estudos devido ao seu impacto ambiental. Dentre os poluentes, as organonitrilas associadas a gases de exaustão têm despertado um crescente interesse por seu potencial tóxico (MUÑOZ et al., 2005). Em particular, a acetonitrila ou cianeto de metila (CH<sub>3</sub>CN) é um composto químico nitrogenado presente, principalmente, em emissões de gases de exaustão no processo de produção de acrilonitrila. A acetonitrila é classificada como um composto orgânico volátil (COV) que pode levar a sérios problemas ambientais, além de apresentar potencial carcinogênico aos seres humanos e, portanto, demanda tratamento adequado (BRACHT, 2011; KAMAL; RAZZAK; HOSSAIN, 2016).

A combustão térmica de acetonitrila é o método mais usado no tratamento desse poluente. No entanto, requer altas temperaturas de operação, entre 800-1200 °C, que se traduzem em alta demanda de energia. Além disso, esse processo de combustão térmica leva a formação de produtos nitrogenados (NO<sub>x</sub>) que são responsáveis pela poluição secundária (ZHANG et al., 2014; LIU et al., 2019). Como alternativa, a oxidação catalítica seletiva de acetonitrila (OCS-ACN) visa reduzir a energia de ativação e a temperatura de reação. Além

disso, a OCS-ACN pode aumentar a seletividade a  $N_2$  e  $CO_2$  e, conseqüentemente, reduzir a emissão de poluentes secundários (XING et al., 2020). Para isso, a escolha do catalisador é o ponto fundamental na OCS-ACN.

As zeólitas têm se destacado como catalisadores devido as suas características intrínsecas como: atividade, seletividade, área específica, tamanho de poro, possibilidade de troca iônica com metais, entre outras (LIMA et al., 2019). Dentre elas, a zeólita ZSM-5 se destaca devido à sua estrutura tridimensional de poros e sua alta estabilidade térmica (LEE et al., 2018). O uso de metais de transição, como cobre, ferro e cobalto, tem mostrado resultados promissores para o tratamento de emissões de organonitrilas (SCHMAL, 2011; ZHANG et al., 2015). Liu et al. (2019) estudaram a combustão catalítica de acrilonitrila sobre Cu-(ZSM-5, Beta, MCM-22, MCM-49 e Y) e observaram que a redução da razão  $SiO_2/Al_2O_3$  poderia aumentar a capacidade de troca iônica e, conseqüentemente, melhorar o comportamento catalítico da zeólita. Dentre os catalisadores, a maior atividade de Cu-ZSM-5 foi associada à capacidade redox de  $Cu^{2+}/Cu^+$ . Xing et al. (2020) destacaram que o tipo de zeólita e o metal utilizados são fatores que impactam significativamente nas propriedades redox dos catalisadores afetando as espécies formadas na reação de oxidação.

Esse trabalho avaliou o comportamento catalítico dos metais de transição cobre, cobalto e ferro trocados na zeólita ZSM-5, visando identificar o catalisador mais ativo e seletivo para o tratamento de emissões de acetonitrila.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Preparação dos catalisadores

Os catalisadores foram preparados por três trocas iônicas consecutivas, utilizando soluções de 0,1 ( $mol L^{-1}$ ) de nitrato de cobre II, nitrato de cobalto II e nitrato de ferro III em uma relação solução/massa de zeólita de 50 mL  $g^{-1}$ . As trocas iônicas ocorreram à temperatura ambiente com agitação durante 12 h. Após cada troca, a suspensão foi filtrada e seca em estufa a 110 °C. Esse procedimento foi realizado três vezes para cada catalisador. Após a preparação, as amostras foram submetidas à calcinação em mufla a 650 °C por 2 h.

## 2.2 Caracterização dos catalisadores

Os catalisadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5 foram caracterizados por Difractometria de Raios X (DRX) e Redução com Hidrogênio à Temperatura Programada (TPR-H<sub>2</sub>). Na análise de DRX foi utilizado o método do pó em um difratômetro Rigaku (Miniflex 600) operando com radiação CuK $\alpha$ , tensão de 40 KV e corrente de 15 mA. A velocidade do goniômetro foi de 2° (2 $\theta$ ) min<sup>-1</sup> e variação do ângulo na faixa de 5° a 80°(2 $\theta$ ). As estruturas foram identificadas por comparação dos difratogramas com o banco de dados do X'Pert HighScore. As análises de Redução com Hidrogênio a Temperatura Programada (TPR-H<sub>2</sub>) foram realizadas em um equipamento SAMP3 (Termolab equipamentos Ltda.). A amostra foi acondicionada em leito de lã de quartzo, em reator tipo “U”, onde passou um fluxo de 30 mL min<sup>-1</sup> da mistura de 2% H<sub>2</sub> em argônio. A amostra foi aquecida da temperatura ambiente até 1000 °C.

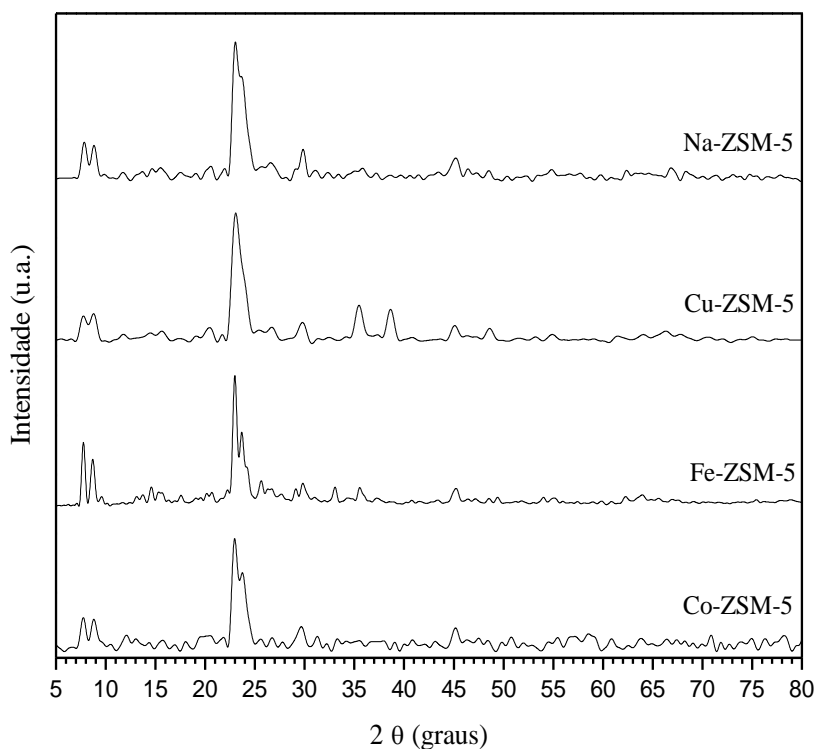
## 2.3 Avaliação catalítica

A oxidação catalítica seletiva de acetonitrila foi realizada em um equipamento SAMP3 (Termolab equipamentos Ltda.), em um reator de quartzo tipo “U” (h=150 mm e Ø=10 mm). As amostras de catalisador contendo 8,6 mg de metal foram depositadas sobre um leito de lã de quartzo e a reação ocorreu em fase gasosa. O reator foi operado a pressão atmosférica e a temperatura da reação foi variada de 100 até 600 °C. Na alimentação do reator foi utilizado um fluxo contínuo de 40 mL min<sup>-1</sup> de uma mistura gasosa contendo 2,8% de CH<sub>3</sub>CN em ar sintético. A saída do reator foi acoplada em linha a um espectrômetro de massas modelo Thermo Star GSD 320 T (Pfeiffer Vacuum). A conversão de CH<sub>3</sub>CN foi calculada através da Equação 1, onde: CH<sub>3</sub>CN(entra) é a corrente de acetonitrila na entrada do reator e CH<sub>3</sub>CN(sai) é a corrente de acetonitrila na saída do reator.

$$\text{Conversão (\%)} = \left( \frac{CH_3CN_{entra} - CH_3CN_{sai}}{CH_3CN_{entra}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

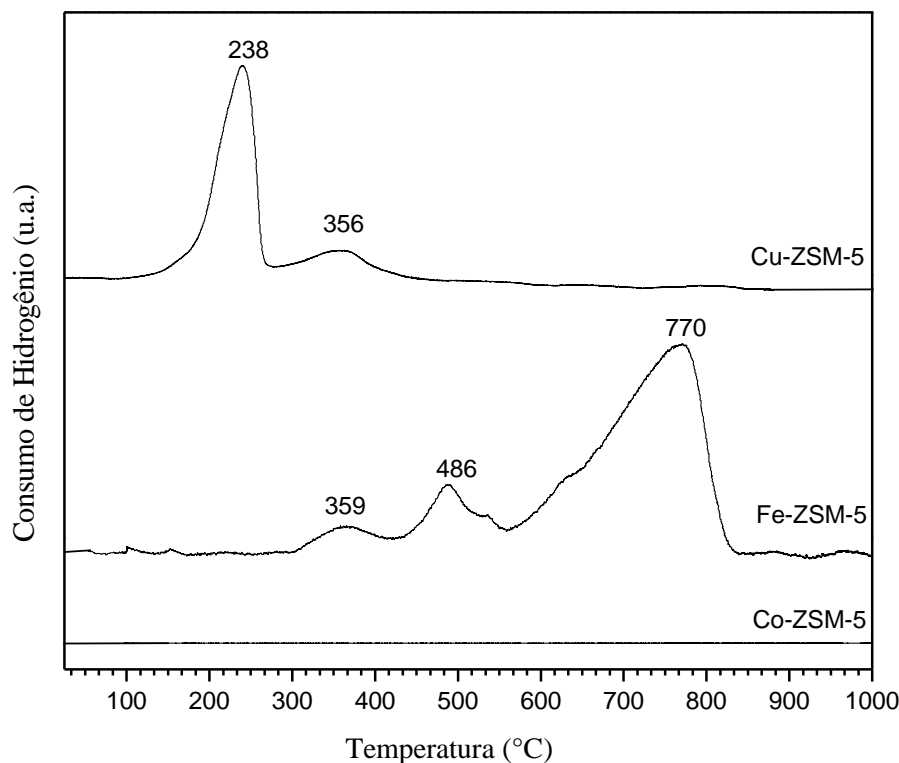
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os resultados de difratometria de raios X (DRX) dos catalisadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5. Nessa figura pode-se observar que a estrutura da zeólita ZSM-5 com picos característicos em  $2\theta = 7,8^\circ, 8,9^\circ, 23,1^\circ, 23,8^\circ$  (PDF n° 37-0359) foi preservada após a preparação dos catalisadores. Além dos picos da zeólita ZSM-5, o catalisador Cu-ZSM-5 apresentou picos característicos de CuO em  $2\theta = 35,6^\circ, 38,9^\circ$  e  $48,7^\circ$  (PDF 41-0254), indicando uma possível precipitação de hidróxido de cobre durante o processo de troca iônica (CHEN et al., 2018). De maneira semelhante, Fe-ZSM-5 apresentou também picos atribuídos ao  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (PDF 01-1053) em  $2\theta = 33,2^\circ, 35,6^\circ, 49,5^\circ, 54,1^\circ, 62,5^\circ, 64,1^\circ$  (LI et al., 2018). Por outro lado, Co-ZSM-5 apresentou apenas os picos característicos da zeólita ZSM-5, indicando que o cobalto não está depositado na forma de óxido. Isso ocorreu devido à precipitação de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ( $\text{KPS}=2,79 \times 10^{-39}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) e  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ( $\text{KPS}=1 \times 10^{-19,7}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) serem termodinamicamente mais favorecidas que a de  $\text{Co}(\text{OH})_2$  ( $\text{KPS}=5,92 \times 10^{-15}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) (AZIZ et al., 2018; JIANG et al., 2017; AMAKI; SAHRAEI, 2016; TAVARES; ANGIOLETTO, 2019).



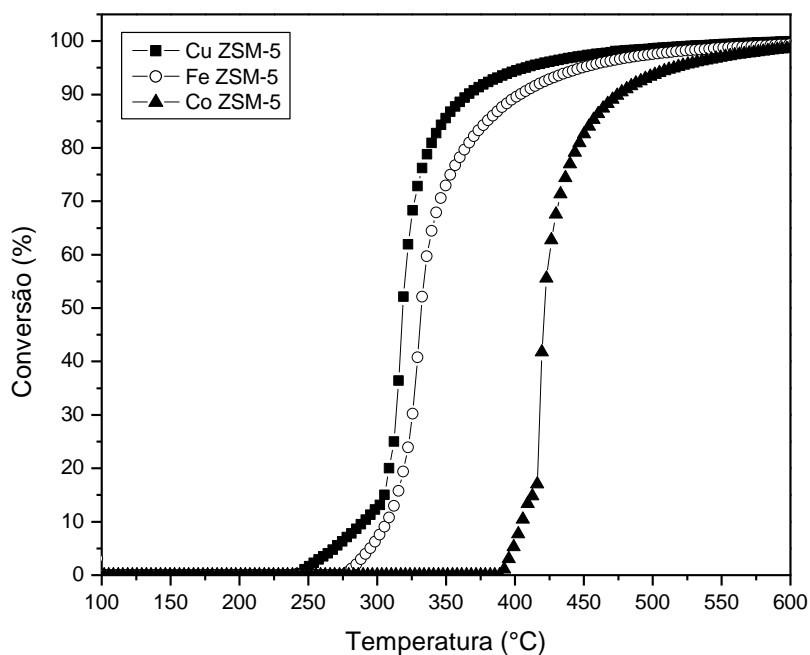
**Figura 1.** Difratograma de amostras de (Na, Cu, Fe, Co)-ZSM-5.

Os perfis de redução com hidrogênio à temperatura programada dos catalisadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5 são mostrados na Figura 2. Note que Cu-ZSM-5 apresenta picos de redução em 238 °C e 356 °C, mostrando que a redução ocorreu em duas etapas. O pico em 238 °C foi atribuído à redução de  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^+$  intercambiado na ZSM-5 e, também, a redução de nanopartículas de  $\text{CuO} \rightarrow \text{Cu}^0$ . Enquanto o pico em 356 °C foi atribuído à redução sucessiva de  $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu}^0$  (PANAHI et al., 2017). O catalisador Fe-ZSM-5 apresenta três bandas de redução. A primeira entre 300-400 °C foi associada à redução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , entre 450-550 °C foi atribuída à redução de  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  em sítios de intercâmbio na zeólita ZSM-5 e, o pico em 770 °C foi associado à redução de  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}^0$  (YANG et al., 2019; SÁEZ et al., 2016; FENG et al., 2016). No perfil de TPR- $\text{H}_2$  do catalisador Co-ZSM-5 não foram observados picos de redução. Esse comportamento é condizente com as análises de DRX que mostraram a ausência de picos característicos de óxido de cobalto. De acordo com WANG et al. (2015), acredita-se que espécies de  $\text{Fe}^{2+}$  em posição de intercâmbio iônico estão sob forte interação com a estrutura da zeólita ZSM-5 e não se reduzem em temperaturas menores que 1000 °C.



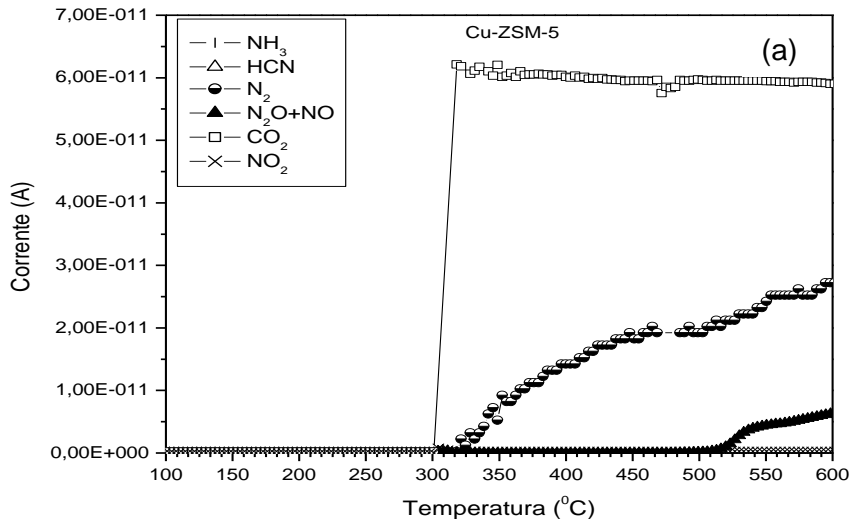
**Figura 2.** Perfis de TPR- $\text{H}_2$  dos catalisadores de (Cu, Fe e Co)-ZSM-5.

A Figura 3 mostra os resultados de conversão de acetonitrila em função da temperatura, sobre os catalisadores (Cu, Fe, Co)-ZSM-5. A conversão apresenta um rápido aumento seguido de suave aumento com o decorrer do tempo de reação. Nota-se que o perfil de conversão da acetonitrila é muito semelhante para todos os catalisadores. Ao analisar as temperaturas de início de conversão para cada catalisador é possível estabelecer uma ordem decrescente de atividade: Cu-ZSM-5 > Fe-ZSM-5 > Co-ZSM-5. Co-ZSM-5 inicia a conversão de acetonitrila em 393 °C e mostra a menor atividade entre os catalisadores estudados. As análises de DRX e TPR não identificaram a presença de óxido nem redutibilidade em Co-ZSM-5. Esses fatores podem estar relacionados com a sua menor atividade. Fe-ZSM-5 iniciou sua conversão a 282 °C e sua curva de conversão mostra perfil semelhante ao do catalisador Cu-ZSM-5. A comparação entre esses dois catalisadores evidencia que a temperatura de início de conversão para Fe-ZSM-5 (282 °C) foi ligeiramente superior à de Cu-ZSM-5 (250 °C). Portanto, Cu-ZSM-5 foi o catalisador mais ativo. Sua conversão apresenta um rápido aumento, sendo observado aproximadamente 52% de conversão em 320 °C. Considerando a proporção de áreas sob os picos da Fig. 2, os resultados da caracterização por TPR-H<sub>2</sub> indicam que 59% das espécies de cobre, ou seja, sua maioria, estão como nanopartículas de CuO.

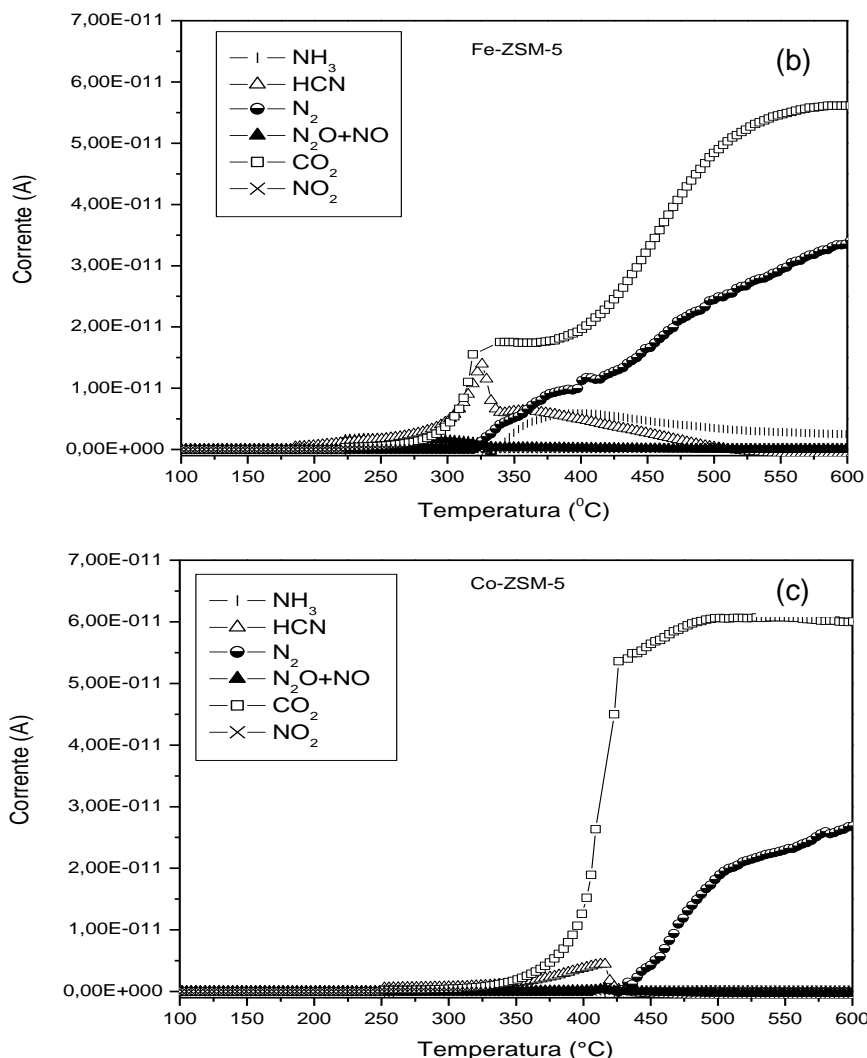


**Figura 3.** Conversão de acetonitrila sobre catalisadores Cu-ZSM-5, Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5.

A Figura 4 apresenta as correntes de produtos formados sobre os catalisadores (Cu, Fe, Co)-ZSM-5. Na OCS-ACN foram identificados os compostos:  $\text{NH}_3$ , HCN,  $\text{NO}_2$ , NO,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ . Na Figura 4a, Cu-ZSM-5 mostra um rápido aumento na formação de  $\text{CO}_2$  em 300 °C, seguido da formação de  $\text{N}_2$  em 325 °C, o que é condizente com a desejada oxidação seletiva da acetonitrila. No entanto, em temperaturas superiores a 520 °C nota-se a formação de produtos nitrogenados indesejados ( $\text{N}_2\text{O} + \text{NO}$ ). Na Figura 4b, note que Fe-ZSM-5 levou a formação de HCN, um intermediário da oxidação de acetonitrila (KARAKAS; SEVINC, 2019). Com o decréscimo de HCN se observa a formação de nitrogênio e amônia. Note que o aumento de temperatura favorece o consumo de HCN e  $\text{NH}_3$  e, também, o aumento da formação de  $\text{N}_2$ . Na oxidação de acetonitrila sobre Co-ZSM-5 foi observada a formação de HCN entre 350-450 °C, mas não foi observada a formação de  $\text{NH}_3$  (Figura 4c). No entanto, em temperaturas superiores a 450 °C foi observado somente  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ . Esses resultados mostram que a oxidação de acetonitrila sobre Fe-ZSM-5 ocorre por uma via catalítica diferente de (Co e Cu)-ZSM-5, na qual HCN e/ou  $\text{NH}_3$  atuam como intermediários da reação (LIU et al., 2017).







**Figura 4.** Correntes de produtos  $\text{NH}_3$  (|),  $\text{HCN}$  ( $\Delta$ ),  $\text{N}_2$  ( $\bullet$ ),  $\text{N}_2\text{O} + \text{NO}$  ( $\blacktriangle$ ),  $\text{CO}_2$  ( $\square$ ) e  $\text{NO}_2$  ( $\times$ ) formados sobre os catalisadores: Cu-ZSM-5 (a); Fe-ZSM-5 (b) e Co-ZSM-5 (c).

Os mecanismos de reação estão relacionados com as características físico-químicas das espécies metálicas em cada catalisador (LIU et al., 2017). Dessa forma, catalisadores preparados com cobre e cobalto tenderiam a reagir por oxidação, enquanto aqueles preparados com ferro reagiriam por hidrólise, o que justificaria as diferenças no comportamento dos catalisadores durante a reação. Analisando os resultados da avaliação catalítica é possível notar que Co-ZSM-5 não levou a formação de  $\text{NH}_3$ , mas esse catalisador mostrou menor atividade que (Fe e Cu)-ZSM-5. Fe-ZSM-5 possui atividade catalítica próxima a do próprio Cu-ZSM-5, no entanto a grande formação de  $\text{HCN}$  e de  $\text{NH}_3$  como subprodutos tornam sua utilização pouco interessante. Cu-ZSM-5 foi o catalisador mais adequado, uma vez que apresentou maior

atividade e boa formação de produtos de interesse associado ao menor risco entre 350-500 °C.

#### 4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados foi inferido que nos catalisadores (Cu e Fe)-ZSM-5 existem espécies em intercâmbio iônico e óxidos, enquanto que no catalisador Co-ZSM-5 o cobalto encontra-se em posição de intercâmbio. O uso de catalisador reduziu a temperatura da reação de oxidação de ACN comparada com a combustão térmica tradicional. A ordem de atividade na oxidação de acetonitrila foi Cu-ZSM-5 > Fe-ZSM-5 > Co-ZSM-5. Fe-ZSM-5 e Co-ZSM-5 levaram a formação de HCN e, NH<sub>3</sub> foi observado somente sobre Fe-ZSM-5. O aumento de temperatura favoreceu o decréscimo de HCN e NH<sub>3</sub> e o aumento da formação de N<sub>2</sub>. Cu-ZSM-5 foi o catalisador mais ativo e altamente seletivo a N<sub>2</sub> entre 350-500 °C.

#### Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São João Del Rei.

#### REFERÊNCIAS

AMAKI, E.; SAHRAEI, R. Preparation, characterization and optical properties of nanostructured undoped and Cu doped ZnO thin films. **Bulgarian Chemical Communications** v. 48, p. 131-137, 2016.

AZIZ, A.; SAJJAD, M.; KIM, M.; KIM, K.S. An efficient Co-ZSM-5 catalyst for the abatement of volatile organics in air: effect of the synthesis protocol. **International journal of environmental science and technology** v. 15(4), p. 707-718, 2018.

BRACHT, F. Acetonitrila (CAS No. 75-05-8). **Revista Virtual de Química** v. 3(1), p. 51-52, 2011.

CHEN, M.; WANG, Y.; LIANG, T.; YANG, Z. Hydrogen production by steam reforming of bio-oil aqueous fraction over Co-Fe/ZSM-5. **In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** v. 113(1) 012081, p. 1-7, 2018. doi:10.1088/1755-1315/113/1/012081

FENG, B.; WANG, Z.; SUN, Y.; ZHANG, C.; TANG, S.; LI, X.; HUANG, X. Size controlled ZSM-5 on the structure and performance of Fe catalyst in the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub>. **Catalysis Communications** v. 80, p. 20-23, 2016.

JIANG, L.; SUI, Y.; QI, J.; CHANG, Y.; HE, Y.; MENG, Q.; WEI F.; SUN Z.; JIN, Y. Structure dependence of Fe-Co hydroxides on Fe/Co ratio and their application for supercapacitors. **Particle & Particle Systems Characterization** v. 34(2) 1600239, p.1-8, 2017. DOI: 10.1002/ppsc.201600239

KAMAL, M.S.; RAZZAK, S.A.; HOSSAIN, M.M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)—A review. **Atmospheric Environment** v. 140, p. 117-134, 2016.

KARAKAS, G.; SEVINC, A. Catalytic oxidation of nitrogen containing compounds for nitrogen determination. **Catalysis Today** v. 323, p. 159-165, 2019.

LEE, T.; KO, S.H.; CHO, S.J.; RYOO, R. Ultramicroporous carbon synthesis using lithium-ion effect in ZSM-5 zeolite template. **Chemistry of Materials** v. 30(18), p. 6513-6520, 2018.

LI, T.; FENG, H.; WANG, Y.; WANG, C.; ZHU, W.; YUAN, L.; ZHOU, G. Formation of modulated structures induced by oxygen vacancies in  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires. **Journal of Crystal Growth** v. 498, p. 10-16, 2018.

LIMA C.G.S.; MOREIRA, N.M.; PAIXÃO, M.W.; CORREA, A.G. Heterogeneous green catalysis: Application of zeolites on multicomponent reactions. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry** v. 15, p. 7-12, 2019.

LIU, M.; ZHAO, Y.; ZHAO, H.; LI, X.; MA, Y.; YONG, X.; CHEN, H.; LI, Y. The promotion effect of nickel and lanthanum on Cu-ZSM-5 catalyst in NO direct decomposition. **Catalysis Today** v. 327, p. 203-209, 2019.

LIU, N.; YUAN, X.; ZHANG, R.; LI, Y.; CHEN, B. Mechanistic insight into selective catalytic combustion of HCN over Cu-BEA: Influence of different active center structures. **Physical Chemistry** v. 19(35), p. 23960-23970, 2017.

MUÑOZ, R.; JACINTO, M.; GUIEYSSE, B.; MATTIASSON, B. Combined carbon and nitrogen removal from acetonitrile using algal–bacterial bioreactors. **Applied microbiology and biotechnology** v. 67(5), p. 699-707, 2005.

PANAHI, P.N.; SALARI, D.; TSENG, H.H.; NIAEI, A.; MOUSAVI, S.M. Effect of the preparation method on activity of Cu-ZSM-5 nanocatalyst for the selective reduction of NO by NH<sub>3</sub>. **Environmental technology** v. 38(15), p. 1852-1861, 2017.

SÁEZ, M.R.; DIVAKAR, D.; ARANZABAL, A.; GONZÁLEZ-VELASCO, J.R.; GONZÁLEZ-MARCOS, J.A. Catalytic oxidation of trichloroethylene over Fe-ZSM-5: Influence of the preparation method on the iron species and the catalytic behavior. **Applied Catalysis B: Environmental** v. 180, p. 210-218, 2016.

SCHMAL, M. **Catálise Heterogênea**. Editora Synergia, 2011.

TAVARES, H.D.; ANGIOLETTO, E. Síntese e estudo de propriedades catalíticas do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtido do tratamento da drenagem ácida de mineração, em processos oxidativos avançados. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Química, **Universidade do Extremo Sul Catarinense**, 2019.

WANG, Y.; ZHAO, W.; LI, Z.; WANG, H.; WU, J.; LI, M.; HU, Z.; WANG, Y.; HUANG, J.; ZHAO, Y. Application of mesoporous ZSM-5 as a support for Fischer–Tropsch cobalt catalysts. **Journal of Porous Materials** v. 22(2), p. 339-345, 2015.

XING, X.; LI, N.; SUN, Y.; WANG, G.; CHENG, J.; HAO, Z. Selective catalytic oxidation of n-butylamine over Cu-zeolite catalysts. **Catalysis Today** v. 339, p. 192-199, 2020.

YANG, M.; SHAO, J.; YANG, Z.; YANG, H.; WANG, X.; WU, Z.; CHEN, H. Conversion of lignin into light olefins and aromatics over Fe/ZSM-5 catalytic fast pyrolysis: Significance of Fe contents and temperature. **Journal of analytical and applied pyrolysis** v. 137, p. 259-265, 2019.

ZHANG, R.; SHI, D.; LIU, N.; CAO, Y.; CHEN, B. Mesoporous SBA-15 promoted by 3d-transition and noble metals for catalytic combustion of acetonitrile. **Applied Catalysis B: Environmental** v. 146, p. 79-93, 2014.

ZHANG, R.; SHI, D.; LIU, N.; CHEN, B.; WU, L.; WU, L.; YANG, W. Catalytic purification of acrylonitrile-containing exhaust gases from petrochemical industry by metal-doped mesoporous zeolites. **Catalysis Today** v. 258, p. 17-27, 2015.

Recebido em: 16/04/2020

Aceito em: 29/06/2020

Endereço para correspondência:  
Nome Marcelo da Silva Batista  
Email marcelobatista@ufsj.edu.br



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)