

Estudos sobre os efeitos sinérgicos entre liga-suporte para catalisadores de Ni₅Ga₃ suportados em óxidos na hidrogenação do CO₂ a metanol

Letícia F. Rasteiro^{1*}, Luiz H. Vieira², José M. Assaf² e Elisabete M. Assaf¹

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13560-970 São Carlos, SP, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, Rod. Washington Luiz, km 235, 13565-905 São Carlos, SP, Brasil

Resumo/Abstract

RESUMO - As ligas Ni-Ga suportadas têm se mostrado como potenciais catalisadores na conversão de CO₂ em metanol em condições amenas. No entanto, o desempenho dessas ligas depende da otimização dos efeitos da interação entre a liga e o suporte, o que ainda não está completamente compreendido. Neste estudo, examinamos como a sinergia entre a liga Ni₅Ga₃ e os suportes SiO₂, CeO₂ e ZrO₂ influencia no desempenho catalítico. Para isso, utilizamos uma combinação de técnicas de caracterização estrutural, química e espectroscópica, juntamente com cálculos DFT. Observamos por meio da análise de DRIFTS *in situ* que ocorre hidrogenação adicional dos intermediários reacionais na superfície de Ni₅Ga₃/ZrO₂, enquanto a fraca adsorção de CO₂ em Ni₅Ga₃/SiO₂ impede a estabilização de intermediários na superfície, e em Ni₅Ga₃/CeO₂ a interação forte com os sítios ativos na interface é prejudicial. Além disso, os cálculos de DFT das energias relativas dos reagentes e intermediários chave em diferentes regiões do catalisador (superfície do suporte, superfície da liga e interface liga-suporte) nos permitiram propor um mecanismo de reação para o catalisador mais promissor, Ni₅Ga₃/ZrO₂.

Palavras-chave: Metanol, CO₂, hidrogenação, Ni₅Ga₃, DFT.

ABSTRACT - Supported Ni-Ga alloys have shown potential as catalysts for the conversion of CO₂ to methanol under mild conditions. However, the performance of these alloys depends on optimizing the effects of the interaction between the alloy and the support, which is not yet fully understood. In this study, we examined how the synergy between the Ni₅Ga₃ alloy and the supports SiO₂, CeO₂, and ZrO₂ influences the catalytic performance. To do so, we used a combination of structural, chemical, and spectroscopic characterization techniques, along with density functional theory (DFT) calculations. We observed through *in situ* DRIFTS that additional hydrogenation of the reaction intermediates occurs on the Ni₅Ga₃/ZrO₂ surface, while weak CO₂ adsorption on Ni₅Ga₃/SiO₂ prevents intermediate stabilization on the surface, and strong interaction with active sites at the interface is detrimental in Ni₅Ga₃/CeO₂. Furthermore, DFT calculations of the relative energies of key reactants and intermediates in different regions of the catalyst (support surface, alloy surface, and alloy-support interface) allowed us to propose a reaction mechanism for the most promising catalyst, Ni₅Ga₃/ZrO₂.

Keywords: Methanol, CO₂, hydrogenation, Ni₅Ga₃, DFT.

Introdução

A hidrogenação do dióxido de carbono (CO₂) para a produção de metanol é um processo catalítico de grande interesse, pois pode ajudar a reduzir as concentrações de CO₂ na atmosfera e aproveitar esse gás de efeito estufa como uma matéria-prima valiosa (1). Sabe-se de estudos da literatura que a produção de metanol através da hidrogenação do CO₂ pode seguir por duas rotas distintas, a rota do formiato e a da rWGS (*reverse Water Gas Shift*) + hidrogenação do CO. Quando a reação rWGS ocorre, o CO produzido pode continuar sendo hidrogenado até o metanol ser formado ou ele pode ser desorvido por baixa interação com o catalisador, diminuindo assim a seletividade do catalisado a metanol (2).

Catalisadores à base de Cu/ZnO têm sido extensivamente estudados para a produção de metanol através da

hidrogenação de CO₂. Porém, estes catalisadores precisam de alta pressão para alcançar boa seletividade ao metanol, e sofrem de desativação ao longo do tempo (1). Catalisadores não baseados em cobre também passaram a ser estudados nos últimos anos, como catalisadores baseados em Pd, MOFs e catalisadores bimetálicos, no qual tem apresentado bons resultados. Recentemente, um estudo teórico/experimental feito por Studt e colaboradores (3) relatou o Ni₅Ga₃/SiO₂ como um catalisador ativo à pressão ambiente com seletividade a metanol semelhante e menor seletividade a CO do que o catalisador industrial CuZnO/Al₂O₃ na hidrogenação de CO₂ para metanol. A partir disso, o estudo de ligas de Ni-Ga como catalisadores da hidrogenação de CO₂ a metanol passou a ganhar destaque na comunidade científica. Os estudos subsequentes aplicando catalisadores à base de Ni-Ga encontraram

melhorias interessantes na produção de metanol durante a reação, concentrando-se em parâmetros como preparação e ativação do catalisador, o efeito dos promotores e o papel da estrutura cristalina do Ni_5Ga_3 na atividade. Apesar do crescente interesse em catalisadores de Ni-Ga, pouco foi explorado até então na literatura sobre as características e mecanismos fundamentais do Ni-Ga na reação catalítica.

O uso de ZrO_2 e CeO_2 como suportes para catalisadores de Cu aplicados na hidrogenação de CO_2 tem mostrado grande desempenho catalítico em termos de produção de metanol (4-7). As propriedades estruturais e de adsorção da interação metal-suporte, juntamente com as propriedades redox, parecem ser extremamente benéficas e levam a uma melhor atividade catalítica (4). No entanto, até onde sabemos, esses suportes nunca foram investigados em sistemas Ni-Ga. Assim, neste trabalho, avaliamos o papel da interface liga-suporte na otimização da produção de metanol durante a hidrogenação de CO_2 , preparando catalisadores Ni_5Ga_3 suportados em CeO_2 , ZrO_2 e SiO_2 . O desempenho catalítico e as propriedades estruturais, químicas e de superfície foram correlacionados pela aplicação de várias técnicas de caracterização, revelando o efeito adicional da sinergia da interface em $\text{Ni}_5\text{Ga}_3/\text{ZrO}_2$ como um promotor para a produtividade de metanol. Além disso, análises *in situ* de espectroscopia no infravermelho por refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) e cálculos de teoria do funcional da densidade (DFT) foram realizados para obter informações sobre o papel da interface liga-suporte na estabilização dos principais intermediários da reação, para discutir seus efeitos na reação e para propor um mecanismo para o catalisador.

Experimental

Preparação dos catalisadores

A síntese dos suportes CeO_2 e ZrO_2 foi realizada da mesma forma, diferindo apenas nas massas dos sais $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sendo 7,43 e 7,57 g, respectivamente. A massa do respectivo sal foi pesada, diluída em 40 mL de água destilada e deixado sob agitação até completa dissolução. Em seguida, 12 mL de NH_4OH (14,7 M) foram gotejados e deixados sob agitação por mais 30 min. Depois disso, a solução foi filtrada e o sólido foi redisperso em 100 mL de NH_4OH (0,25 M). Por fim, o sólido foi seco a 70 °C por 24 h e calcinado a 500 °C por 4 h, resultando nos suportes CeO_2 e ZrO_2 . A síntese das ligas suportadas foi realizada através da impregnação úmida dos sais de $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ e $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$. A razão molar Ni/Ga utilizada foi de 5/3 e foi impregnado 17 % em peso dos metais Ni + Ga em CeO_2 , ZrO_2 e SiO_2 . Os catalisadores resultantes foram calcinados a 500 °C por 2 h e denominados NGCe, NGZr e NGSi.

Caracterizações dos catalisadores

As propriedades estruturais dos catalisadores foram investigadas pela combinação de técnicas de difração de raios X (DRX), isotermas de fisissorção de N_2 e microscopia eletrônica de transmissão (TEM). A composição química e as propriedades de superfície dos catalisadores foram investigadas combinando espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva (ED-XRF), análises de redução e dessorção a temperatura programada e espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS). A fim de investigar a formação e evolução de espécies de superfície durante a reação foi utilizada a espectroscopia no infravermelho por refletância difusa com transformada de Fourier *in situ* em um instrumento Shimadzu IRPrestige-21 FTIR equipado com um acessório de refletância difusa (DRIFT).

Testes catalíticos

A atividade catalítica para a hidrogenação do CO_2 sobre catalisadores de Ni-Ga foi avaliada em um reator tubular de leito fixo de aço inoxidável. Tipicamente, foram utilizados 150 mg do catalisador, inserido no reator sobre uma cama de lâ de quartzo. Antes de cada teste, o catalisador foi reduzido *in situ* a 500 °C por 1 h, a uma vazão de 30 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ de H_2 à pressão atmosférica. Após a redução, o reator foi resfriado a uma temperatura específica (180, 225 ou 270 °C) e a vazão de gás foi alterada para a vazão desejada de H_2/CO_2 (8.000, 24.000, ou 40.000 $\text{L} \cdot \text{kg}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) a uma razão molar de 3:1. O sistema também foi pressurizado na pressão desejada antes de iniciar a reação. O tempo de reação para cada condição foi de 2 h para garantir a conversão estável e a pressão foi variada da pressão ambiente até 30 bar. Os gases produzidos foram analisados por um cromatógrafo a gás *online* (Agilent Technologies 7890A) equipado com um detector de ionização de chama (FID) para análise de metanol e metano e um detector de condutividade térmica (TCD) para análise de CO , H_2 e CO_2 . As injeções eram feitas a cada 15 min.

Abordagem teórica e detalhes computacionais

As energias totais dos sistemas foram calculadas através da Teoria do Funcional da Densidade (DFT) utilizando o funcional de troca e correlação Perdew-Burke-Erzenhof (PBE). O método de Tkatchenko-Scheffler (TS) foi utilizado para descrever de forma mais precisa as interações de Van der Waals de longo alcance. As equações de Kohn-Shan foram resolvidas utilizando o pacote Fritz-Haber Institute ab initio molecular simulations (FHI-aims). Dentre os modelos utilizados, o cluster $(\text{ZrO}_2)_{16}$ foi obtido do trabalho de Puigdollers e colaboradores (8), e o cluster Ni_5Ga_3 foi obtido substituindo átomos de Ni por átomos de Ga em estruturas Ni_8 e aplicando um algoritmo de clusterização K-means para selecionar 50 estruturas a serem otimizadas. As estruturas Ni_5Ga_3 selecionadas foram combinadas com a estrutura $(\text{ZrO}_2)_{16}$ e as moléculas de

intermediários da reação através de um algoritmo de distâncias de similaridade euclidiana, que resultaram nos modelos estudados neste trabalho.

Resultados e Discussão

A análise por DRX mostrou que o catalisador NGSi apresentou os principais picos referentes à fase cristalina Ni_5Ga_3 . Por outro lado, para os catalisadores NGCe e NGZr, foi identificado apenas um pequeno pico da fase Ni_5Ga_3 referente ao plano cristalino (221) e uma considerável diminuição na intensidade dos picos dos suportes. A porcentagem de Ni_5Ga_3 nos catalisadores foi avaliada por análise de ED-FRX, mostrando que a porcentagem em massa de Ni + Ga atingiu valores próximos ao esperado.

A Figura 1 mostra os resultados catalíticos de seletividade para metanol e conversão de CO_2 para as amostras NGCe, NGZr e NGSi variando diversos parâmetros como temperatura, GHSV e pressão (Fig. 1A-C), além das respectivas produtividades para metanol (Fig. 1D-F). Para todos as amostras, as conversões aumentaram com o aumento da temperatura, sendo que os maiores valores ocorreram para o catalisador NGCe, seguido do NGZr e por último do NGSi. Apesar da boa conversão, o NGCe apresentou baixa seletividade ao metanol em todas as temperaturas estudadas, com a maior parte do CO_2 sendo convertido em CO. A 180 e 225 °C, o catalisador NGSi apresentou a maior seletividade ao metanol. A 270 °C, o catalisador NGZr passa a apresentar a melhor seletividade entre os catalisadores. Observando a produtividade de metanol (Fig. 1D), nota-se que os catalisadores suportados em CeO_2 e ZrO_2 apresentaram os maiores valores e dentre eles, o catalisador NGZr apresentou a maior produção de metanol, com aumento significativo a 270 °C.

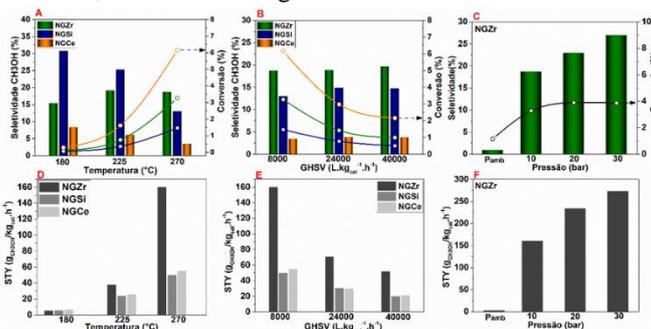


Figura 1. Testes catalíticos com seletividade para metanol e conversão para os catalisadores NGZr, NGSi e NGCe variando **A)** temperatura, **B)** GHSV e **C)** pressão. Produtividade em $\text{g}_{\text{CH}_3\text{OH}}.\text{kg}_{\text{cat}}^{-1}.\text{h}^{-1}$ para metanol variando **D)** temperatura, **E)** GHSV e **F)** pressão.

Mantendo a temperatura em 270 °C e a pressão em 10 bar, o efeito do GHSV na atividade foi verificado para os catalisadores (Fig. 1B). Observa-se que a seletividade permaneceu constante para todos os catalisadores, mas houve queda na conversão com o aumento do GHSV. Essa queda na conversão pode ser explicada devido ao menor

tempo de contato que as moléculas de CO_2 e H_2 tiveram com o catalisador quando o fluxo de gases aumentou, o que conseqüentemente deve levar a uma diminuição na conversão. Mantendo a temperatura em 270 °C e o GHSV em $8000 \text{ L.kg}_{\text{cat}}^{-1}.\text{h}^{-1}$, verificou-se o efeito da pressão para o sistema catalítico utilizando NGZr como catalisador (Fig. 1C), que anteriormente apresentou a melhor produtividade a metanol ($160,1 \text{ g}_{\text{CH}_3\text{OH}}.\text{kg}_{\text{cat}}^{-1}.\text{h}^{-1}$). O aumento da pressão ambiente para 10 bar levou a um aumento notável na conversão, mantendo-se aproximadamente constante nos aumentos subseqüentes para 20 e 30 bar. Em termos de seletividade, porém, o aumento foi mais consistente e, conseqüentemente, também na produtividade de metanol, chegando a $272,5 \text{ g}_{\text{CH}_3\text{OH}}.\text{kg}_{\text{cat}}^{-1}.\text{h}^{-1}$ a 30 bar. Além disso, o catalisador mostrou-se ativo à pressão ambiente, propriedade altamente desejada pela indústria química. Os dados de *turnover frequency* (TOF) para catalisadores nas condições catalíticas otimizadas revelaram valores de 0,35, 0,72 e $1,34 (\times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$ para NGSi, NGCe e NGZr, respectivamente. Como o TOF permite a determinação da atividade intrínseca do sítio catalítico, os resultados indicam claramente uma eficiência superior dos sítios catalíticos no catalisador NGZr.

Os perfis de TPD de CO_2 dos catalisadores são mostrados na Figura 2A. Os picos de dessorção de CO_2 em temperaturas mais baixas (50-150 °C) foram associados a sítios básicos fracos. A dessorção em sítios básicos moderados ocorre entre 150 e 300 °C, e em sítios básicos mais fortes entre 300 e 500 °C. O NGSi apresentou a menor quantidade de sítios básicos totais ($221,3 \mu\text{mol}.\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$), seguido por NGZr ($233,6 \mu\text{mol}.\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$) e NGCe ($348,9 \mu\text{mol}.\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$). Uma maior densidade de sítios fracos está presente no NGSi (~44 % do total de sítios básicos) em relação aos outros catalisadores (29 e 22 % para NGZr e NGCe, respectivamente), evidenciando a baixa afinidade do CO_2 com este catalisador. NGZr e NGCe apresentaram a maior parte do CO_2 moderadamente/fortemente adsorvido na superfície (71 % e 78 %, respectivamente), indicando efeitos consideráveis na promoção da interação do CO_2 com a superfície do catalisador gerados pelo uso de ZrO_2 e CeO_2 como suportes no sistema Ni_5Ga_3 . Ao correlacionar o número de sítios básicos moderados e fortes com a conversão de CO_2 durante as reações de hidrogenação em diferentes temperaturas nota-se um crescimento linear da conversão ao aumentar a quantidade desses sítios, o que evidencia a relevância da modulação da basicidade para controlar o parâmetro de atividade durante a reação.

O grau de redução (G.R.) dos catalisadores é apresentado na Tabela 1. O grau de redução da amostra NGZr foi o maior entre todos os catalisadores, seguido do NGSi e por último do NGCe. Uma maior redução sugere fortemente a formação de um maior número de sítios metálicos expostos e, conseqüentemente, uma capacidade superior de dissociar e promover o *spillover* do hidrogênio, no qual é uma etapa fundamental durante a reação de hidrogenação.

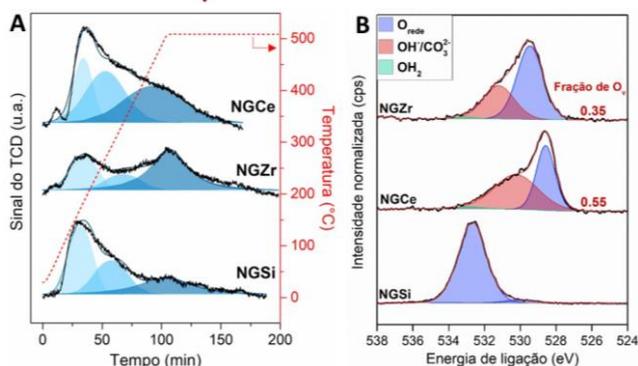


Figura 2. A) Perfis de dessorção de CO₂ a temperatura programada para os catalisadores. B) Espectros de XPS para O1s dos catalisadores.

Os espectros de alta resolução O1s XPS dos catalisadores na Figura 2B revelam a contribuição de três componentes distintos: oxigênio da rede (O_{rede}), água adsorvida na superfície (OH₂) e presença de hidroxila e grupos carbonato na superfície devido à adsorção dissociativa de H₂O e CO₂ em defeitos estruturais gerados por vacâncias de oxigênio (OH/CO₃²⁻). Os catalisadores NGCe e NGZr mostram uma contribuição considerável de oxigênio adsorvido, indicando a presença de defeitos estruturais superficiais. A presença de vacâncias de oxigênio provavelmente facilita a adsorção e ativação de CO₂, o que explica a maior quantidade de adsorção de CO₂ e a maior conversão desses catalisadores. A fração de vacância de oxigênio na superfície foi estimada e mostrou um aumento de 57 % de NGZr para NGCe, o que está diretamente relacionado ao aumento na quantidade de CO₂ moderadamente e fortemente ligados. Isso indica que a maioria do CO₂ adsorvido é encontrado em vacâncias.

Tabela 1. Propriedades texturais para os catalisadores e o grau de redução.

Catal.	A _m (m ² _{metal} /g _{cat})	Disp. (%)	Área BET (m ² .g _{cat} ⁻¹)	D.S.M. (m ² _{metal} / m ² _{support})	G.R. (%)
NGSi	51,5	40,0	80	0,33	62,1
NGZr	42,7	32,8	35	0,72	65,4
NGCe	27,1	21,9	73	0,42	40,4

Para comparar a presença de sítios metálicos entre os catalisadores, foi determinada a densidade de sítios metálicos (D.S.M.) (Tabela 1). O NGZr apresentou a maior densidade de sítios metálicos, seguido por NGCe e, por fim, NGSi. Apesar do NGZr ter apresentado alta densidade de sítios metálicos, ele apresentou dispersão intermediária, o que indica a formação de partículas metálicas menores. A produtividade superior do NGZr pode estar associada a essas propriedades, que facilitam o acesso aos sítios ativos do catalisador. A dispersão e área metálica superiores do NGSi provavelmente são a razão para sua seletividade superior para metanol observada em temperaturas mais baixas, mas essa característica por si só não pode explicar a atividade catalítica. Outras características intrínsecas, como

os sítios de adsorção de CO₂, previamente observados no TPD- CO₂, também contribuem para a atividade catalítica dos catalisadores. A maior densidade de sítios metálicos, juntamente com os resultados observados no CO₂-TPD, explica o melhor resultado catalítico do catalisador NGZr.

Para investigar o papel da interface entre a liga e o suporte na estabilização dos intermediários da reação, foram realizados experimentos de DRIFTS *in situ*. Quando os catalisadores foram expostos a uma mistura de CO₂/H₂ a 270 °C, quatro regiões principais foram identificadas nos espectros (Figura 3): (1) estiramento C-O de espécies adsorvidas de carbonato/carboxilato/formiato na faixa de 800-2000 cm⁻¹ (9), (2) estiramento C-O do monóxido de carbono em 1800-2100 cm⁻¹, (3) CO₂ gasoso em 2200-2500 cm⁻¹ e (4) estiramento C-H de espécies de formiato/metoxi em 2700-3000 cm⁻¹ (10). Observou-se que nas superfícies NGCe e NGZr, o CO₂ é ativado para formar espécies estáveis de carbonato, carboxilato e formiato, enquanto no catalisador NGSi não foi observada a formação dessas espécies. Os resultados estão de acordo com os perfis TPD-CO₂ e análise XPS, indicando interações diferentes entre o CO₂ e os catalisadores. Embora o NGSi não tenha apresentado adsorção e ativação substanciais de CO₂, ainda exibiu atividade para a produção de metanol, sugerindo que ocorre um mecanismo de reação semelhante ao da liga sem suporte.

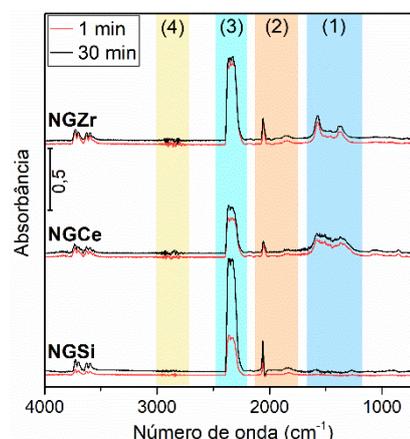


Figura 3. Espectros DRIFT *in situ* para NGZr, NGCe e NGSi após 1 e 30 min de exposição a uma vazão de CO₂ + H₂ (30 mL.min⁻¹, 1CO₂:3H₂) a 270 °C.

As diferenças na atividade e seletividade ao metanol estão relacionadas à estabilidade e reatividade das espécies de superfície resultantes da adsorção de CO₂. Experimentos de DRIFTS foram realizados para monitorar as espécies de carbonato, carboxilato e formiato na superfície dos suportes e catalisadores (Fig. 4). Os resultados indicam a presença de carbonatos, formiatos, carboxilatos e metoxis na superfície. Após a purga da superfície e a exposição a uma vazão de H₂, não houve mudanças significativas, sugerindo baixa atividade desses intermediários nos suportes. Os resultados da reação catalítica confirmaram a baixa conversão e ausência de produção de metanol nos suportes. Ao expor

mostraram que o CO₂ é melhor ativado, com ligações C–O mais longas e energias de interação mais fortes, tanto no cluster NGZr quanto no (ZrO₂)₁₆. Os cálculos também indicam que suportes isolados de ZrO₂ não devem ser eficientes para ativação de H₂. As energias de adsorção para H₂ são cerca de 0,4 eV mais fortes e os comprimentos de ligação H-H são cerca de 0,15 Å mais longos para NGZr e Ni₅Ga₃ do que para os clusters (ZrO₂)₁₆. Para os intermediários *COOH e *HCOO, notou-se que eles são muito estáveis sobre a superfície (ZrO₂)₁₆. A comparação entre os dados experimentais para ZrO₂ e NGZr também indicaram que a presença de *HCOO aumentou para sistemas NGZr em comparação com o suporte isolado. Esse comportamento também pode ser explicado pela falta de ativação do H₂ no ZrO₂ isolado para hidrogenar o CO₂. Ao mesmo tempo, os cálculos DFT mostram que a diferença nas energias de adsorção e interação para (ZrO₂)₁₆ ou NGZr são mais significativas para *HCOO do que para *COOH. Outro ponto observado pelos cálculos DFT é que o sistema ZrO₂ apresenta energias de adsorção de CO desprezíveis, especialmente quando comparado aos sistemas Ni₅Ga₃ e NGZr. Este resultado também ajuda a explicar a alta seletividade de CO observada para o sistema ZrO₂. Assim, apesar da baixa atividade do sistema ZrO₂ em gerar *CO, uma vez formado, os cálculos mostram que ele deve ser facilmente dessorvido como produto. Os cálculos também mostraram que a interface Ni₅Ga₃-ZrO₂ possui energia de adsorção de CO 0,06 eV maior em comparação com Ni₅Ga₃. Este resultado pode estar relacionado com a melhoria da seletividade ao metanol no sistema, uma vez que a adsorção mais forte pode favorecer uma maior hidrogenação em vez da dessorção de CO.

Propôs-se um mecanismo para a hidrogenação do CO₂ no catalisador NGZr com base nas observações experimentais e teóricas (Figura 6), onde a produção de metanol ocorre em dois caminhos paralelos: na superfície da liga e na interface liga-suporte. Na superfície da liga, o CO₂ se liga diretamente ao hidrogênio dissociado, enquanto na interface ocorre a transferência de hidrogênio dissociado da liga para o CO₂ adsorvido, formando intermediários que são hidrogenados para produzir metanol. Esses caminhos são influenciados pela estabilidade das espécies adsorvidas de CO₂ e pelas propriedades da superfície de ZrO₂. A compreensão desses mecanismos justifica o aumento da produtividade de metanol no catalisador NGZr.

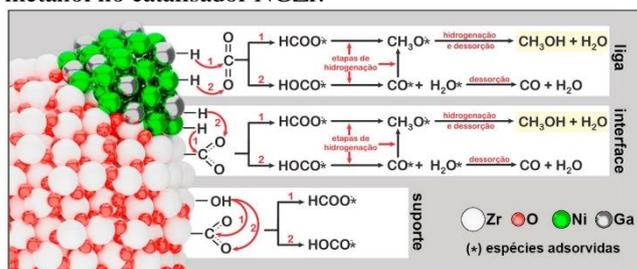


Figura 6. Mecanismo proposto para o sistema Ni₅Ga₃/ZrO₂ com base em estudos por DRIFTS e DFT aplicado na hidrogenação do CO₂ para metanol.

Conclusões

Este estudo investigou catalisadores de Ni₅Ga₃ suportados em SiO₂, ZrO₂ e CeO₂ para a redução de CO₂ em metanol. A liga NGZr demonstrou uma atividade catalítica superior devido à sua força moderada de adsorção de CO₂ e alta densidade de sítios metálicos expostos, que auxiliam na estabilização intermediária e no *spillover* de hidrogênio. A forte adsorção de intermediários na interface NGCe-suporte inibiu os sítios ativos, evitando a hidrogenação adicional para metanol, enquanto a fraca afinidade na interface NGSi limitou a produção de metanol pela superfície da liga. O catalisador NGZr mostrou alta atividade de hidrogenação para o carboxilato, formiato e intermediários metoxi, indicando que a produção de metanol ocorre por meio de duas rotas paralelas (rWGS e formiato) em diferentes superfícies (liga e interface liga-suporte). As análises teóricas apoiaram as conclusões experimentais, permitindo a proposição de um mecanismo de reação para o sistema Ni₅Ga₃/ZrO₂. No geral, este estudo destaca a importância da sinergia liga-suporte, para sistemas Ni₅Ga₃ suportados, para otimizar a produção de metanol a partir de CO₂.

Agradecimentos

FAPESP (2017/11631-2, 2017/22671-5, 2018/12021-6, 2018/21401-7, 2019/05561-7 e 2019/22260-0), RCGI (Research Centre for Gas Innovation, 2014/50279-4), EESC-USP (2015/06246-7), Shell e ANP.

Referências

1. A. Álvarez *et al.*, *Chemical Reviews*, **2017**, 117, 14, 9804–9838.
2. S. Kattel *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 38, 12440–12450.
3. F. Studt *et al.*, *Nature Chemistry*, **2014**, 6, 4, 320–324.
4. W. Wang, Z. Qu, L. Song, Q. Fu, *J. Energy Chem.*, **2020**, 40, 22–30.
5. T. Witton *et al.*, *Chem. Eng. J.*, **2016**, 293, 327–336.
6. B. Ouyang, W. Tan, B. Liu, *Catal. Commun.*, **2017**, 95, 36–39.
7. E. Lam *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2018**, 140, 33, 10530–10535.
8. A.R. Puigdollers, F. Illas, G. Pacchioni, *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120, 4392–4402.
9. M. Piumetti, S. Bensaid, D. Fino, N. Russo, *Appl. Catal. B Environ.*, **2016**, 197, 35–46.
10. C. Wu *et al.*, *Nat. Commun.*, **2020**, 11, 1, 1–10.

¹ Endereço atual: Instituto de Química, UNESP, Rua Prof. Francisco Degni, 55 – Quitandinha - Araraquara/SP