

DESENVOLVIMENTO DE SELANTES PARA OPERAÇÃO DE REATOR ELETROLÍTICO CO-SOEC A 2 BAR PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS (e-FUEL)

J. F. Gabriel¹, G. Doubeck², G. Ett¹

¹Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil (juliafernandes@fei.edu.br)

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil

A transição energética global exige tecnologias eficientes para produção de combustíveis sintéticos limpos. Os eletrolisadores de óxido sólido (SOEC) operam a 600–1000 °C, mas selantes adequados para 800 °C e 2 bar são escassos. Este trabalho avalia selantes compressivos — papel de mica flexível e feltro de alumina — por ensaios de compressão e vedação a frio (25 °C) e a quente (800 °C). O feltro de alumina apresentou vedação eficiente mesmo a baixas cargas de compressão, enquanto a mica demonstrou maior estabilidade dimensional, porém vedação limitada acima de 0,5 bar.

Palavras-chave: Selantes; SOFC; SOEC; e-fuels; vedação de alta temperatura.

INTRODUÇÃO

Com o crescimento contínuo da demanda energética global, intensifica-se a busca por soluções para a produção de energia elétrica de forma mais limpa e sustentável [1,2]. As tecnologias baseadas no hidrogênio, como as células a combustível de óxido sólido (SOFCs), vêm ganhando destaque por aliarem baixo impacto ambiental a elevada eficiência, superando os limites termodinâmicos impostos pelo ciclo de Carnot [3,4].

Os Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOEC) representam uma abordagem eficiente para a produção de hidrogênio verde e de gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$) via co-eletrólise de CO_2 e H_2O , viabilizando a produção de e-fuels. Operando entre 600 °C e 1000 °C, um dos principais gargalos tecnológicos é a vedação hermética dos reatores em alta temperatura e pressão [5,6].

A ausência de selantes adequados para 800 °C e 2 bar compromete a eficiência (70–90 %) e a durabilidade dos sistemas. O objetivo deste trabalho é avaliar materiais selantes compressivos para reatores Co-SOEC, buscando superar os desafios técnicos da pressurização e aumentar a eficiência da produção de e-fuels em até 10 %.

MATERIAL E MÉTODOS

Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi conduzida nas bases Scopus e Portal CAPES, utilizando o software Bibliometrix. As palavras-chave "Sealing" e "SOFC" foram aplicadas ao título, resumo e palavras-chave. Dos 533 artigos encontrados, foram selecionados os 50 mais citados e, após análise dos resumos, 25 compuseram a revisão final.

Caracterização de Propriedades Intrínsecas:

Medição de CTE em diferentes atmosferas, análise de Tg, Ts e cristalização (DSC), determinação de fases cristalinas (DRX), estabilidade térmica (ATG) e comportamento reológico para otimização da aplicação.

Testes de Compatibilidade Química e Interfacial:

Co-sinterização de selante com materiais de interconexão, eletrólito e eletrodos sob ciclos térmicos em atmosferas oxidante e redutora. Análise das interfaces pós-exposição por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia (MEV-EDS) e difração de raios X (DRX) para identificação de fases cristalinas secundárias, indicativas da ocorrência de reações indesejadas entre os materiais.

Testes de Desempenho de Vedação em Alta Temperatura e Pressão:

Aplicação do selante em JIG hermético simulando células SOEC, submetido a ciclos térmicos e pressão de 2 bar. Medição de vazamento (He leak test) com hélio e testes de longa duração (500–1000 h) para avaliar durabilidade, fluência e efeito da pressão de fechamento.

Análise Pós-Morte (Post-Mortem Analysis):

Exame da microestrutura e composição das vedações (MEV-EDS), alterações na cristalinidade e fases (DRX) e avaliação da integridade mecânica após os testes.

Materiais avaliados

O papel mica é um material comumente usado para vedação por compressão em conjuntos de células a combustível de óxido sólido, oferecendo excelente resistência térmica, elétrica e à umidade.



Figura 1 – Papel de mica flexível

O feltro de alumina utilizado (SAFS-100 KU 321101) é uma manta cerâmica de baixo teor de sílica, indicada para vedação compressiva em altas temperaturas. Segundo dados do fabricante, o material apresenta cerca de 20 % de compressão sob carga de 0,06 MPa e pode operar continuamente em temperaturas de até 1260 °C.

Equipamento de ensaio

Desenvolvimento do equipamento de teste de compressão

Foi utilizada o equipamento MTS 810 Material Test System, é um sistema servo-hidráulico uniaxial com capacidade de 100 kN para testes de compressão isotérmica. Permite caracterização de selos para SOFC em condições operacionais (800°C, atmosferas redutoras). Integra medição de estanqueidade com gases simulados e quantificação de taxas de vazamento. Demonstra estabilidade temporal de selos de Thermiculite 866 por

~400 horas com vazamentos de 4-6% do fluxo de combustível



Figura 2. Sistema de teste de vedação – MTS 810 Material Test System

Sistema para os testes da compressão à quente (600°C a 800°C):

Para a realização dos ensaios de compressão a quente, foi utilizado o forno **653 Furnace**, da MTS Systems Corporation, acoplado ao sistema empregado nos testes de compressão a frio. Esse equipamento possibilitou o controle preciso da temperatura durante os ensaios, permitindo sua variação e ajuste conforme as condições experimentais estabelecidas. Dessa forma, foi possível realizar os testes nas temperaturas desejadas, garantindo a manutenção das condições térmicas necessárias ao estudo.



Figura 3. Controlador de temperatura utilizado para o monitoramento e ajuste da temperatura durante os ensaios de compressão a quente.



Figura 4. Forno **MTS 653 Furnace** acoplado à máquina universal de ensaios para a realização dos testes de compressão a quente.

Sistema para os testes de vedação à quente:

Para os testes de vedação, foi utilizado um sistema de alimentação gasosa composto por dois cilindros, um contendo oxigênio (O_2) e outro contendo hidrogênio (H_2). O fluxo de cada gás era controlado por um controlador de vazão mássica (*Mass Flow Controller – MFC*), equipamento responsável por regular e manter a vazão dos gases com elevada precisão durante os ensaios.

Após passar pelo controlador de vazão mássica, o gás era direcionado para um medidor de vazão, utilizado para monitorar o fluxo fornecido ao sistema. Adicionalmente, foi empregado um rotâmetro de área variável para confirmar os valores médios de vazão estabelecidos experimentalmente. O medidor de vazão encontrava-se conectado a um manômetro, permitindo o monitoramento contínuo da pressão do sistema. Dessa forma, era possível verificar eventuais quedas de pressão, as quais poderiam indicar a ocorrência de vazamentos e, conseqüentemente, falhas na vedação.

Durante os ensaios, o oxigênio (O_2) foi introduzido pela parte superior do sistema utilizado nos testes de compressão a quente, enquanto o hidrogênio (H_2) foi alimentado pela parte inferior. Essa configuração experimental permitiu avaliar a eficiência da vedação da amostra sob as condições operacionais estabelecidas, por meio da análise da estabilidade da pressão e da ausência de vazamentos entre os compartimentos contendo os diferentes gases.



Figura 5. Montagem experimental utilizada nos ensaios de vedação a quente, acoplada ao forno MTS 653 Furnace.



Figura 6. Controlador de vazão mássica (*Mass Flow Controller – MFC*) utilizado para o ajuste e controle do fluxo dos gases alimentados ao sistema.

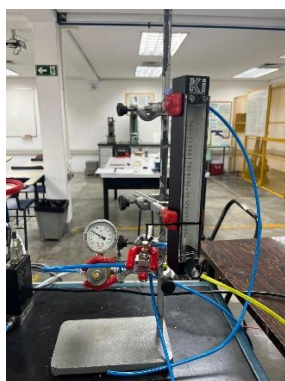


Figura 7. Conjunto composto por rotâmetro de área variável, válvulas de controle e manômetro empregado nos testes de vedação.



Figura 8 – Sistema de controle de pressão.



Figura 9 – Sistema de monitoramento e controle do MTS

Procedimentos de ensaio

Os ensaios de compressão foram realizados em duas condições: à temperatura ambiente (25 °C), com cargas de até 70 MPa, e em alta temperatura (600–800 °C), sob carga de 0,5 kN. Em ambos os casos, a deformação das amostras foi determinada por meio de um relógio comparador, comparando a espessura da amostra antes e depois da aplicação da carga.

O desempenho da vedação foi avaliado por teste de queda de pressão, pressurizando o sistema com ar a 100 psi e registrando a variação ao longo de 1 minuto.

Nos ensaios de vedação a quente, a amostra foi submetida a 20 minutos de estabilização térmica antes da introdução do gás. Em seguida, o oxigênio (O₂) foi introduzido ao sistema e a pressão foi elevada gradualmente entre 0,5 e 2,0 bar, em intervalos de 5 minutos, sendo monitorada continuamente por meio de um manômetro para identificar eventual queda de pressão indicativa de vazamento.

Além da medição da queda de pressão, foi realizado o teste da bolha para identificação visual de vazamentos. O método consiste em submergir a região de vedação em líquido e observar a formação de bolhas. Assim, foi possível localizar pontos de fuga de gás, complementando a análise quantitativa.

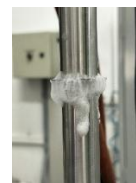


Figura 10– Teste da bolha

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Classificação dos selantes (revisão bibliográfica)

A revisão da literatura permitiu classificar os selantes utilizados em células e eletrolisadores de óxido sólido em três categorias principais. Os selantes rígidos, como os vidro-cerâmicos, apresentam excelente hermeticidade, mas são suscetíveis a fissuras por tensões térmicas decorrentes da diferença de coeficiente de expansão térmica entre os materiais [7,8]; seu desempenho também é sensível à atmosfera de operação [9] e ao primeiro ciclo de aquecimento, que pode alterar suas propriedades mecânicas [10], razão pela qual formulações reforçadas com fibras cerâmicas vêm sendo estudadas para aumentar sua tenacidade [11].

Os selantes compressíveis, como o papel de mica e as mantas de Thermiculate®, toleram melhor variações dimensionais e ciclos térmicos [12,14], graças à estrutura lamelar dos flocos de mica, que confere ao material boa resistência térmica e elétrica [13]; combinações desses materiais com revestimentos vítreos têm sido propostas para aliar a complacência mecânica da mica à hermeticidade do vidro [16].

Já os selantes flexíveis ou complacentes, como as juntas metálicas brasadas [15], a união por fase líquida transiente Ni–Sn [17] e os selos autovedantes obtidos por aspersão térmica [18], são empregados principalmente em células a combustível de óxido sólido suportadas por metal (MS-SOFC). Com base nessa classificação, o

presente trabalho concentrou-se na avaliação de selantes compressíveis (papel de mica flexível e feltro de alumina), por apresentarem o melhor compromisso entre tolerância dimensional e facilidade de aplicação para reatores Co-SOEC pressurizados.

1. Ensaio com papel de mica flexível (25 °C)

1.1 Ensaio de compressão :

Inicialmente, foi realizado um ensaio de compressão com papel de mica flexível, submetido a cargas até 70 MPa. Os resultados mostraram ausência de deformação significativa, evidenciando alta resistência à compressão e estabilidade estrutural do material.



Figura 11 – Papel de mica flexível pós a compressão

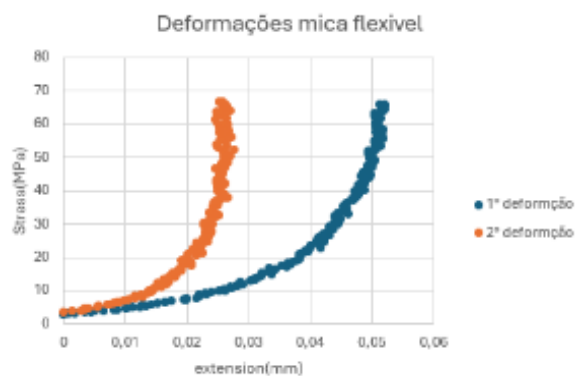


Figura 12 – gráfico da deformação da mica

1.2 Ensaio de vedação :

Com a carga de 10,4 kN, a pressão caiu para 70 psi, indicando vazamentos significativos. Ao aumentar a carga para 20,8 kN, a queda reduziu para 90 psi, melhorando a vedação, mas ainda insuficiente para atender aos requisitos do teste.

O teste da bolha, realizado conforme o procedimento descrito em Materiais e Métodos, confirmou a ocorrência de vazamentos pelos poros do papel de mica, corroborando os resultados obtidos no ensaio de queda de pressão.

2. Ensaio com o feltro de alumina (25°C) :

2.1 Ensaio de compressão:

Ensaio com alumina como selante mostraram deformação maior que a registrada pelo sistema (~0,1 mm), devido ao comportamento plástico do material sob compressão. Parte da deformação ocorreu antes da medição completa. Subtraindo a deformação intrínseca da máquina, foi possível obter um gráfico representando a deformação real da amostra.



Figura 13 – Alumina após o ensaio com deformação significativa

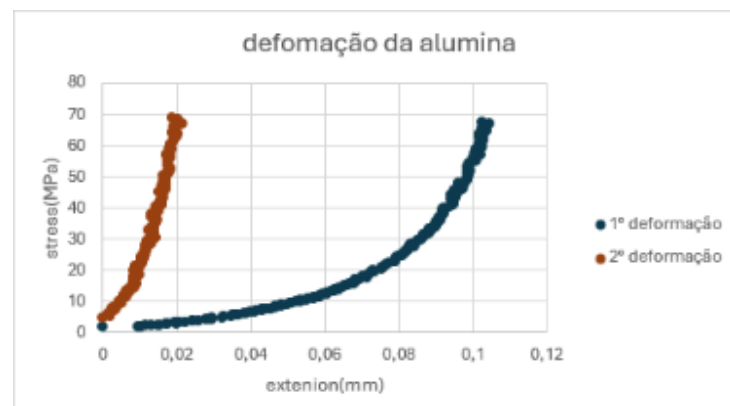


Figura 14 – Gráfico da deformação da alumina

O ensaio foi repetido três vezes com a mesma amostra de alumina até 70 MPa para avaliar sua reprodutibilidade. Observou-se degradação estrutural ao longo dos ciclos, culminando em fratura no terceiro ensaio. Isso indica que, apesar da alta resistência inicial, o material apresenta redução de durabilidade sob compressões repetidas.



Figura 15 - Fragmento da amostra de alumina após a fratura ocorrida ao final dos ciclos de compressão até 70 MPa.



Figura 16 - Parte da amostra de alumina que permaneceu aderida à punção do equipamento de compressão após a fratura do material durante o ensaio.

2.2 Ensaios de vedação:

Após os ensaios de compressão, foram realizados testes de vedação com alumina sob cargas de 2,5 kN e 0,5 kN, avaliando superfícies lisa e rugosa. Em todas as condições, o sistema manteve pressão constante de 100 psi por 1 minuto, sem vazamentos. Os resultados indicam alta eficiência de vedação da alumina, mesmo sob baixas cargas de compressão.



Figura 17 - Não apresentou vazamento

3. Ensaios com a alumina (600 °C-800°C)

3.1 Ensaios de compressão :

Os ensaios de compressão a quente da alumina foram realizados a 800 °C sob carga de 0,5 kN. A deformação da amostra foi avaliada com um relógio comparador, obtendo-se uma espessura média de 0,715 mm na região não compactada e de 0,376 mm na região deformada. A partir dessas medidas, foi calculada uma deformação média de 0,339 mm.



Figura 18. Amostra da alumina após a compressão

3.2 Ensaios de vedação :

Teste 1: O primeiro ensaio de vedação da alumina foi realizado a 600 °C, sob força de compressão de 0,5 kN e pressão de O₂ de 0,5 bar. Após 20 minutos de estabilização térmica, o gás foi introduzido e mantido no sistema por 15 minutos. Ao final do ensaio, a pressão permaneceu constante em 0,5 bar, indicando ausência de vazamentos e comprovando a eficiência da vedação nas condições avaliadas.



Figura 19. Amostra após o ensaio de vedação a 600 °C, realizado em conjunto com o ensaio de compressão. A coloração escura observada na superfície é proveniente de resíduos oriundos das tubulações do sistema experimental e não corresponde a alterações na composição da amostra.

O segundo ensaio de vedação da alumina foi realizado a 800 °C, sob força de compressão de 0,5 kN. Após 20

minutos de estabilização térmica, foi introduzido oxigênio (O₂) e a pressão foi aumentada gradualmente de 0,5 a 2,0 bar em intervalos de 5 minutos. A pressão do sistema foi monitorada continuamente por meio de um manômetro para verificar a ocorrência de vazamentos.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de vedação da alumina a 800 °C

Tempo (min)	Pressão (bar)	Resultado
0–5	0,5	Não houve vazamento
5–10	1,0	Não houve vazamento
10–15	1,5	Não houve vazamento
15–20	2,0	Não houve vazamento

Os resultados mostraram que não houve queda de pressão em nenhuma das condições avaliadas, indicando que a vedação permaneceu eficiente mesmo com o aumento da pressão até 2,0 bar.



Figura 20. Amostra após os testes de vedação

4. Ensaios com a mica flexível (800 °C)

4.1 Ensaios de compressão :

Os ensaios de compressão a quente da mica flexível foram realizados a 800 °C. A deformação foi avaliada por meio de um relógio comparador, sendo obtida uma espessura média de 0,59 mm tanto na região não compactada quanto na região submetida à compressão. Esses resultados indicam ausência de deformação mensurável, demonstrando que a mica manteve sua estabilidade dimensional e integridade estrutural mesmo quando submetida às mesmas forças de compressão utilizadas nos ensaios a frio.

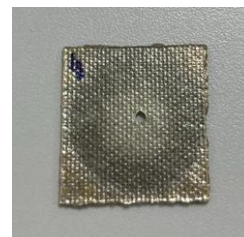


Figura 21. Amostra de mica após o teste de compressão

4.2 Ensaios de vedação :

Os ensaios de vedação da mica flexível foram realizados a 800 °C e sob força de compressão de 0,5 kN. Após 20 minutos de estabilização térmica, foi introduzido O₂, variando-se a pressão entre 0,5 e 2,0 bar. A pressão foi

monitorada por meio de um manômetro para avaliar a ocorrência de vazamentos.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de vedação da mica flexível a 800 °C

Pressão (bar)	Início vazamento	do Tempo para pressão zerar	Resultado
0,5	Não observado	Não ocorreu	Não houve vazamento
1,0	2 min 20 s	3 min 15 s	Houve vazamento
1,5	1 min 40 s	2 min 35 s	Houve vazamento
2,0	20 s	1 min 20 s	Houve vazamento

A mica flexível apresentou vedação eficiente apenas a 0,5 bar. Para pressões superiores, foram observados vazamentos progressivamente mais rápidos, indicando que o aumento da pressão acelera a perda de gás. Assim, embora a mica tenha mantido sua estabilidade dimensional, sua eficiência de vedação mostrou-se limitada para pressões acima de 0,5 bar.

Esse comportamento sugere que a baixa eficiência de vedação da mica esteja relacionada à sua elevada rigidez estrutural: por não se deformar sob compressão, o material não consegue preencher completamente as irregularidades da superfície de contato, dificultando a formação de uma interface hermética — diferentemente da alumina, cuja deformação plástica favorece o fechamento de poros e imperfeições superficiais. Estudos futuros poderão investigar essa hipótese por meio de análises de rugosidade superficial e de microscopia da interface de vedação.

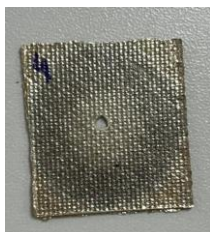


Figura 22. Amostra de mica flexível após o teste de vedação

5. Ensaio com a célula combustível de zircônia

5.1 Teste 1

Foi utilizada uma célula de zircônia (ZrO_2) com uma pequena elevação central para melhorar o contato elétrico. A montagem experimental foi composta por quatro placas de alumina ($2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm} \times 0,7 \text{ mm}$) e dois coletores de corrente de níquel. Os coletores foram conectados a um multímetro para a medição da diferença de potencial gerada pela célula. A sequência de montagem foi: alumina, coletor de níquel, alumina, célula de zircônia, alumina, coletor de níquel e alumina.

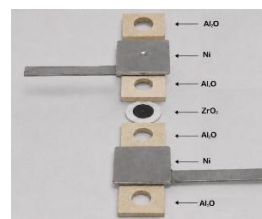


Figura 23. Montagem da célula

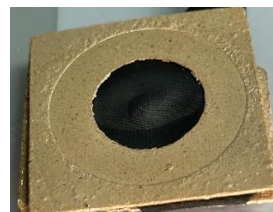


Figura 24. Elevação superficial na célula

A célula SOFC foi operada a 800 °C sob força de fechamento de 0,5 kN, com alimentação simultânea de O_2 na parte superior e H_2 na parte inferior. O oxigênio foi reduzido a íons O^{2-} no cátodo, que atravessaram o eletrólito de zircônia e reagiram com o hidrogênio no ânodo, formando água e liberando elétrons. Os elétrons percorreram o circuito externo, permitindo a conversão da energia química dos reagentes em energia elétrica. A reação global da célula foi: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$.



Figura 25. Célula montada no sistema de compressão a 800°C

Durante os ensaios não foi observada diferença de potencial no multímetro devido à ruptura dos coletores de corrente de níquel causada pela exposição a 800 °C. A falha comprometeu a condução dos elétrons até o circuito externo, impossibilitando a medição da tensão gerada pela célula.

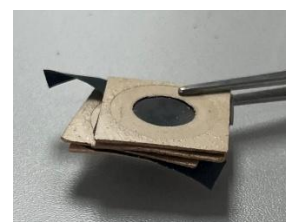


Figura 26. Célula após o ensaio

5.2 Teste 2

Foi desenvolvida uma nova configuração de montagem da SOFC operando a 800 °C, utilizando placas de alumina, placas e discos de níquel, além de uma célula de zircônia posicionada na região central. Os coletores de níquel foram substituídos por fios de platina isolados com miçangas cerâmicas, visando melhorar o contato elétrico

e evitar curtos-circuitos. Com essa configuração, foi possível medir a tensão gerada pela célula, comprovando seu funcionamento eletroquímico. Entretanto, foram observadas oscilações nos valores registrados pelo multímetro, possivelmente relacionadas a variações no contato elétrico entre os componentes. As dimensões dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões dos componentes da nova montagem

Componente	Dimensões
Bolinha de níquel (fina)	Diâmetro: 14 mm; Espessura: 0,08 mm
Bolinha de níquel (grossa)	Diâmetro: 14 mm; Espessura: 0,14 mm
Placa de alumina (Al_2O_3)	25 mm $\times$ 25 mm; Espessura: 0,7 mm
Placa de níquel (Ni)	25 mm $\times$ 25 mm; Espessura: 0,1 mm

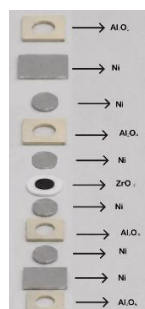


Figura 27. Montagem da célula

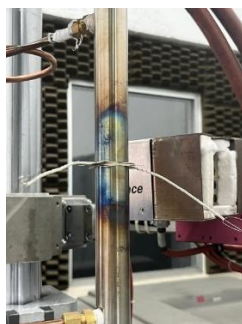


Figura 28. Célula no sistema



Figura 29. Voltagem registrada pelo multímetro



Figura 30. Célula após o teste

CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o comportamento mecânico e a eficiência de vedação da alumina e da mica flexível para aplicações em sistemas SOFC/SOEC, além de validar experimentalmente a operação de uma célula a combustível de zircônia em altas temperaturas.

Os resultados mostraram que a alumina apresentou melhor desempenho de vedação, mantendo a estanqueidade do sistema mesmo a 800 °C e pressões de até 2,0 bar, embora tenha sofrido deformação durante os ensaios de compressão. Em contrapartida, a mica flexível apresentou elevada estabilidade dimensional, sem deformação mensurável, porém sua eficiência de vedação foi limitada a pressões de até 0,5 bar.

Nos ensaios com a célula SOFC, a primeira configuração utilizando coletores de níquel não permitiu a medição da tensão devido à degradação do material em alta temperatura. Após a substituição por fios de platina isolados, foi possível obter diferença de potencial elétrica, comprovando a ocorrência das reações eletroquímicas e o funcionamento da célula. Apesar das oscilações observadas nas medições, os resultados demonstraram a viabilidade da montagem experimental e da geração de energia elétrica a partir da reação entre hidrogênio e oxigênio.

De modo geral, a alumina mostrou-se mais promissora como material de vedação, enquanto a mica flexível destacou-se pela estabilidade mecânica. Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de sistemas SOFC/SOEC mais eficientes e fornecem uma base para estudos futuros envolvendo durabilidade, ciclos térmicos e otimização dos materiais e da montagem da célula. A limitação de vedação observada na mica parece estar associada à sua elevada rigidez, que impede a deformação necessária ao fechamento hermético da interface — o que sugere que selantes híbridos, combinando a deformabilidade da alumina com a estabilidade dimensional da mica, sejam uma direção promissora para trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

CNPq, FEL, CIMATEC, UNICAMP.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2022. Paris: IEA, 2022.
- [2] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen Program Plan. Washington, D.C., 2021.

- [3] SINGH, K.; WALIA, T. Review on silicate and borosilicate-based glass sealants and their interaction with components of solid oxide fuel cell. *International Journal of Energy Research*, v. 45, n. 15, p. 20559–20582, 2021.
- [4] ANJANA, P. S. et al. Glasses and glass-ceramics as sealants in solid oxide fuel cell applications. In: *Energy Materials*. Elsevier, 2021. p. 373–404.
- [5] FERGUS, J. W. Sealants for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, v. 147, n. 1–2, p. 46–57, 2005.
- [6] FALLAH VOSTAKOLA, M.; AMINI HORRI, B. Progress in material development for low-temperature solid oxide fuel cells: A review. *Energies*, v. 14, n. 5, p. 1280, 2021.
- [7] GUO, M. et al. Feldspar-based CaO–K₂O–Na₂O–BaO silicate glass sealant for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, v. 47, n. 10, p. 14630–14634, 2021.
- [8] SETYAWAN, I. et al. Progress in glass-ceramic seal for solid oxide fuel cell technology. 2021.
- [9] KRAINOVA, D. A. et al. Long-term stability of SOFC glass sealant under oxidising and reducing atmospheres. *Ceramics International*, v. 47, n. 7, p. 8973–8979, 2021.
- [10] RAUTANEN, M. et al. Effects of the first heat up procedure on mechanical properties of solid oxide fuel cell sealing materials. *Journal of Power Sources*, v. 284, p. 511–516, 2015.
- [11] TORUNTAY, F. et al. Fabrication of glass ceramic sealants with ceramic fiber filler for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, v. 48, n. 3, p. 3779–3789, 2022.
- [12] NGUYEN, X.-V. et al. Study of sealants for SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 46, p. 21812–21819, 2016.
- [13] XANTHOS, M. Mica flakes. Functional fillers for plastics, p. 149, 2005.
- [14] HOYES, J. R.; RAUTANEN, M. SOFC sealing with thermiculite 866 and thermiculite 866 LS. *ECS Transactions*, v. 57, n. 1, p. 2365, 2013.
- [15] LEE, S. et al. Reliable sealing design of metal-based solid oxide fuel cell stacks for transportation applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 57, p. 30280–30292, 2019.
- [16] RAUTANEN, M. et al. Glass coated compressible solid oxide fuel cell seals. *Journal of Power Sources*, v. 247, p. 243–248, 2014.
- [17] CAO, J. et al. A low-temperature sealing method for metal-supported oxide fuel cell applications: Ni–Sn transient liquid phase bonding. *Vacuum*, v. 187, p. 110048, 2021.
- [18] GAO, J.-T. et al. Performance and stability of plasma-sprayed 10×10 cm² self-sealing metal-supported solid oxide fuel cells. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 30, p. 1059–1068, 2021.
- [19] NIEKRASZEWICZ, G. S. et al. Bibliographic analysis of compressive sealants for metal supported solid oxide fuel cells and electrolyzers. In: *SIINTEC (XI)*. Anais do SIINTEC. Salvador, BA, 2025. ISSN 2764-5886.