



Desenvolvimento de catalisadores mássicos para decomposição do óxido nitroso para aplicações aeroespaciais

Sayuri Okamoto¹, Leandro José Maschio¹, Jose Maria Corrêa Bueno², Ricardo Vieira¹.

¹Laboratório de Combustão e Propulsão, Instituto de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, ricardo.vieira@lcp.inpe.br

²Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP

Resumo-Abstract

RESUMO - Foram preparados catalisadores mássicos, à base de óxidos Co, Mn e Al, para decomposição do óxido nitroso (N_2O) para fins aeroespaciais a partir do método da coprecipitação. Este método consiste na coprecipitação de soluções de nitratos de Co, Mn e Al em solução de K_2CO_3 , a 25°C, mantendo o pH em 10 pela adição de uma solução de KOH. Foram preparadas diversas razões molares: 4Co1Mn1Al, 1Co4Mn1Al, 1Co2Mn, 2Co1Mn, 1Mn2Al e 1Co2Al. Estes óxidos foram extrusados, calcinados a 900°C e caracterizados por Adsorção de Nitrogênio, Quimissoração de CO, Termogravimetria, Difratometria de Raios-X e por Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios-X (XPS). Inicialmente foram efetuados testes catalíticos em um reator de leito fixo para avaliação da atividade dos catalisadores na temperatura de ignição da reação de decomposição do N_2O . Em seguida foram executados testes em um propulsor de 2 N, empregando o catalisador com melhor desempenho nos testes catalíticos (4Co1Mn1Al), para verificar o performance do material, comparando com os valores teóricos. Foi, ainda, realizado um teste comparativo de desempenho com o catalisador 5% Rh_2O_3/Al_2O_3 , tradicionalmente usado na decomposição do N_2O .

ABSTRACT – Cobalt, manganese and aluminum oxide-based bulk catalysts were prepared by the coprecipitation method for decomposition of nitrous oxide (N_2O) for aerospace applications. Nitrates solutions of cobalt, manganese, and aluminum were coprecipitated in a K_2CO_3 solution at 25°C, with pH maintained at 10 by adding a KOH solution. Several oxides (4Co1Mn1Al, 1Co4Mn1Al, 1Co2Mn, 2Co1Mn, 1Mn2Al, 1Co2Al) were prepared, extruded and calcined at 900°C. These materials were characterized by N_2 Adsorption, CO Chemisorption, Thermogravimetry, X-Ray Diffraction, and X-ray Excited Photoelectron Spectroscopy (XPS). The catalytic tests were first performed in a fixed bed reactor in order to evaluate the catalytic activity around the N_2O decomposition temperature. Afterwards, tests on a 2 N thruster were carried out with the catalyst that has shown the best performance in the fixed bed reactor (4Co1Mn1Al) and the experimental results were compared to theoretical values. In addition, the performance of the bulk catalyst was compared to the conventional catalyst (5% Rh_2O_3/Al_2O_3) for N_2O decomposition.

Keywords: mixed oxides, bulk catalysts, N_2O decomposition, thruster.

Introdução

Sistemas propulsivos monopropelente são, principalmente, empregados em motores de rolamento de foguetes e em motores para operações de correção de órbita e de controle de atitude de satélites. Atualmente a maior parte dos satélites em órbita utiliza sistema de propulsão à decomposição de hidrazina e um catalisador composto de 30 a 40% de írio suportado em alumina [1]. Porém, a hidrazina é um monopropelente extremamente caro e altamente tóxico (carcinogênico). Além disso, este sistema de propulsão emprega complexas turbinas ou cilindros de gases pressurizantes para manter constante a pressão de

alimentação do propelente. No entanto, existe uma classe de monopropelentes, assim como o óxido nitroso (N_2O), que é saturado à temperatura ambiente e apresenta alta pressão de vapor (~52 bar a 20°C). Esta característica confere a este monopropelente a capacidade de ser auto-pressurizado, evitando assim a complexidade de um sistema de alimentação pneumático ou eletromecânico. Cumpre ainda ressaltar que o N_2O é um propelente de alta energia, de baixo custo e não tóxico, tornando-o atrativo para aplicação em motores de baixo empuxo em aeronaves espaciais, principalmente em função da crescente preocupação quanto à segurança ambiental [2,3]. Todavia, o uso do N_2O como monopropelente ainda é limitado devido à ausência de um

catalisador resistente às rigorosas condições de operação do propulsor e a temperatura no leito catalítico, a qual pode atingir até 1600°C durante a decomposição do N₂O.

Pouco material tem sido publicado a respeito da decomposição catalítica do N₂O para fins aeroespaciais. O Centro Espacial da Universidade de Surrey publicou uma série de relatórios e artigos, apresentando resultados com mais de 50 diferentes catalisadores testados na decomposição do N₂O [6-9]. Entre os catalisadores testados, os mais promissores foram: NiO/ZrO₂, IrO₂/Al₂O₃ e Rh₂O₃/Al₂O₃. Todos os catalisadores, aparentemente, suportaram as altas temperaturas atingidas na decomposição do N₂O (~1500°C), porém foi necessário um pré-aquecimento (~500°C) para iniciar a reação. Gaidei *et al.* também preparam catalisadores para decomposição do N₂O a partir da impregnação da Al₂O₃ com soluções de H₂PtCl₆, PdCl₃, RhCl₃, RuOHCl₃, H₂IrCl₆, Cu(NO₃)₂, Co(NO₃)₂, Ni(NO₃)₂, H₂CrO₄, Mn(NO₃)₂ e Fe(NO₃)₃, variando o teor de metal ativo entre 3 a 30% [10]. As temperaturas de ignição observadas obedeceram a seguinte ordem: Rh (255°C) < Ru (320°C) < Ir (330°C) < Co₃O₄ (415°C) < NiO (425°C) < Pt (430°C) < MnO₂ (430°C) < CuO (440°C) < Cr₂O₃ (445°C) < Fe₂O₃ (465°C) < Pd (490°C). Os autores citaram os catalisadores à base de metais de transição como uma boa alternativa para a preparação de catalisadores de baixo custo para a decomposição do N₂O. Contudo, não foram efetuados testes acima de 800°C e todos os catalisadores preparados eram suportados, induzindo assim que, em condições reais de uso, possa haver evaporação de espécies, sinterização da fase metálica ou até mesmo perda por arraste das espécies depositadas na superfície do suporte.

Recentemente Russo *et al.* [11] avaliaram o desempenho de diversos óxidos do tipo espinélio (AB₂O₄), onde: A = Mg, Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Cr, Fe, Zn e B = Cr, Fe, Co, como catalisadores para a reação de decomposição do N₂O para fins ambientais. Os catalisadores foram preparados pelo método de combustão, a partir de misturas de soluções aquosas concentradas de ureia e nitratos das espécies envolvidas, seguida da ignição em um forno a 600°C. Os óxidos contendo Co no sítio B apresentaram maior atividade, devido sua alta capacidade de formar sítios livres na superfície, responsáveis pela decomposição catalítica do N₂O. O catalisador MgCo₂O₄ foi o de melhor desempenho e capaz de iniciar a reação a 440°C.

A reação de decomposição do N₂O para fins aeroespaciais é extremamente rápida, ocorrendo na fase vapor, onde a velocidade de ignição do propulsor é muito dependente do número de sítios ativos expostos para a reação.



Como esta reação é extremamente exotérmica, poucos segundos após sua ignição, o leito catalítico atinge temperatura suficiente para que a reação deixe de ser catalítica e passe a ser inteiramente térmica. Sendo assim,

este trabalho busca um catalisador com sítios ativos suficientes para efetuar uma ignição instantânea e estrutura que resista a temperaturas na ordem de 1200°C sem significativas modificações na sua estrutura.

Experimental

Preparação do catalisador.

Óxidos mistos foram preparados a partir de uma solução 1 mol/L dos íons metálicos Co, Mn e Al nas proporções: 4:1:1, 1:4:1, 2:1:1, 2:2:1, 1:1:1, 2:1:0, 1:2:0, 1:0:2 e 0:1:2, utilizando nitratos dos cátions em questão. Cerca de 125 mL de cada uma destas soluções foram adicionados, gota a gota, a 50 mL de uma solução 0,5 mol/L de carbonato de potássio, a temperatura ambiente e sob agitação. O pH da solução foi mantido em 10, pela adição lenta de uma solução 3 mol/L de KOH. Após a reação, o meio reacional permaneceu em agitação durante 2 h, seguido de repouso por 12 h. Após o envelhecimento, o produto foi lavado até pH neutro e filtrado a vácuo. Posteriormente, o material foi secado a 110°C durante 12 h. O produto foi, então, triturado a uma granulometria de 100 µm. Este pó foi umedecido, extrusado, secado por 12 h a 60°C e, finalmente, calcinado ao ar a 900°C por 1 h.

Caracterização do catalisador.

As medidas de superfície específica (*S_g*) e da densidade de sítios ativos (*CO_{ads}*) efetuadas em um aparelho da marca Micromeritics modelo ASAP2020C.

Para as análises espectroscópicas fotoelétrônica de raios X, (XPS) foram empregadas um equipamento SPECS Phoibos 100, com detector 1D-DLD e uma fonte não-monoacromática de Al K α (1486,6 eV) a uma potência de 200 W. Foram registrados os espectros gerais com *pass energy* de 30 eV e os espectros em alta resolução de 20 eV. Os espectros foram calibrados em relação ao pico do C1s a 284,8 eV.

As análises por difratometria de Raios X foram obtidas um difratômetro marca Shimadzu modelo 6000, com monocromador de grafite, fonte Cu, 40 kV e 30 mA.

Testes de bancada.

A bancada de teste catalítico foi confeccionada em aço inoxidável e composta, basicamente, de um regulador de pressão com sistema de aquecimento (Gasart), um controlador mássico de vazão com capacidade de 0-4 g/s (Aalborg modelo GFM67), um reator de leito fixo com 15 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, um forno elétrico tubular bipartido (Carbolite modelo VST 12/300), sistema de aquisição de temperatura (MC modelo USB-TC) e termopares do tipo S.

Testes no propulsor.

Foi fabricado um propulsor com empuxo teórico de 2 N (Figura 1), operando com a decomposição catalítica do N₂O.

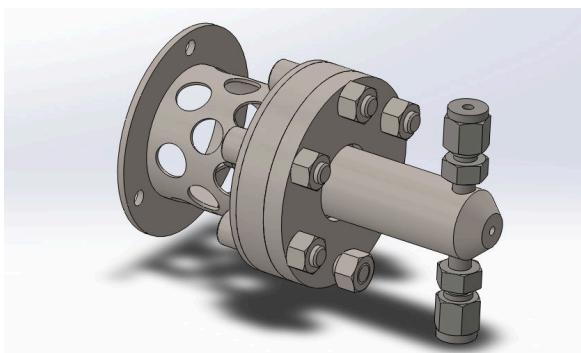


Figura 1. Imagem computacional do propulsor de 2 N para a decomposição do N_2O .

Para o dimensionamento da tubeira, a pressão na câmara foi definida em 5 bar, a pressão ambiente em 960 mbar, a temperatura adiabática de decomposição do N_2O de 1890 K, a razão de expansão da tubeira de 1,4267, a velocidade característica de exaustão de 1097 m/s, o coeficiente de empuxo de 1,1049, a aceleração da gravidade de 9,81 m/s² e o impulso específico nas condições especificadas de 123,5 m/s. As dimensões do leito catalítico foram estabelecidas experimentalmente, como sendo: diâmetro de 12 mm e comprimento de 100 mm, para uma vazão mássica calculada de 1,65 g/s de N_2O , diâmetro da garganta de 2,1 mm e diâmetro da tubeira de 2,55 mm.

Resultados e Discussão

Caracterização dos catalisadores.

A Tabela 1 apresenta as medidas de superfície específica (S_g) da densidade de sítios ativos (CO_{ads}). Os materiais contendo maior teor de Al foram aqueles que apresentaram maior superfície específica. Os materiais que apresentaram as maiores densidades de sítios foram o 1Mn2Al, 2Co1Mn e 4Co1MnAl.

Tabela 1. Resultados de medidas de adsorção

Catalisador	S_g (m^2/g)	CO_{ads} ($\mu\text{mol/g}$)
1Mn2Al	34	108
4Co1Mn1Al	13	31
2Co1Mn	6	49
1Co2Mn1Al	10	0
1Co1Mn1Al	11	0
2Co2Mn1Al	5	0
1Co4Mn1Al	4	5
2Co1Mn1Al	20	0
1Co2Mn	1	3
1Co2Al	47	0

Foram também efetuadas análises químicas das superfícies dos catalisadores: 4Co1Mn1Al, 1Co4Mn1Al, 1Co2Mn, 2Co1Mn, 1Mn2Al e 1Co2Al, por XPS.

A análise do espectro na região do Co2p (Figura 2), com suas raias principais na região da energia de ligação 779,8 eV e 795,7 eV assim como seus satélites com base larga localizadas na energia de ligação 788,8 e 804,7 eV (linhas verticais ciano), indicam que as únicas amostras que apresentaram intensidades referentes ao Co_3O_4 foram as amostras 2Co1Mn e 4Co1Mn1Al. Isto significa que a espécie mais presente em todas as amostras, indicada na região $2\text{p}_{3/2}$, pelas energias de ligação correspondentes a 779,95 eV foi o CoO cujas raias principais e satélites estão representadas pelas linhas verticais pretas. Este fato sugere que o aumento do teor de Co nos óxidos provoca uma oxidação da espécie CoO para Co_3O_4 , fazendo com que, nestas amostras, a concentração atômica do Co^{2+} permaneça próximo de 4,5%.

A Tabela 2 apresenta a concentração atômica das espécies Co presentes nas amostras, as quais foram determinadas pelos espectros de XPS de alta resolução com deconvoluções dos picos. Pode-se observar que, apesar do pico principal $2\text{p}_{3/2}$ representar o Co^{2+} , as amostras que contém Co_3O_4 apresentam menores teores de CoO do que aquelas que não exibem espécies de Co nos dois níveis de oxidação.

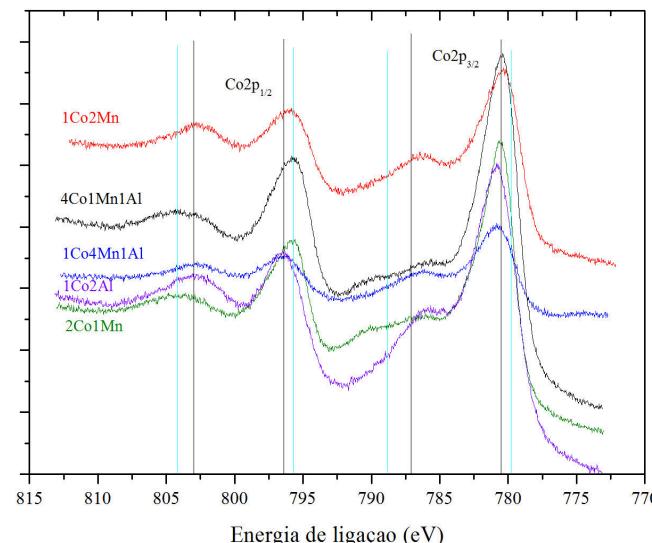


Figura 2. Espectro XPS em alta resolução na região do Co2p

Tabela 2. Concentração atômica (CA) e a relação $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ das espécies presentes nas amostras

Amostra	Espécies	CA (%)	$\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$
4Co1Mn1Al	Co_3O_4	9,39	2,32
	CoO	4,05	
1Co4Mn1Al	Co_3O_4	-	-
	CoO	4,25	
1Co2Al	Co_3O_4	-	-
	CoO	8,45	
2Co1Mn	Co_3O_4	11,04	2,49
	CoO	4,44	
1Co2Mn	Co_3O_4	-	-
	CoO	8,12	

O espectro observado na região do Mn2p (Figura 3), com as energias de ligação para os picos principais em 641,8 eV ($2p_{3/2}$) e 653,4 eV ($2p_{1/2}$), representado pelas linhas verticais em ciano, indica a presença do Mn_2O_3 . Aparentemente, todas as amostras possuem tendência de apresentar deslocamento do pico $2p_{3/2}$ para regiões de energia de ligação mais altas onde se localizam as energias de ligação correspondentes a espécie Mn^{4+} (linhas verticais em preto). Isto indica que o excesso de cobalto presente na amostra, sem a presença do alumínio, facilita a tendência da variação do estado de oxidação do Mn^{3+} para Mn^{4+} . No entanto, as quantidades utilizadas neste trabalho não tenham sido suficientes para que a análise quantitativa apresentada na Tabela 3 identifique a presença de Mn na forma MnO_2 .

Conforme os valores apresentados na Tabela 3, pode-se observar que a amostra 1Co4Mn1Al, apesar de conter a mesma razão molar (4:2, Mn:metais) da sua correspondente 1Co2Mn, possui uma maior concentração de Mn na superfície. Ainda, na amostra 1Co2Mn, apesar da maior quantidade de Mn, este apresenta concentração semelhante àquela encontrada na amostra 2Co1Mn, indicando, assim, uma possível migração do Mn na superfície da amostra em relação ao Co, fazendo com que a concentração não varie.

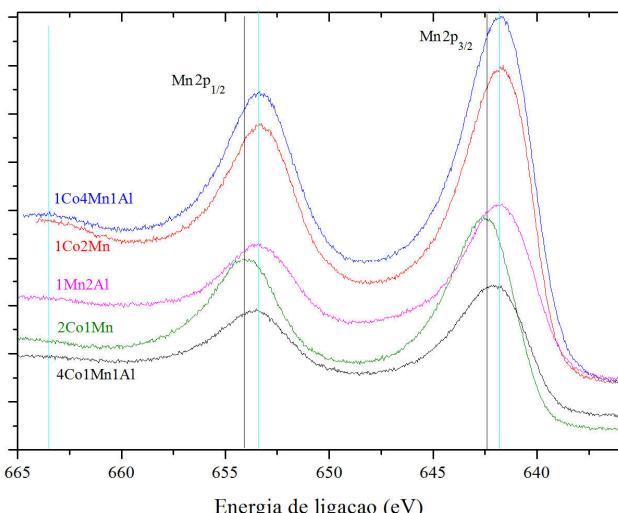


Figura 3. Espectro XPS em alta resolução na região do Mn2p

Tabela 3. Concentração atômicas (CA) das espécies Mn presentes nas amostras

Amostra	Espécies	CA (%)
4Co1Mn1Al	Mn^{3+}	8,50
1Co4Mn1Al	Mn^{3+}	19,49
1Mn2Al	Mn^{3+}	7,06
2Co1Mn	Mn^{3+}	17,29
1Co2Mn	Mn^{3+}	17,76

A partir do método Hanawalt foi detectada a presença de uma mistura de três fases do tipo espinélio: Co_3O_4 (ficha PDF-2 nº 01-078-1969), CoAl_2O_4 (PDF-2 nº 01-070-0753) e Co_2MnO_4 (PDF-2 nº 00-001-1130) nos difratogramas apresentados na Figura 4. Porém, é muito difícil a diferenciação destas fases através desta técnica. As amostras 1Co2Al, 4Co1Mn1Al e 2Co1Mn apresentaram difratogramas bastante similares, nos quais foi identificada a fase Co_3O_4 , como a predominante. Isto devido a alto potencial de oxidação do íon Co^{2+} e a maior estabilidade termodinâmica do Co_3O_4 em relação ao CoO . Foi ainda observada uma diminuição da fase Co_3O_4 com o aumento do teor de Mn na amostra. Assim, as amostras 1Co2Mn e 1Co4Mn1Al apresentaram, também, a fase CoMn_2O_4 (PDF-2 nº 01-077-0471) na sua composição. Já a amostra 1Mn2Al, livre de Co, apresentou a fase Mn_3O_4 (PDF-2 nº 00-001-1127), predominantemente, em sua estrutura. Aparentemente, a estabilização dos cátions Mn^{2+} e a estrutura MnCO_3 no precursor dificultaram a oxidação do Mn_3O_4 para Mn_5O_8 a altas temperaturas.

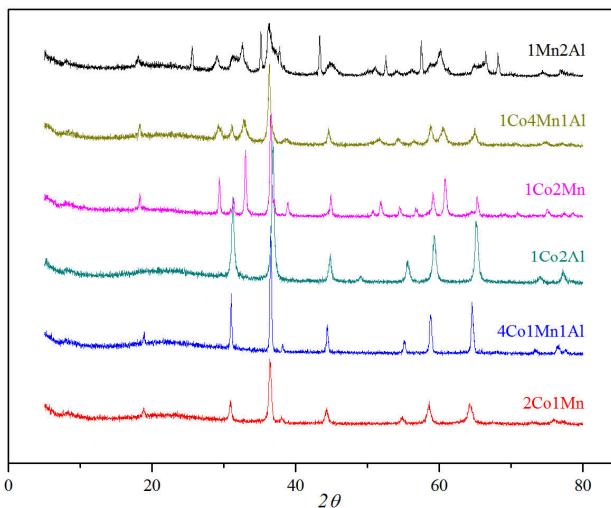


Figura 4. Difratogramas das amostras de óxidos mistos preparadas pelo método de coprecipitação e calcinadas a 900°C.

Testes catalíticos.

A Figura 5 mostra as curvas de temperaturas obtidas no teste catalítico para a avaliação da atividade dos catalisadores preparados. Estas curvas indicam o tempo de indução da reação apresentado pelos diferentes óxidos na decomposição do N_2O . Vale lembrar que a temperatura inicial do leito catalítico foi pré-estabelecida, experimentalmente, em 460°C. Os resultados indicam que os catalisadores 4Co1Mn1Al e 1Mn2Al foram os mais espontâneos nesta reação.

Analizando os resultados obtidos por XPS pode-se correlacionar o estado de oxidação dos cátions presentes na superfície dos materiais com suas atividades catalíticas. Portanto, observou-se que a presença de pares redox do tipo

$\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ e $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ desempenha um importante papel na transferência de elétrons, propiciando a mobilidade necessária para o incremento da atividade de superfície redox.

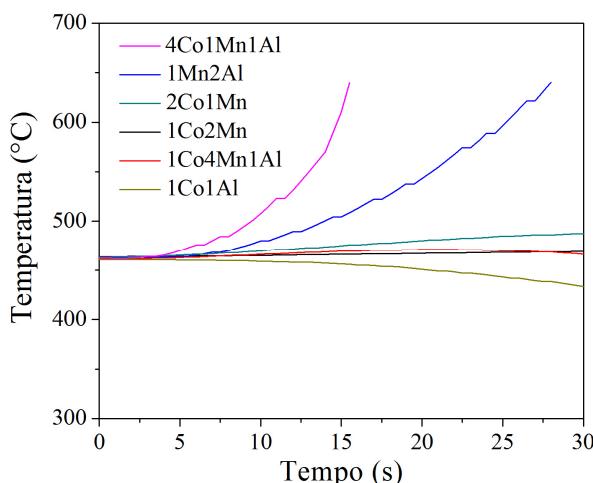


Figura 5. Curvas de temperatura em função do tempo para a determinação do menor tempo de indução.

Assim, o melhor desempenho apresentado pelos catalisadores 4Co1Mn1Al e 1Mn2Al se deve, dentre outros fatores, à presença destes pares redox. No entanto, o catalisador 2Co1Mn apesar de apresentar par redox $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ e densidade de sítios ativos por quimissorção de CO não apresentou atividade catalítica satisfatória não sendo apto para uso no propulsor cujos fatores ainda permanecem sem resposta. Sendo assim, por apresentar o melhor desempenho de evolução térmica no teste em bancada, o catalisador 4Co1Mn1Al foi selecionado para os testes no propulsor.

Testes no propulsor.

O propulsor de 2 N foi carregado com 7,25 g do catalisador 4Co1Mn1Al. O propulsor foi revestido com uma resistência elétrica para pré-aquecer o sistema a 500°C. Os testes foram compostos de um tiro contínuo de 10 segundos e de uma série de tiros pulsados de 5 segundos, em intervalos também de 5 segundos.

As Figura 6 e 7 apresentam as curvas de empuxo obtidas com o catalisador 4Co1Mn1Al no propulsor de 2 N.

Pode-se observar que o empuxo ($\sim 1,8$ N) chegou próximo ao valor teórico de 2 N. O fato deste não ter atingido o valor teórico deve-se, muito provavelmente, às perdas térmicas, uma vez que a temperatura alcançada nos testes foi em torno de 1200°C (Figura 6), bem inferior a temperatura adiabática da reação ($\sim 1600^\circ\text{C}$).

Os testes pulsados (Figura 7) foram bastante reproduutivos. Foi também constatada uma pequena desativação do catalisador durante os testes, isto devido, possivelmente, à contração do material e consecutiva perda de superfície

específica, bem como a mudanças de fases, formando fases menos ativas, nesta reação, na superfície do catalisador. Estes fenômenos podem ter sido causados pelas altas temperaturas que o leito catalítico foi submetido. A instabilidade (Figura 7) é devida a balança de empuxo.

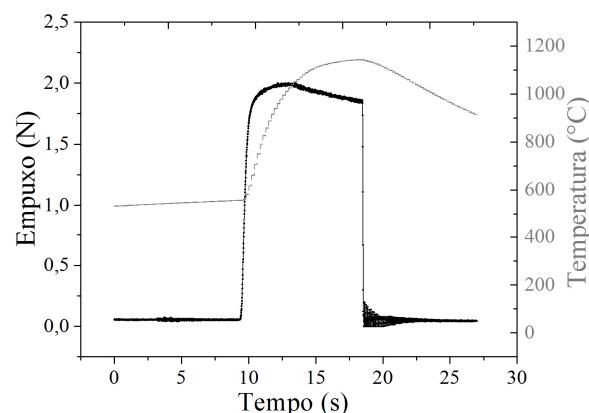


Figura 6. Curva de empuxo do catalisador 4Co1Mn1Al testado em modo contínuo.

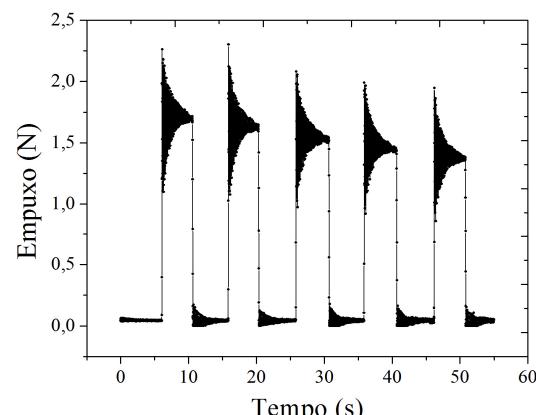


Figura 7. Curva de empuxo do catalisador 4Co1Mn1Al testado em modo pulsado.

A velocidade característica é um parâmetro, em propulsão, que visa avaliar a eficiência do sistema catalítico, *grosso modo*, se houve ou não a decomposição completa do propelente. O valor teórico da velocidade característica foi de 1096,9 m/s, enquanto o valor experimental foi da ordem de 945 m/s. É sabido que valor ideal da velocidade característica experimental deve estar entre 92 a 99,5% do valor teórico. No presente caso, foi obtida uma eficiência da velocidade característica em torno de 86%, evidenciando que a decomposição catalítica foi quase completa. Estes resultados podem ser incrementados através de um melhor isolamento do sistema propulsivo. Contudo, este sistema ainda esbarra nas altas temperaturas atingidas pela reação. Apesar da escolha de óxidos mássicos como catalisador para este sistema propulsivo, foi observado que mesmo esses

materiais sofrem a ação da temperatura na sua estrutura. O catalisador 4Co1Mn1Al apresentou, antes dos testes no propulsor, uma superfície específica de $12,8 \text{ m}^2/\text{g}$. Após os testes, o mesmo material, uma superfície específica menor que $1 \text{ m}^2/\text{g}$.

Foi decidido realizar testes adicionais com catalisadores tradicionalmente empregados nesta reação, para comparar os resultados com os dos catalisadores desenvolvidos no presente trabalho. Sendo assim, foram, também, realizadas as mesmas sequências de testes, porém, desta vez, empregando o sistema catalítico 5% Rh₂O₃/Al₂O₃.

As Figuras 8 e 9 exibem as curvas de empuxo obtidas com o sistema catalítico 5% Rh₂O₃/Al₂O₃.

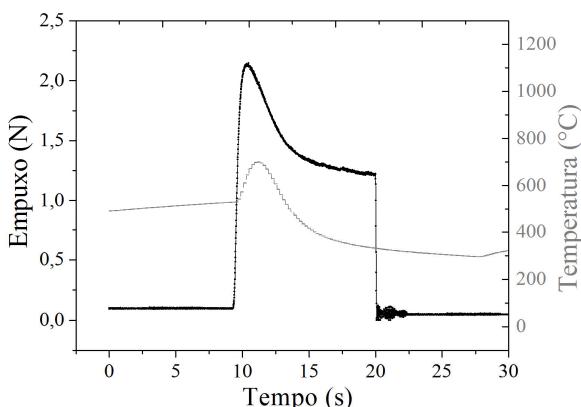


Figura 8. Curva de empuxo do catalisador 5% Rh₂O₃/Al₂O₃ testado em modo contínuo.

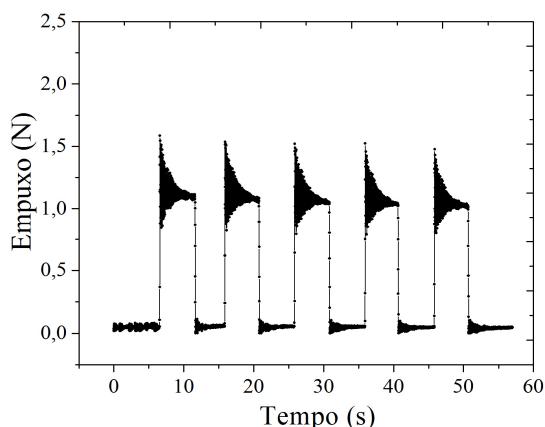


Figura 9. Curva de empuxo do catalisador 5% Rh₂O₃/Al₂O₃ testado em modo contínuo.

Pode-se observar que o empuxo chegou ao valor teórico de 2 N apenas no início do primeiro teste (Figura 8), ocorrendo uma rápida desativação do sistema e mantendo um valor experimental em torno de 1,2 N no decorrer dos testes. Também foi observado sinais de desativação do catalisador em função do tempo. A temperatura do sistema, atingida

durante os testes (~700°C) foi muito inferior à temperatura adiabática da reação (~1600°C).

O valor experimental da velocidade característica neste ensaio foi da ordem de 785 m/s. Foi obtida, então, uma eficiência da velocidade característica em torno de 71%, valor este bem abaixo daquele obtido com o catalisador mássico (86%), evidenciando uma menor eficiência do sistema catalítico tradicional. Cumpre ainda ressaltar que o sistema catalítico apresentava, antes do teste, uma superfície específica de $185 \text{ m}^2/\text{g}$ e após o teste, o mesmo material, apresentou uma superfície específica de $130 \text{ m}^2/\text{g}$.

Conclusões

Os catalisadores à base de óxidos mistos, contendo Co e Mn, são facilmente moldáveis e bastante ativos na decomposição do N₂O. Um dos fatores que contribui para esta atividade foi atribuída à presença de pares redox, os quais facilitam a transferência de elétrons. O catalisador 4Co1Mn1Al apresentou melhor desempenho no propulsor de 2 N do que o catalisador (5% Rh₂O₃/Al₂O₃) tradicionalmente empregado nesta reação. Apesar de ter suportado melhor as altas temperaturas, o catalisador à base de óxidos mistos sofreu severas modificações estruturais após os testes. Levando isto em consideração e a elevada temperatura de indução da reação, acredita-se que este não seja um sistema apropriado para uso em motores de atitude de satélites, mas sim para foguetes híbridos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro efetuado pela FAPESP e pelo CNPq.

Referências

1. E. J. Wucherer; T. Cook; M. Stiefel; R. Humphries; J. Parker, AIAA Paper 03-5079, 2003.
2. V. Zakirov; M. Sweeting; T. Lawrence; J. Sellers, *Acta Astronaut.* **2001**, *48*, 353-362.
3. G. Cai; W. Sun; J. Fang; M. Li; Y. Cong; Z. Yang, *Aerospace Sci. Technol.* **2012**, *23*, 439-451.
4. P. W. Atkins; L. L. Jones, *Chemistry: Molecules, Matter and Change*, Freeman and Co., New York, 1997.
5. T. P. Gaidei; I. Y. Tyuryaev, *Russ. J. Appl. Chem.* **1998**, *71*, 265-270.
6. V. Zakirov, *Catalytic decomposition of nitrous oxide for spacecraft propulsion applications*, Report Surrey Satellite Technology Ltd., SPAB-17101-01, 2000.
7. V. Zakirov; M. Sweeting; V. Goeman; T. Lawrence, In.: *14th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, USA, 2000.
8. A. Baker; D. M. Gibbon, *Catalytic decomposition of nitrous oxide*, Report Surrey Satellite Technology Ltd., SPDB-38569-03, 2003.

9. J. R. Wallbank; P. A. Sermon; A. M. Baker; L. Courtney; R. M. Sambrook, In.: 2nd International Conference on Green Propellants for Space Propulsion, Cagliari, Italy, 2004.
10. T. P. Gaidei; A. I. Kokorin; N. Pillet; M. E. Srukova; E. S. Khaustova; G. G. Shmurak; N. T. Yaroshenko, *Russ. J. Phys. Chem. A* **2007**, *81*, 895-900.
11. N. Russo; D. Fino; G. Saracco; V. Specchia, *Catal. Today* **2007**, *119*, 228-232.
12. F. Kapteijn; J. Rodriguez-Mirasol; J. A. Moulijn, *Appl. Catal. B-Environ.* **1996**, *9*, 25-64.