

RECICLAGEM DE CATALISADORES AUTOMOTIVOS PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

RECYCLING OF AUTOMOTIVE CATALYSTS FOR HYDROGEN PRODUCTION

Luis Felipe Araujo Dornellas¹
Thiago Araujo Simões²

RESUMO

A descarbonização é o processo de redução de emissões de carbono na atmosfera. Seu objetivo é alcançar uma economia global com emissões reduzidas para conseguir a neutralidade climática através da transição energética. O hidrogênio verde tem surgido como um vetor alternativo de energia com zero pegada de carbono. Sendo ele produzido através de eletrolise da água, necessita de eletrodos nobres como Ru, Pt e Ir para produzir H₂ consumindo um mínimo de energia. Por serem metais nobres e escassos na natureza, vários trabalhos têm buscado melhorias materiais para eletrodos mais baratos. Estratégias como aumento do número de sites ativos e dopagens tem sido usado com frequência para produzir electrocatalisadores. Os catalisadores automotivos são confeccionados com metais preciosos, e sua reciclagem para utilização como eletrodos pode ser viabilizada com tratamentos electroquímicos e mecanoquímicos. Neste relatório, pulverizamos os catalisadores automotivos em tamanho micrométrico e analisamos morfológica e quimicamente. Mostramos aqui regiões com até 10% de Pt no catalisador, tornando-o então um promissor catalisador para produção de H₂. Desta forma, produzimos um eletrodo de catalisador automotivo utilizando uma base de espuma níquel, que será testado nos próximos ensaios medindo suas características e fazendo comparações em relação ao necessário para produção de H₂.

Palavras-chave: catalisador automotivo; reciclagem; energia renovável; produção de hidrogênio.

ABSTRACT

Decarbonization is the process of reducing carbon emissions in the atmosphere. Its goal is to achieve a global economy with reduced emissions to attain climate neutrality through energy transition. Green hydrogen has emerged as an alternative energy vector with zero carbon footprint. Since it is produced through water electrolysis, it requires noble electrodes such as Ru, Pt, and Ir to produce H₂ while consuming minimal energy. As these are noble metals and scarce in nature, several studies have been seeking material improvements for cheaper electrodes. Strategies such as increasing the number of active sites and doping have been frequently used to produce electrocatalysts. Automotive catalysts are made with precious metals, and their recycling for use as electrodes can be enabled through electrochemical and mechanochemical treatments. In this report, we pulverized automotive catalysts to micrometric size and analyzed them morphologically and chemically. We show here regions with up to 10% Pt in the catalyst, making it a promising catalyst for H₂ production. Thus, we

¹ Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

² Doutor em Engenharia Mecânica - Universidade de Leeds, 2015.

produced an automotive catalyst electrode using a nickel foam base, which will be tested in upcoming assays for H₂ production.

Keywords: automotive catalyst; recycling; renewable energy; hydrogen production.

INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis têm sido os recursos energéticos mais utilizados desde que descobertos, e são utilizados nos mais diversos setores: industrial, transportes, uso doméstico e muitos outros. Os combustíveis fósseis são importantes por várias razões, tais como fonte de energia, já que eles fornecem a maior parte da energia utilizada em todo o mundo para alimentar veículos, gerar eletricidade e aquecer casas e edifícios. Acessibilidade e confiabilidade, pois os combustíveis fósseis são relativamente fáceis de extrair e transportar, tornando-os uma fonte de energia acessível em muitas partes do mundo. Além disso, eles têm uma infraestrutura bem estabelecida para extração, transporte e distribuição. Eles também contribuem para a economia, já que a indústria de combustíveis fósseis é uma grande fonte de empregos e receitas em muitos países, e suas operações sustentam muitas outras indústrias (Pandey *et al.*, 2019).

Porém a sua utilização emite para a atmosfera CO₂ que é o principal causador do efeito de estufa no planeta terra, pela consequente diminuição da camada de Ozônio. Eles também possuem impactos sociais e de saúde: A extração de combustíveis fósseis muitas vezes tem impactos negativos nas comunidades locais, incluindo deslocamento de pessoas, destruição de habitats naturais e riscos para a saúde devido à exposição a produtos químicos tóxicos (Liu *et al.*, 2018). Uma outra preocupação importante é que estes recursos energéticos são finitos, e se crê que em breve extinguirão. Portanto, embora os combustíveis fósseis desempenhem um papel importante na

economia global, é crucial buscar alternativas mais sustentáveis e limpas de energia para mitigar os impactos negativos associados ao seu uso. Nesse cenário, o uso do Hidrogênio como combustível surge como uma ótima oportunidade (Silva *et al.*, 2022).

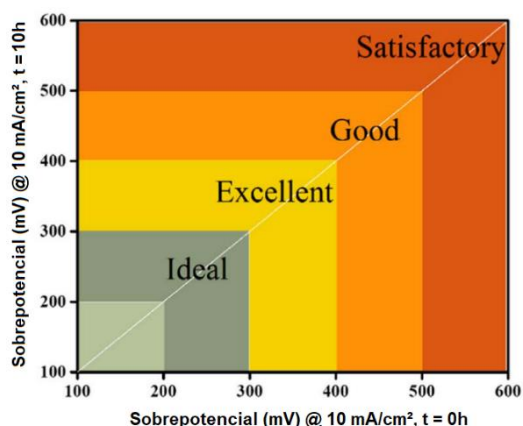
O hidrogênio é conhecido como o elemento mais abundante no universo, correspondendo por cerca de 75% de sua massa conhecida. No planeta, ele não é achado facilmente na sua forma mais pura (H₂), sendo encontrado combinado com outros elementos químicos para formar moléculas como água, hidrocarbonetos, gás natural, etc.; porém, para ser aproveitado como fonte de energia, ele deve estar na sua forma pura gasosa ou líquida (Chen *et al.*, 2017). O hidrogênio é o combustível que possui a maior quantidade de energia por unidade de massa, com um poder calorífico (PC) de 142 KJ g⁻¹, o que é cerca de 2 a 3 vezes maior do que a fornecida por outros combustíveis a base de petróleo (gasolina, diesel, biodiesel, metanol, etanol, gás natural e gás liquefeito de petróleo) (Suleman *et al.*, 2015). Em sua combustão, o hidrogênio libera água como produto, o que o torna uma excelente fonte de energia ambientalmente amigável em todos os sentidos, ou seja, desde a sua obtenção até o seu uso, ele pode apresentar zero ou quase nenhuma emissão de poluentes. Por essas razões, o hidrogênio é considerado como o combustível do futuro, e a principal fonte de energia para o próximo século (Veras *et al.*, 2017), estando a um passo dos combustíveis fósseis e avançando em direção a um cenário energético neutro em carbono.

A produção de H₂ verde a partir da divisão eletrocatalítica da água consiste em duas meias-células, incluindo uma Reação

de Evolução do Hidrogênio (HER) e uma Reação de Evolução do Oxigênio (OER) (Raimundo *et al.*, 2020). Tradicionalmente, metais nobres, como catalisadores de óxidos à base de Pt e Ir/Ru, são os catalisadores ideais devido à sua eficiente transferência de elétrons e estabilidade; No entanto, estes catalisadores têm sido limitados para aplicações industriais devido às suas baixas reservas e alto custo (Anantharaj *et al.*, 2018).

A OER é uma reação fundamental para vários dispositivos e tecnologias relacionadas à geração e armazenamento de energia, logo, os pesquisadores têm se debruçado sobre o estudo de catalisadores para essa reação. Em relação ao sobrepotencial, de acordo com (Tahir *et al.*, 2017), um catalisador pode ser classificado em função da energia gasta (η (mV)) para gerar uma densidade de corrente (j) de 10 mA cm⁻² durante o mínimo de 10 h de operação. Dessa forma, a classificação se dá como a seguir: catalisadores ideais (200–300 mV), excelentes (300–400 mV), bons (400–500 mV) e satisfatórias (além de 500 mV), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos catalisadores para a OER, com base no seu valor de sobrepotencial (η) para gerar 10 mA cm⁻² no intervalo de 10 h de operação.



Fonte: adaptada de Tahir *et al.*, 2017.

Os catalisadores automotivos são dispositivos críticos para reduzir as emissões de poluentes dos motores a combustão interna, convertendo gases

nocivos em substâncias menos prejudiciais. Geralmente contêm metais preciosos, como platina, paládio e ródio, que servem como catalisadores para as reações químicas, onde esses metais são usados para ativar a reação química entre o hidrogênio e o outro composto (Batista *et al.*, 2013). Essa ativação da reação química pode ser feita através da eletrólise. A eletrólise da água pode ser usada para produzir hidrogênio, e quando associada a alguma energia alternativa (eólica ou solar), temos o hidrogênio verde, produzido com zero pegada de carbono (Hu *et al.*, 2019). Isso é relevante em aplicações que buscam armazenar energia em forma de hidrogênio para uso posterior, especialmente em sistemas de energia renovável. Porém esses metais (platina, ródio e paládio) são caros e, portanto, a reciclagem dos catalisadores é economicamente viável e ecologicamente benéfica.

A reciclagem de catalisadores automotivos não apenas contribui para a preservação de recursos naturais e a redução do impacto ambiental, mas também ajuda a evitar a extração adicional de metais preciosos, que muitas vezes é um processo prejudicial ao meio ambiente. A reciclagem de catalisadores é fundamental para a indústria do hidrogênio, pois os catalisadores são essenciais para as reações químicas que ocorrem nos processos de produção (Meguerian *et al.*, 1977). A recuperação e regeneração eficientes desses catalisadores contribuem para a sustentabilidade e economia de custos na produção de hidrogênio, um combustível limpo e versátil utilizado em várias aplicações, incluindo células de combustível e processos industriais. Além disso, a reciclagem reduz a dependência de recursos naturais e minimiza os resíduos associados a catalisadores descartados (Shelef *et al.*, 2000).

OBJETIVOS

Este plano de trabalho visa testar o reaproveitamento de catalisadores automotivos para formação de fibras eletrocatalíticas na reação de evolução do hidrogênio (HER).

Tendo em vista a obtenção de pó com baixa granulometria através do processamento de catalisadores automotivos; Caracterização dos pós obtidos via morfologia das fibras via microscopia de varredura de elétrons (MEV), análise química via Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS) e cristalográfica por Difração de Raio X (DRX); Redução dessa granulometria até tamanhos micrométricos ou nanométricos; Produção de eletrodos a base dos pós obtidos; Testes para desempenho eletroquímico dos eletrodos para HER.

METODOLOGIA

Moagem dos Catalisadores

Os catalisadores automotivos foram moídos em um moinho de facas no CETEM (RJ) e reduzidos a partículas micrométricas. O pó foi analisado via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) modelo TESCAN 3 (Fig.2), e por Difração de Raios X (DRX) modelo D8 ADVANCE da Bruker (Fig.3). O MEV em modo elétron secundário analisa a morfologia das amostras, enquanto o EDS caracteriza elementos presentes e o DRX as fases cristalinas.

Figura 2 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) modelo TESCAN 3.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 3 – Equipamento de difração de Raios X (DRX) modelo D8 ADVANCE da Bruker.



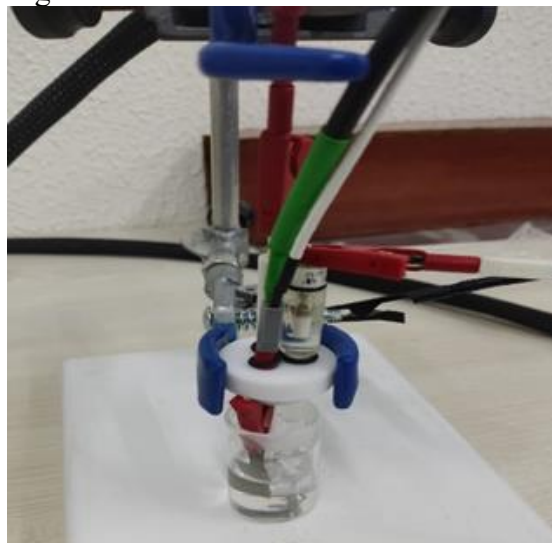
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Preparação das Soluções e Eletrodos

Foram preparadas 3 soluções (HCl 6M, KOH 0,1M e KOH 1M). Após preparadas as soluções, cortamos amostras de Espuma Ni (Ni 99,8% com porosidade maior que 95%) com dimensões de 1x1cm e com haste de trabalho de 2,5 cm. Com as amostras já cortadas, preparamos sua limpeza para retirada das impurezas. O método de limpeza consistiu em imergir a espuma, primeiramente, na solução de HCl 6M e levar ao sonicador por 10 minutos, ao final dos 10 minutos retirou-se a amostra da solução e esperou secar, após a secagem, mergulhou-se a amostra em acetona e levou-se ao sonicador por 10 minutos novamente. Repetiu-se o processo de secagem e novamente levou-se ao sonicador para o último ciclo da limpeza, dessa vez a amostra estava mergulhada em água deionizada.

Após a limpeza secamos a amostra em temperatura ambiente dentro de um recipiente a vácuo durante um dia, então a amostra foi levada ao potenciostato para serem feitos alguns testes. As medidas eletroquímicas foram realizadas utilizando um potenciostato com um módulo de impedância acoplado (UFRPE). Os ensaios ocorreram no laboratório de corrosão da UFRPE usando 0,1 ou 1 M de KOH como eletrólito. A configuração padrão de três eletrodos da célula eletroquímica foi adotada, sendo platina e Ag/AgCl usados como contraeletrodo e eletrodo de referência, respectivamente. A amostra espuma-Ni foi fixada no potenciômetro numa posição em que ficasse exatamente em frente ao eletrodo de trabalho.

Figura 4 – Célula com três eletrodos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nesse primeiro teste foi medida a impedância da amostra (ainda sem adição do catalisador automotivo para se ter uma referência de valores de trabalho da amostra) através da EIS (espectroscopia de impedância eletroquímica). O eletrodo foi polarizado numa faixa de potencial de 1,15 e 1,75mV vs RHE, utilizando a faixa de frequência de 0,01Hz -10kHz. A resistividade esperada era de 0,5 e 2 Ohm (quanto mais baixo, melhor). Os espectros de impedância foram analisados usando um modelo de circuito equivalente e um procedimento não-linear de encaixe por mínimos quadrados implementado no software Z-View. Todos os potenciais medidos (com iR_s corrigido) foram convertidos para o Eletrodo de Hidrogênio Reversível (RHE) usando a equação de Nernst (Equação 1) (Chauhan *et al.*, 2017):

$$E_{RHE} = E_{Ag/AgCl} + 0,059 pH + 0,1976 \quad (1)$$

Onde pH = 13,6 para 1M KOH, e pH= 12,55 para 0,1M KOH.

E corrigidos para queda ôhmica utilizando a resistência medida por impedância no gráfico de Nyquist pela equação 2:

$$E_{RHE,iR} = E_{RHE} - iR \quad (2)$$

Os valores de sobrepotencial (η) foram calculados usando a equação 3:

$$\eta = E_{RHE,iR} - 1,23 V \quad (3)$$

A análise de Tafel foi realizada dos resultados das curvas de LSV para o estudo da cinética dos catalisadores, com base na equação de Tafel (Equação 4) (Kwak et al., 2017).

$$\eta = \alpha + b \log(i) \quad (4)$$

Onde η é o sobrepotencial, α é uma constante, $b = \eta / \log(i)$ é o slope de Tafel (mV dec⁻¹), i é a densidade de corrente.

Para o segundo teste realizou-se a preparação de outra amostra, onde novamente realizou-se o processo de limpeza da espuma-Ni com as 3 soluções (HCl, acetona e água deionizada) no sonicador com o tempo de cada ciclo de 10 minutos. Para a fabricação dos eletrodos de trabalho, tintas catalíticas foram preparadas misturando 5 mg do catalisador (catalisador automotivo), em uma solução contendo 20 μ L de Nafion e 500 μ L de isopropanol. Em seguida, a tinta homogênea foi depositada de forma lenta para ter a maior quantidade de aproveitamento usando uma pipeta sob o substrato limpo de Espuma-Ni, e seco à temperatura ambiente por 5 h para formar o eletrodo de trabalho. O peso da Espuma-Ni medido antes da deposição da tinta homogênea e foi de 0.05g.

Figura 5 – Pesagem do catalisador utilizado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

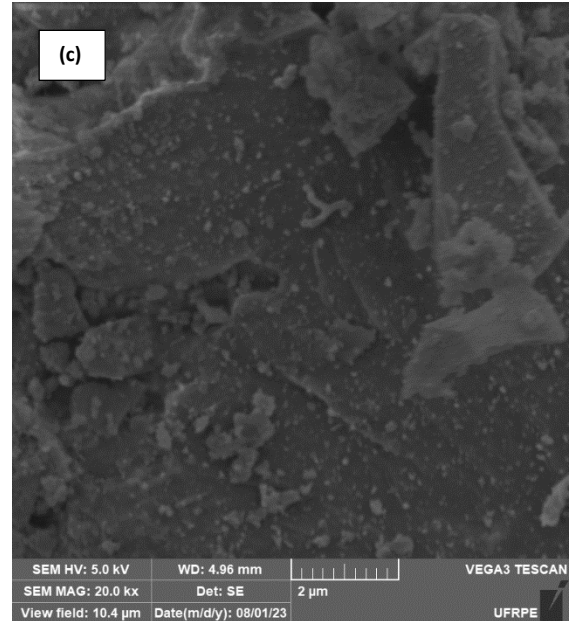
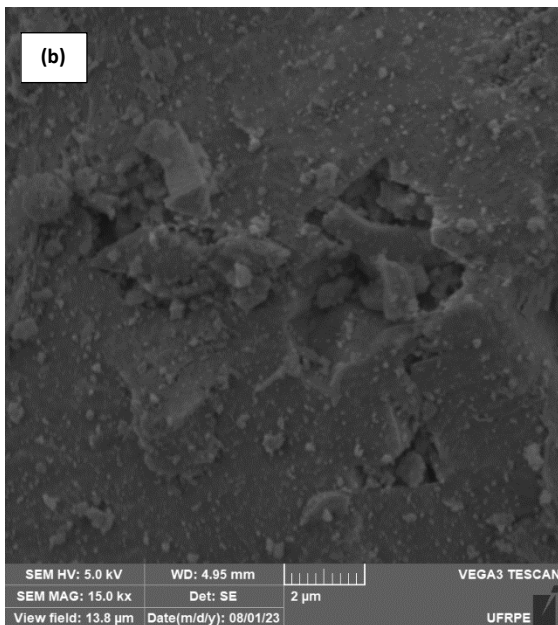
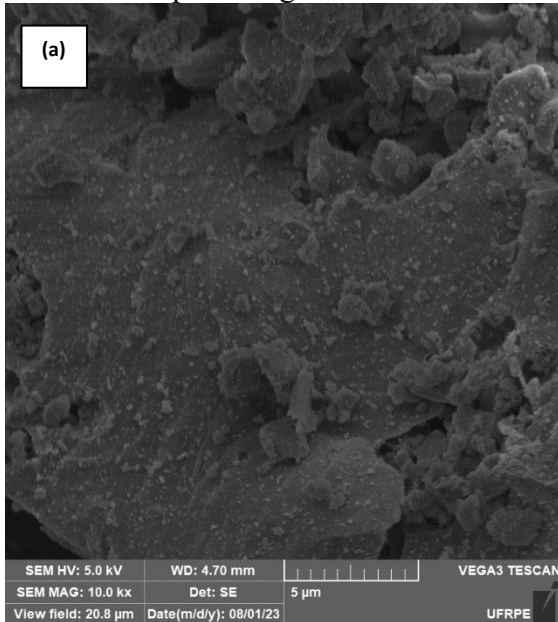
Foram realizados testes de cronoamperometria (CA) na célula catalítica tendo como objetivo monitorar e verificar a estabilidade da corrente elétrica ao longo do tempo fixando um potencial e aplicando-o no sistema, o teste foi realizado em um período de 15h com potencial aplicado de 10mV.

Foi realizado testes de voltametria cíclica (CV) para determinar a capacitância da dupla camada elétrica (C_{DL}) com intuito de avaliar a eficiência do catalisador assim como comparar o desempenho da espuma de níquel após a deposição da tinta catalítica, o teste foi realizado fixando o potencial dentro de um range de 5mV-200mV.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 6 mostra os catalisadores pós moagem reduzidos a particulados com tamanho variável, desde partículas na escala sub-micrométrica até grandes partículas em torno de 20 μ m. O grande faixa de tamanho de partícula é característica do processo de moagem.

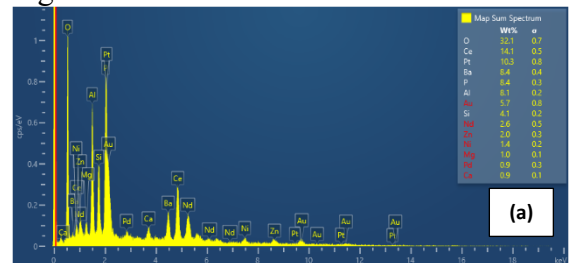
Figura 6 – Imagens de MEV por elétron secundário com 3 magnificações (a) 10k, (b) 15k e (c) 20k dos catalisadores automotivos pós moagem.

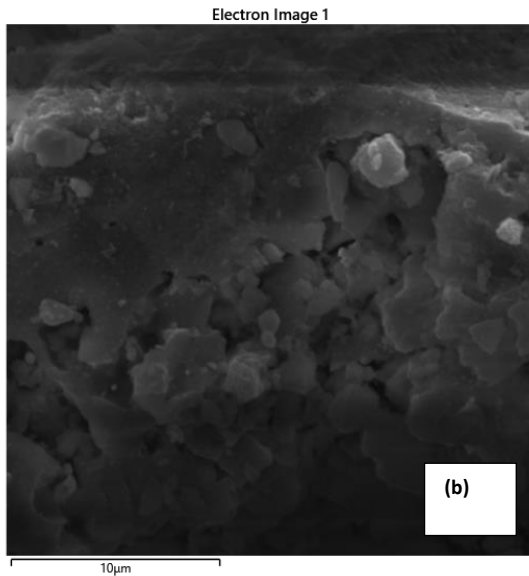


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Fig. 7 mostra o EDS realizado em uma região da amostra. Nessa região foram encontrados principalmente oxigênio, céria e platina. O percentual de platina encontrado (10,3%) é muito superior aos utilizados em estudos para eletrodos de OER e HER, onde os mesmos utilizam estratégias de dopagem com platina (Ninggui et al., 2022 e Zhixin et al., 2022). Tal resultado mostra o quão promissor os catalisadores automotivos podem ser nesta área.

Figura 7 – (a) EDS nos catalisadores automotivos pós moagem e (b) MEV da região analisada.

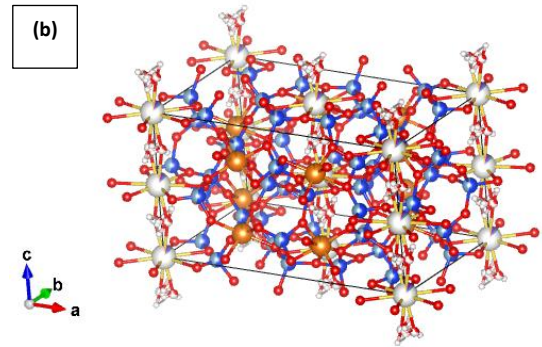
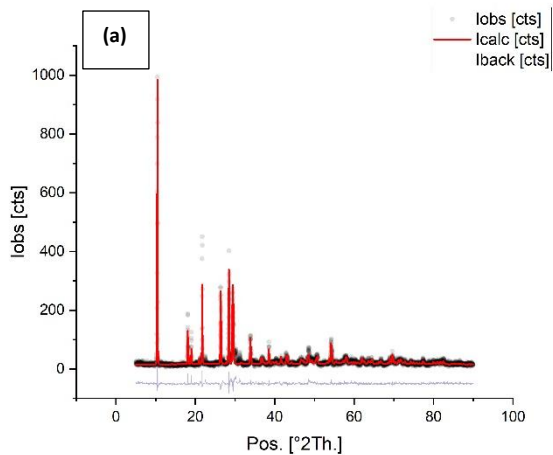




Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Fig. 8 mostra o difratograma do catalisador automotivo e o refinamento de Rietveld com base na carta da Cordierita (American Mineralogist Crystal Structure Database – AMCSD 0556). A carta apresenta um grupo espacial ortorrômbico, e foi refinada com GoF 1,56. Carlos *et al*, (2013) observou em seu estudo que, tanto no catalisador virgem como no usado, os picos mais intensos estão associados à matriz de cordierita e que todos os metais nobres, isto é, Pt, Pd e Rh, se apresentam tanto na forma de óxidos como na forma metálica.

Figura 8 – (a) Difratograma do catalisador automotivo moído e (b) estrutura da Cordierita.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Tab. 1 mostra uma comparação entre os parâmetros de rede da carta com os do experimento, demonstrando contração e expansão dos parâmetros a e b.

Tabela 1 - Comparação de Parâmetros de Rede

	Parâmetros de Rede					
	a	b	c	alp ha	be ta	gam ma
AMCSD 0556	17,0 79	9,73 0	9,3 56	90	90	90
Refinam ento	9,73 9	17,0 56	9,3 51	90	90	90

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os catalisadores foram depositados nas espumas (Fig.9) através de uma solução de Nafion, sendo então pesados antes e depois da secagem do mesmo para verificação de massa depositada.

Figura 9 – Catalisadores depositados na espuma de níquel constituindo o eletrodo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os primeiros gráficos de sobrepotencial foram realizados para a espuma de Níquel, que foram corrigidos para compensar a queda ôhmica e convertidos para o eletrodo padrão de Hidrogênio. Utilizando o ZView, um circuito equivalente foi modelado, onde pudemos estimar a resistência da solução ($iR_{Drop} = 1,37$), um elemento resistivo e um de fase constante, referentes a interface do eletrodo com a solução. Os resultados estão na tabela abaixo.

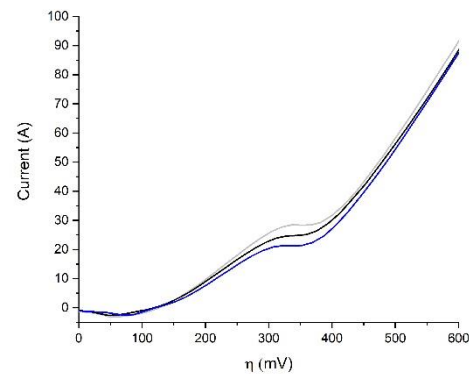
Tabela 2 - Tabela de Circuito Equivalente da Impedância.

Element	Freedom	Value	Error	Error %
R_s	Free (\pm)	1,371	0,051799	3,7782
R_p	Free (\pm)	1E20	1E20	100
CPE1-T	Free (\pm)	0,0031282	7,9874E-5	2,5534
CPE1-P	Free (\pm)	0,76444	0,0065164	0,85244

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados foram realizados em triplicata e foram similares ao encontrados na literatura, com sobre potencial @50mA de 500 mV. Pode-se ver uma região Faradaica com pico de oxidação ente 100 mV a 400mV.

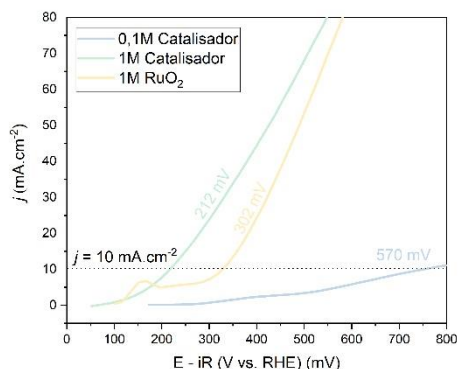
Figura 10 – Curva de sobrepotencial para a espuma de níquel.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados dos testes com a deposição de 10 mg do catalisador depositado foi de @10mA de 212 mV. Conforme a Fig. 11, temos o valor dentro de uma região não faradaica e do ideal em catalisadores para reação de evolução de hidrogênio.

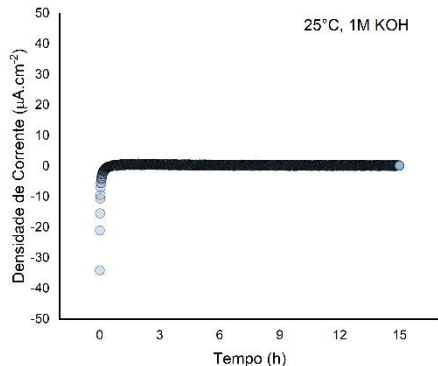
Figura 11 – Curva de sobrepotencial para a espuma de níquel com deposição de 10mg do catalisador automotivo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A fig. 12 mostra como se comportou a nossa amostra durante 15 horas aplicando um potencial no teste de cronoamperometria (CA).

Figura 12 – Curva de densidade de corrente x tempo para a espuma de níquel.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pode-se observar que não apresenta variações de densidade de corrente durante grande parte do tempo. Então não há formação de camadas passivantes durante os testes de cronoamperometria

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Encontrar por volta de 10% de Pt em regiões dos catalisadores automotivos foi animador, tendo em vista que dopagens com menos de 1% já melhoram os

resultados eletrocatalíticos de materiais não nobres, porém esse resultado varia dependendo da região trazendo problemas de repetibilidade como encontramos ao realizar o teste diversas vezes seguindo o mesmo protocolo.

Os resultados obtidos de sobrepotencial para a espuma de Níquel com a tinta catalítica aplicada foram satisfatórios, tendo testes com valores dentro de uma região não faradaica e até superior ao experimento com um material benchmark que é o óxido de rutênio (RuO_2) diante disto, podemos afirmar que a utilização do catalisador automotivo traz uma ótima possibilidade como material alternativo para avanços na diminuição dos gastos para produção de hidrogênio verde.

Resultados obtidos da estabilidade do nosso catalisador também foram animadores visto que essa estabilidade traz consigo uma confiabilidade do material em que se pode realizar diversos testes sem perder a amostra.

Estudos mais aprofundados para diminuir o range da variação do sobrepotencial é uma opção interessante visando obter uma repetibilidade na utilização desse material.

Testes com a espuma de Níquel indicaram que nossos protocolos estão de acordo com a literatura, nos dando a possibilidade de seguir com os testes.

REFERÊNCIAS

- ANANTHARAJ, S.; EDE, S. R.; KARTHICK, K.; SANKAR, S. S.; SANGEETHA, K.; KARTHIK, P. E.; KUNDU, S. Precision and correctness in the evaluation of electrocatalytic water splitting: revisiting activity parameters with a critical assessment. **Energy & Environmental Science**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 744–771, 2018. Disponível em: <https://waseda.elsevierpure.com/en/publications/precision-and-correctness-in-the->

evaluation-of-electrocatalytic-w. Acesso em: 19 maio 2024.

BATISTA, Carlos Henrique; ACHILLES, J. B. Dutra. Characterization of virgin and used automobile catalysts aiming at precious metals recycling. **Revista Materia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p.1451-1458, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/269597743_Caracterizacao_de_catalisadore_s_automotivos_novos_e_usados_visando_a_reciclagem_dos_metas. Acesso em: 19 maio 2024.

CHEN, Y.-P.; BASHIR, S.; LIU, J. L. **Nanostructured materials for next-generation energy storage and conversion: protovoltaic and solar energy**. Berlim: Springer, 2017. Disponível em: https://emdp.ustc.edu.cn/_upload/article/files/fb/6c/a0bfd9044ce69fc42c0666266d77/4f3952cd-ff20-4adb-95bf-8bc4e50972a9.pdf. Acesso em: 19 maio 2024.

HU, C.; ZHANG, L.; GONG, J. Recent progress made in the mechanism comprehension and design of electrocatalysts for alkaline water splitting. **Energy & Environmental Science**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 2620–2645, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W2954281353>. Acesso em: 19 maio 2024.

LIU, Y.; XIAO, C.; HUANG, P.; CHENG, M.; XIE, Y. Regulating the Charge and Spin Ordering of Two-Dimensional Ultrathin Solids for Electrocatalytic Water Splitting. **Chem**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 1263–1283, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451929418300676>. Acesso em: 19 maio 2024.

LIU, Zhixin; GUO, Zhengang; HE, Hailong; ZHANG, Yuling; RUAN,

Mengnan; LIU, Zhifeng. Interface regulation of Pt quantum dots doped nickel phosphide and cobalt hydroxide to promote electrocatalytic overall water splitting. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 47, n. 97, p. 40986-40998, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922043452>. Acesso em: 19 maio 2024.

MEGUERIAN, C.; HIRSCHBERG, E.; RAKOVSKY, F. **Catalyst for treating exhaust gas from internal combustion engine**. [S. l.]: [s. n.], 1977.

NINGGUI, Ma; WANG, Yuhang; ZHANG, Yaqin; LIANG, Bochun; ZHAO, Jun; FAN, Jun. First-principles screening of Pt doped Ti₂CNL (N = O, S and Se, L = F, Cl, Br and I) as high-performance catalysts for ORR/OER. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 596, p. 153574, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433222011266>. Acesso em: 19 maio 2024.

PANDEY, A.; MUKHERJEE, A.; CHAKRABARTY, S.; CHANDA, D.; BASU, S. Interface Engineering of an RGO/MoS₂/Pd 2D Heterostructure for Electrocatalytic Overall Water Splitting in Alkaline Medium. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [s. l.], v. 11, n. 45, p. 42094–42103, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsmi.9b13358>. Acesso em: 19 maio 2024.

RAIMUNDO, R. A.; SILVA, V. D.; SIMÕES, T. A.; MEDEIROS, E. S.; MACEDO, D. A.; MORALES, M. A. Ni/NiO-carbon composite fibers prepared by solution blow spinning: Structure and magnetic properties. **Ceramics International**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 18933–18939, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340878638_NiNiO-carbon_composite_fibers_prepared_by_sol

ution_blow_spinning_Structure_and_magnetic_properties. Acesso em: 19 maio 2024.

SHELEF, M., MCCABE, R. W. Twenty-five years after introduction of automotive catalysts: what next?. **Catalysis Today**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 35-50, 2000. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/229039315_Twenty-Five_Years_After_Introduction_of_Automotive_Catalysts_What_Next. Acesso em: 19 maio 2024.

SILVA, V. D.; SILVA, F. E. F. da; MEDEIROS, E. Souto de; SIMÕES, T. A. Catalysts for hydrogen and oxygen evolution reactions (HER/OER) in cells. In: CESARIO, Moises R.; MACEDO, Daniel A. de. (ed.). **Heterogeneous Catalysis**. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 457–470. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/360486130_Catalysts_for_hydrogen_and_oxygen_evolution_reactions_HEROER_in_cells. Acesso em: 18 maio 2024.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 40, n. 21, p. 6976–6987, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/275897778_Environmental_impact_assessment_and_comparison_of_some_hydrogen_production_options. Acesso em: 19 maio 2024.

VERAS, T. da S.; MOZER, T. S.; SANTOS, D. da Costa Rubim Messeder dos; CÉSAR, A. da S. (2017). Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 2018–2033, 2017. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/311237270_Hydrogen_Trends_production_

and_characterization_of_the_main_process_worldwide. Acesso em: 19 maio 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu professor orientador que me deu a oportunidade de desenvolver uma pesquisa de tal importância e interessante, na qual eu me desenvolvi em uma área desafiadora, mas ampla e que irá agregar muito na minha carreira. Gostaria de agradecer, também, aos meus colegas do laboratório em que me apoiaram para que conseguíssemos alcançar bons resultados.