



Caracterização de eletrodos porosos de ferro-grafeno pela metalurgia do pó convencional: análise do comportamento do grafeno em matriz de ferro puro

Characterization of porous iron-graphene electrodes by conventional powder metallurgy: analysis of the behavior of graphene in pure iron matrix

Caracterización de electrodos porosos de hierro-grafeno por metalurgia convencional de polvos: análisis del comportamiento del grafeno en matriz de hierro puro

DOI: 10.55905/oelv22n4-190

Originals received: 03/22/2024

Acceptance for publication: 04/15/2024

Clayton André Oliveira da Motta

Doutorando em Processos de Fabricação

Instituição: Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CBCM - UFRGS)

Endereço: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: clayton.motta@ufrgs.br

José de Souza

Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Instituição: Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha

Endereço: Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: josesouza@liberato.com.br

Edna Jerusa Pacheco Sampaio

Mestre em Engenharia

Instituição: Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPEC - UFRGS)

Endereço: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: jerusa.pacheco@ufrgs.br

Willian Delfim da Silva

Mestrando em Processos de Fabricação

Instituição: Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CBCM - UFRGS)

Endereço: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: willian.delfim@ufrgs.br

Lirio Schaeffer

Doutor em Engenharia pelo Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
(RWTH Aachen)

Instituição: Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul (CBCM - UFRGS)

Endereço: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: schaefer@ufrgs.br

Henrique Gonzaga

Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS)

Instituição: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI)

Endereço: Gravataí, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: hengonzaga28@gmail.com

RESUMO

Esse estudo teve como propósito avaliar as propriedades de eletrodos porosos de ferro-grafeno processados por metalurgia do pó convencional misturados de duas formas diferentes e compará-los ao de ferro puro sem grafeno, visando sua aplicação em baterias secundárias. O balanço de massa para a geração dos eletrodos porosos de ferro puro com grafeno (em estado nano) foi definido como (99% Fe, 1% grafeno). A mistura dos compostos com grafeno em ferro no moinho planetário com uso de esferas de aço-cromo mostrou comportamento eletroquímico semelhante ao eletrodo de ferro puro misturado no moinho planetário sem uso de esferas. Em contrapartida, o eletrodo de ferro com grafeno processado no moinho planetário sem uso das esferas, apresentou instabilidade eletroquímica e mostrou-se instável nos testes de circuito aberta (OCP). As análises da estrutura metalográfica investigados através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X e das propriedades eletroquímicas através dos testes de corrente aberta (OCP), revelaram diferenças entre os eletrodos de ferro-grafeno quando misturados de formas distintas.

Palavras-chave: Eletrodos, Metalurgia do Pó, Ferro Puro, Grafeno.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the properties of porous iron-graphene electrodes processed by conventional powder metallurgy mixed in two different ways and compare them to pure iron without graphene, aiming for their application in secondary batteries. The mass balance for the generation of pure iron porous electrodes with graphene (in nano state) was defined as (99% Fe, 1% graphene). The mixture of compounds with graphene in iron in the planetary mill using chrome-steel spheres showed similar electrochemical behavior to the pure iron electrode mixed in the planetary mill without the use of spheres. On the other hand, the iron electrode with graphene processed in the planetary mill without using the spheres, presented electrochemical instability and was unstable in open current tests (OCP). Analysis of the metallographic structure investigated through scanning electron microscopy (SEM) and X-ray spectroscopy and the electrochemical properties through

open current tests (OCP) revealed differences between the iron-graphene electrodes when mixed in different ways.

Keywords: Electrodes, Powder Metallurgy, Pure Iron, Graphene.

RESUMEN

El propósito de este estudio fue evaluar las propiedades de electrodos porosos de hierro-grafeno procesados por metalurgia convencional de polvos mezclados de dos maneras diferentes y compararlos con hierro puro sin grafeno, con miras a su aplicación en baterías secundarias. El balance de masas para la generación de electrodos porosos de hierro puro con grafeno (en estado nano) se definió como (99% Fe, 1% grafeno). La mezcla de los compuestos con grafeno de hierro en el molino planetario utilizando esferas de acero y cromo mostró un comportamiento electroquímico similar al del electrodo de hierro puro mezclado en el molino planetario sin usar esferas. Por el contrario, el electrodo de hierro de grafeno procesado en el molino planetario sin el uso de las esferas, mostró inestabilidad electroquímica y resultó ser inestable en las pruebas de circuito abierto (OCP). Los análisis de la estructura metalográfica investigada a través de microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de rayos X y de las propiedades electroquímicas a través de pruebas de corriente abierta (PCO) revelaron diferencias entre electrodos de hierro-grafeno cuando se mezclan de diferentes maneras.

Palabras clave: Electrodos, Metalurgia de Polvos, Hierro Puro, Grafeno.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação vêm ofertando inúmeras inovações tecnológicas, sobretudo com foco na capacidade produtiva e desenvolvimento de processos mais ecologicamente corretos. A capacidade produtiva segundo Coura (2016) *apud* Schuh *et al.*, (2014) está baseada nas estratégias de mercado e na sustentabilidade que influenciam na variedade e quantidade de produtos ou serviços que podem ser entregues em um determinado período. A sustentabilidade, descreve Borges (2023), está associada a uma atividade que se mantém por um período não determinado de tempo de modo a não alcançar seu esgotamento mesmo diante de imprevistos.

O sucesso do mercado dos veículos automotores híbridos e elétricos estão diretamente relacionados ao desempenho das baterias. Elas vêm se tornando um item de intensa pesquisa com vistas a qualidade, confiabilidade e durabilidade com viés no

equilíbrio ambiental, seguindo a tendência das necessidades globais de redução de emissões de poluentes e do uso racional de recursos (Martins *et al.*, 2021). No entanto, todas as baterias em uso ou em desenvolvimento para o atendimento dessas demandas, são dependentes das oscilações de mercado, pois são *commodities*, e da disponibilidade de suas reservas (Adhikari *et al.*, 2020).

Em seus estudos, com foco na eficiência das baterias secundárias Wang *et al.*, (2012), publicou uma pesquisa onde as baterias de níquel-ferro (NiFe), tiveram um substancial aumento de carga ultrarrápida de até 2 minutos e descarga de 30 segundos, manipulando um eletrodo de óxido de ferro sobre folhas de grafeno e cristais de hidróxido de níquel sobre nanoplacas de grafeno. A nanotecnologia oferece um indicador valioso porque os nanomateriais podem exibir propriedades diferentes quando em comparação com os materiais convencionalmente utilizados. Em particular, os nanomateriais de carbono têm atraído atenção considerável devido à sua abundância, características estruturais únicas e grande área de superfície específica que são atraentes para aplicações relacionadas à energia.

Em consequência à crescente demanda de veículos ecologicamente corretos, se faz então a necessidade de se obter maiores eficiências, sobretudo do processo de fabricação das baterias. Os desafios dos projetos de baterias de alto desempenho para autos elétricos, por exemplo, devem considerar premissas que vão desde a combinação de materiais para o máximo desempenho, processos rápidos e confiáveis de fabricação e segurança (Shu *et al.*, 2021). Além dos desafios citados, atender a capacidade de abastecimento para as cadeias produtivas, conforme preconiza a Comissão Europeia, em sua divulgação na lista de materiais de alto risco de abastecimento global, devem também ser superados (Keersemaaker, 2020).

2 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa propôs desenvolver eletrodos porosos de ferro puro e ferro puro em estado pulverulento dopado com nano pó de grafeno, processados por metalurgia

do pó convencional misturados de duas formas distintas e fazer uma análise das propriedades mecânicas e eletroquímicas entre eles.

2.1 BALANÇO DE MASSAS PARA GERAÇÃO DO ELETRODOS

Os materiais que foram utilizados para o balanceamento dos eletrodos obtidos por metalurgia do pó foram o Ferro puro AHC 100 e nano pó de Grafeno UGZ-1001 com 93,2% de pureza. O balanço de massa foi ajustado para geração de dois tipos de eletrodos, sendo um deles misturado com o nano pó de grafeno. Os eletrodos foram codificados como composto A e B são apresentados na tabela 1. Para a redução do atrito no processo de compactação foi adicionado um lubrificante sólido, estearato de zinco, com percentuais fixo de 0,5% em massa para cada composto.

Tabela 1. Balanço de massas para geração dos eletrodos A e B.

Compostos	% Ferro	%Níquel	%Nióbio	%Grafeno	% Estearato de Zinco
A	99	-	-	1	0,5
B	100	-	-	-	0,5

Fonte: Autores

2.2 MISTURA DOS COMPOSTOS PARA GERAÇÃO DOS ELETRODOS

O processo de Mistura para geração dos eletrodos A e B foram realizadas em duas etapas, sendo a primeira etapa realizada em um moinho planetário RETSCH - PM Grind Control 500, figura 1, sem adição de esferas de moagem. Os materiais foram expostos a uma rotação de 142 rpm (rotações por minuto) pelo tempo de 30 minutos, tempo em que foi observado uma boa homogeneização, segundo indica Wermuth (2015).

Figura 1. Moinho planetário RETSCH para mistura dos compostos sem adição de esferas de moagem



Fonte: Autores

Uma segunda etapa de mistura ocorreu com uso da técnica da moagem de alta energia também no moinho planetário *RETSCH - PM Grind Control 500* com uso de esferas para auxiliar na homogeneização, figura 1. Esse processo teve como propósito a obtenção de uma ligação mais homogênea dos elementos que compõem o composto na formação do eletrodo A (99Fe1Grafeno), ficando a redução do tamanho da partícula como uma variável secundária e de não investigação para essa pesquisa. O eletrodo de ferro puro (B) não foi submetido à mistura de alta energia. A câmara do moinho onde foram misturados os materiais, figura 2, possui uma área de 500 cm³ (500ml) e a quantidade de material disposto para a mistura (elementos formadores dos eletrodos + lubrificante sólido + esferas de aço cromo 4mm diâmetro), foi de aproximadamente 1/3 da capacidade total da câmara.

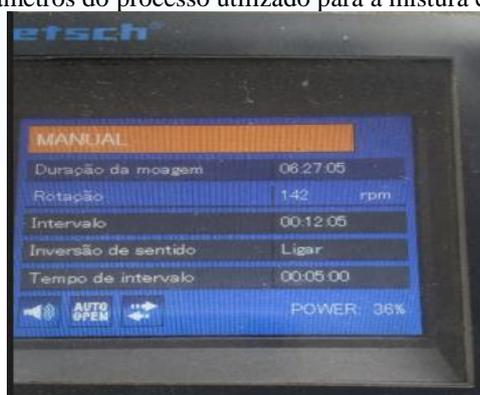
Figura 2. Câmara do misturador de alta energia.



Fonte: Autores

O processo de mistura em alta energia ocorreu pelo período de 6hs27min., sendo que a cada 12 minutos em operação o equipamento estaciona pelo tempo de 5 minutos, para evitar sobreaquecimento do sistema planetário, figura 3.

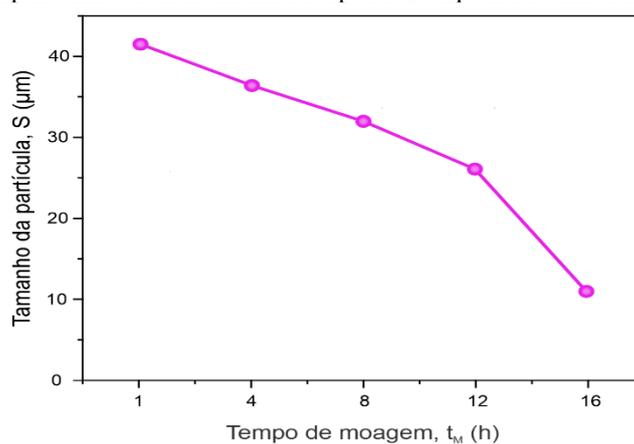
Figura 3. Parâmetros do processo utilizado para a mistura em alta energia.



Fonte: Autores

O tempo de mistura foi o parâmetro de maior controle, pois impacta diretamente na qualidade da mistura e no tamanho dos particulados, essa afirmação pode ser vista no gráfico da figura 4, segundo propõe Torres *et al.*, (2009).

Figura 4. Efeito do tempo de mistura no tamanho das partículas quando utilizado processo de alta energia.



Fonte: Torres *et al.*, (2009).

2.3 COMPACTAÇÃO DOS ELETRODOS

Visando entender o comportamento dos eletrodos A e B quanto às suas propriedades microestruturais e eletroquímicas, foi utilizado uma matriz de perfil cilíndrico figura 5.

Figura 5. Matriz de compactação dos eletrodos A e B para realização de testes laboratoriais



Fonte: Autores

Para o atendimento da relação de compressão, importante na definição da profundidade de preenchimento e densificação a verde dos eletrodos foi seguido a equação 1, que é apresentado na sequência:

$$R = P_v / P_a$$

Equação (1)

Onde:

R é a relação de compressão dos pós;
P_v é a densidade a verde (g/cm³);
P_a é a densidade aparente do pó solto (g/cm³)

A altura de enchimento, por sua vez, foi determinada através da equação 2, descrita abaixo.

$$He = r.hv$$

Equação (2)

Onde:

He é a altura de preenchimento da cavidade da matriz (mm);
r é a relação de compressão dos pós soltos;
hv é a altura do compactado em seu estado verde (mm).

2.4 PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DOS ELETRODOS

O processo de densificação dos eletrodos compactados ocorreu através da sinterização. Os parâmetros da sinterização utilizados para densificação dos eletrodos pode ser vista na tabela 2 e utilizou como referência a temperatura de 1100°C, recomendado por Avila (2020). Os mecanismos envolvidos são todos dependentes da difusão e, portanto, realizada entre 60 e 80% da temperatura de fusão do material. O forno utilizado para o processo foi do tipo esteira rolante com três zonas de aquecimento, figura 6.

Tabela 2. Parâmetros de Processo para sinterização dos eletrodos.

Zona 1 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 3 (°C)	Gás Hidrogênio (m³/h)	Gás Nitrogênio (m³/h)	Tempo de retenção em cada Zona (min.)
550	900	1100	0,1	2	30

Fonte: Autores

Os parâmetros indicados na tabela 2, foram replicados tanto para os eletrodos com grafeno, eletrodo (A) como para o de ferro sem grafeno (B) gerados por mistura convencional e por alta energia.

Figura 6. Forno de esteira rolante utilizado no processo de sinterização.



Fonte: Autores

2.5 DENSIDADE DOS ELETRODOS EM ESTADO A VERDE E APÓS A SINTERIZAÇÃO

A verificação das densidades dos eletrodos no seu estado verde e após a sinterização seguiram as normas B962-17 e C373-06 que estabelecem a técnica padrão para medição de densidade dos produtos da metalurgia do pó (MP).

O resultado numérico que expressou a densidade de cada eletrodo gerado foi realizado pela equação 3.

$$d = \frac{(m_{seco})}{(m_{seco} - m_{submersa})} \times \frac{(m_{seco})}{(m_{seco} - m_{submersa})} \times (d_{\text{água}})$$

Equação (3).

Onde:

d = densidade da amostra (g/cm^3);

m_{seco} = massa seca da amostra (g);

$m_{submersa}$ = massa da amostra quando submersa na água (g);

$d_{\text{água}}$ = densidade da água (g/cm^3).

2.6 ANÁLISE DOS ELETRODOS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

Os eletrodos A e B foram submetidos a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura MEV e análise de Espectroscopia de raios X por Energia Dispersiva EDS. Para a realização desses ensaios, foram preparadas as amostras geradas a pressão de 200MPa na matriz da figura 5. O equipamento utilizado foi um Microscópio Phenom ProX PW-100-017, onde a tensão de aceleração foi de 15 kV com elétrons retroespalhados e porta amostra sem redução de carregamento. O procedimento descrito é apresentado na figura 7.

Figura 7. Equipamento para análise Microestrutural por MEV e EDS, modelo Pro X.



Fonte: Autores

2.7 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS DOS ELETRODOS

Para a caracterização eletroquímica foi aplicado o método da leitura do potencial de circuito aberto (OCP). Esse ensaio tem como propósito analisar a estabilidade eletroquímica dos eletrodos porosos gerados nessa pesquisa e que foram compactados a pressão de 200MPa.

2.7.1 Avaliação do Potencial de Circuito Aberto (OCP - Open Circuit Potential) dos Eletrodos

Quando projetamos eletrodos para baterias, é de fundamental importância garantirmos que não haja reações indesejadas durante os períodos de inatividade. Isso ocorre porque essas reações podem vir a promover degradação prematura do material do eletrodo, levando a uma redução na capacidade de armazenamento de energia, eficiência energética e vida útil da bateria. A degradação dos materiais dos eletrodos pode ser causada por uma série de fatores sendo o principal mecanismo a corrosão. Na corrosão eletroquímica o mecanismo de transferência eletrônica ocorre em regiões bem definidas. Os elétrons são doados (material de menor potencial de redução) para uma dada região e recebidos (material de maior potencial de redução) em outra, configurando uma pilha de corrosão (Santos, 2018).

Antes de qualquer outra caracterização eletroquímica é realizado o monitoramento do OCP (Open Circuit Potential) que é a medida do potencial de circuito aberto ao longo do tempo para verificar se a amostra apresenta estabilidade na sua interação com o eletrólito. Um dos requisitos para que uma bateria atue de forma eficiente e segura, dentre outros fatores, é que o potencial químico do cátodo e do ânodo estejam dentro da faixa de estabilidade do eletrólito (Costa, 2020). A medição do Potencial de Circuito Aberto desempenha um papel crucial no projeto de eletrodos para baterias, sendo essencial para garantir o desempenho e a longevidade do sistema.

Para a análise e verificação foi usado o equipamento Potentiosta da marca Metrohm, modelo AutoLab PGSTAT-302N, figura 8 disponível no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As caracterizações do OCP foram realizadas em uma célula eletroquímica contendo eletrólito KOH 6M utilizando eletrodo de referência Hg/HgO.

Figura 8. Potentiosta da marca Metrohm, modelo AutoLab PGSTAT-302N .



Fonte: Autores

A preparação dos eletrodos é uma etapa importante do ensaio e serve para evitar contaminações que possam desencadear algum processo corrosivo nas superfícies de análise, a figura 9 mostra um dessecador à vácuo usado para evitar corrosão superficial dos eletrodos em preparação para testes.

Figura 9. Dessecação dos eletrodos.



Fonte: Autores

Após o processo de preparação os eletrodos foram protegidos com uma fita galvânica que teve como função, proteger o contato elétrico da amostra com o coletor de corrente evitando a permeação do eletrólito bem como delimitar a área de análise da amostra. Um fio de cobre foi colocado em contato com o eletrodo com propósito de servir como coletor de corrente, figura 10.

Figura 10. Isolamento dos eletrodos para ensaios eletroquímicos.



Fonte: Autores

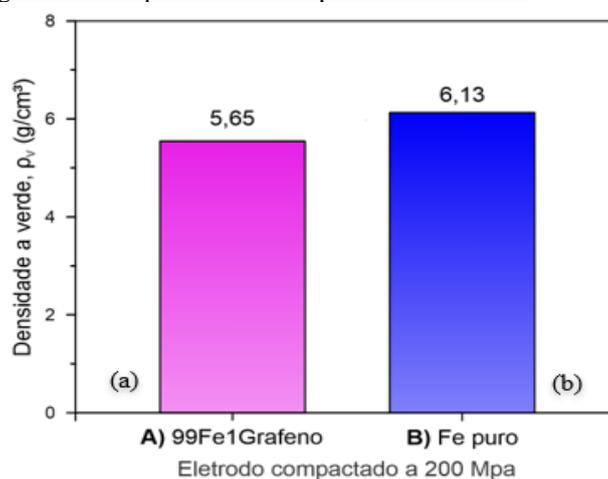
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão abordados e discutidos os resultados propostos na pesquisa que teve como finalidade o desenvolvimento de 2 tipos de eletrodos porosos processados pela metalurgia do pó convencional.

3.1 COMPORTAMENTO COMPRESSIVO E DE DENSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS

O resultado do comportamento compressivo ao qual os eletrodos foram expostos para serem compactados pode ser visto nos gráficos da figura 11 (a), (b).

Figura 11. Comportamento compressivo dos eletrodos A e B.



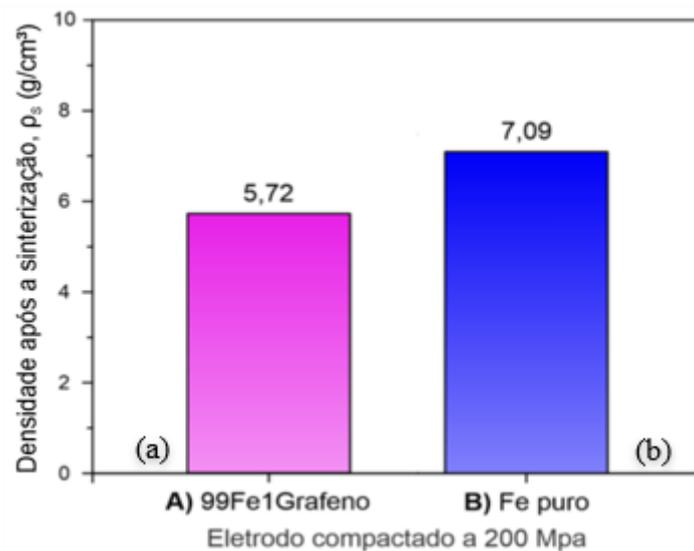
Fonte: Autores

Os gráficos gerados nos ensaios de compressão, quando na geração dos eletrodos A (obtidos pela mistura no moinho planetário com e sem esferas) e B (misturados sem esferas) mostraram que os eletrodos de ferro puro e ferro balanceado com grafeno, tiveram comportamento muito similares. A leve diferença de densidade entre esses eletrodos pode estar associada ao fato do grafeno se comportar como um lubrificante sólido, quando em pressão, algo semelhante ao que ocorre com os grafites de elevada pureza acima de 99% ou de baixos tamanhos de grãos, inferior a 2 microns.

3.2 DENSIDADE DOS ELETRODOS APÓS O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

O processo de sinterização promoveu a densificação final dos eletrodos A e B conferindo-lhes resistência superior ao compactado a verde. A figura 12 (a) e (b) mostra os valores das densidades do eletrodo (A) e (B) compactado na pressão de 200MPa após o processo de sinterização.

Figura 12. Densidade após a sinterização dos eletrodos A e B.



Fonte: Autores

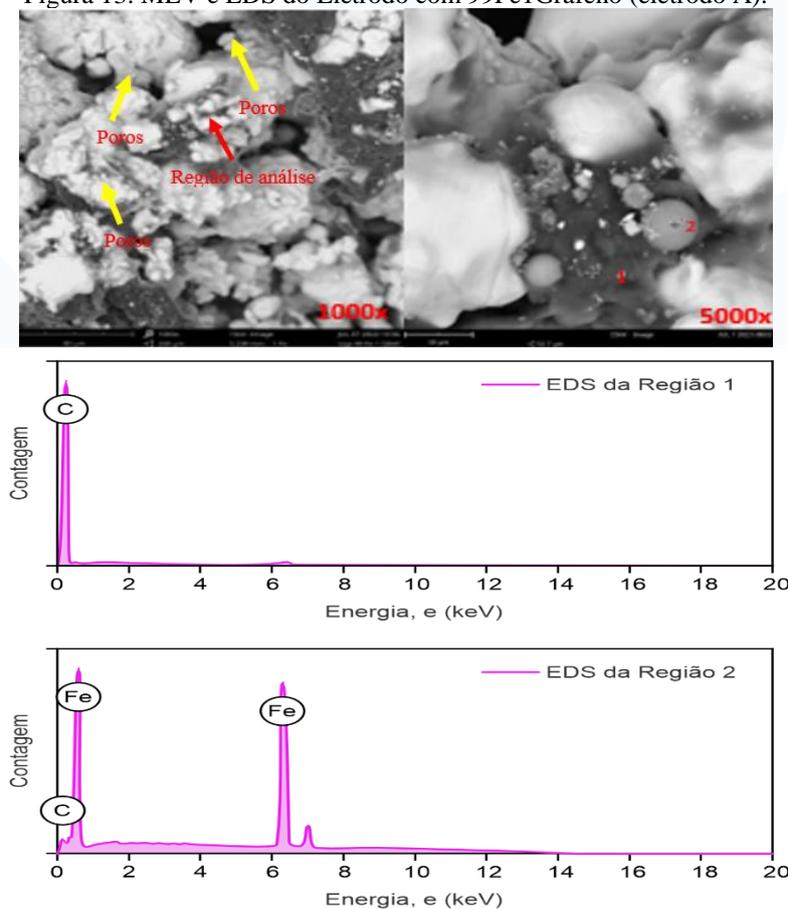
O comportamento da densidade dos eletrodos após o processo de sinterização mostrou, através dos gráficos das figuras 12 (a) e (b) que houve um acréscimo na densificação do eletrodo (B). No entanto, a densidade do eletrodo (A) de matriz ferrosa

com adição de 1% de grafeno apresentou uma elevação muito pequena da sua densidade, quando comparado ao seu estado a verde. Esse fenômeno já era esperado, pois os nano pós de grafeno podem vir a influenciar na formação de pescoço, fenômeno intrínseco do processo de sinterização que promove a elevação das densidades dos materiais. Dessa forma, qualquer interferência na formação dos *necks*, irão interferir nessa característica.

3.3 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DOS ELETRODOS (EDS)

Os resultados dos ensaios de MEV e EDS aplicados nos eletrodos (A) são mostrados na figura 13 e na figura 14 o MEV do eletrodo de ferro puro.

Figura 13. MEV e EDS do Eletrodo com 99Fe1Grafeno (eletrodo A).



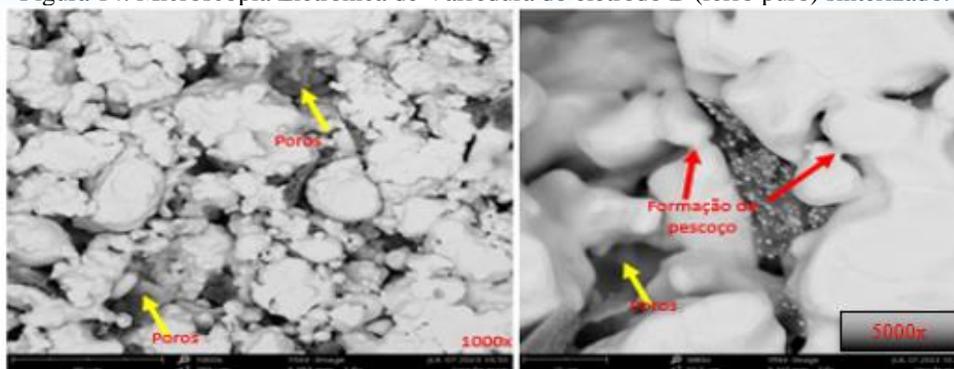
Fonte: Autores

O MEV foi aplicado em duas diferentes ampliações (1000x) e (5000x), que ofertou uma visualização da distribuição dos poros, sem uma análise quantitativa e de seus tamanhos além da conexão intermolecular dos particulados sinterizados. O EDS com indicação exata no ponto focado, determinou a composição da partícula, revelando sua composição.

Na figura 13 o MEV ampliado a 1000x mostra os poros e sua distribuição entre as partículas sinterizadas, evidenciando que houve o processo de sinterização com formação de pescoço das partículas de ferro em contato entre si. No entanto, na ampliação de 5000x conseguimos perceber com clareza como se comportou o nanotubo de grafeno no processo da sinterização com as temperaturas estabelecidas preferencialmente para o ferro. O grafeno (1) se acomodou entre as partículas de ferro (2), criando uma conexão ‘tipo dendritas’, promovendo assim a ligação entre eles. Não se percebeu no grafeno o típico fenômeno da formação de pescoço, característico no processo de sinterização e sim um espalhamento intergranular.

A figura 14 mostra o comportamento granular do eletrodo (B) de ferro puro na pressão de 200MPa.

Figura 14. Microscopia Eletrônica de Varredura do eletrodo B (ferro puro) sinterizado.



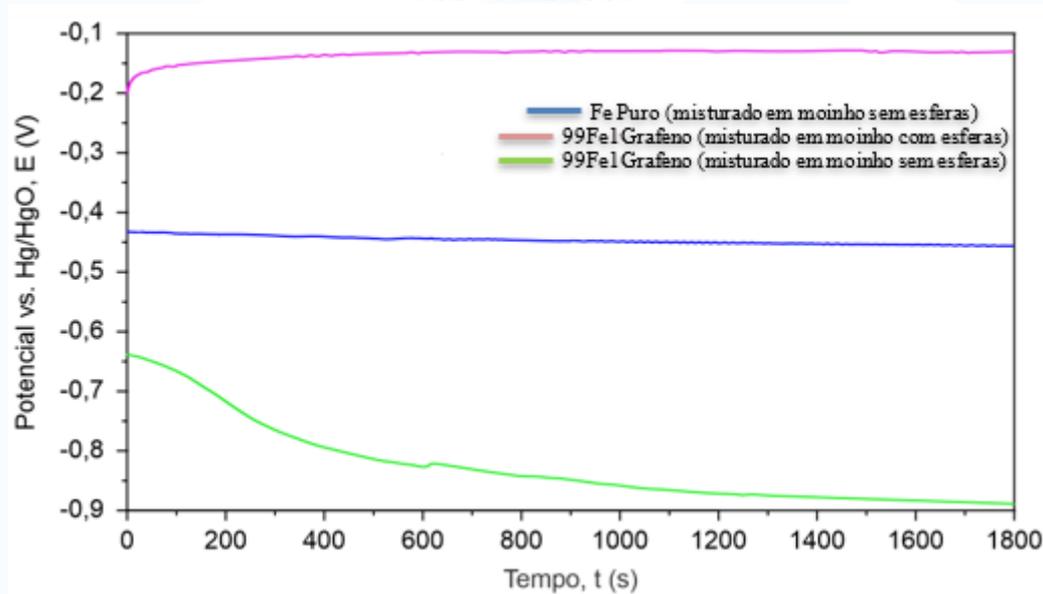
Fonte: Autores

Pelas imagens geradas no ensaio de MEV em (1000x) e (5000x) foi possível verificar que o eletrodo de ferro puro (B) promoveu uma sinterização homogênea com formação de pescoços que permitiram uma matriz coesa. Os poros se apresentam uniformemente distribuídos e de aparente similaridade quanto aos aspectos de tamanhos.

3.4 ANÁLISE DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (OCP) APLICADO NOS ELETRODOS DE FERRO PURO E 99FE1GRAFENO

As curvas apresentadas na figura 15 mostram os resultados do OCP obtidos nos eletrodos de ferro puro misturados de forma convencional e de ferro com grafeno, misturados pelo processo convencional e de alta energia.

Figura 15. Análise do OCP dos eletrodos 99Fe1Grafeno e Ferro Puro obtidos em moinho planetário com esferas e sem esferas.



Fonte: Autores

Como pode ser observado o eletrodo de ferro puro (Fe Puro) apresentou elevada estabilidade mantendo o potencial de circuito aberto -0,4V ao longo do tempo de ensaio. Analisando o gráfico, percebe-se que a curva do OCP referente ao eletrodo 99Fe1Grafeno que foi misturado no moinho planetário sem esferas de aço cromo demonstrou instabilidade em sua curva de potencial, iniciando em -0,64V e curvando-se ao potencial catódico nos valores de -250mV. Essa condição apresentada pelo eletrodo 99Fe1Grafeno indica um processo ativo de corrosão desse eletrodo.

Em contrapartida, a curva do OCP para o eletrodo 99Fe1Grafeno produzido pelo processo de moagem de alta energia (com esferas de aço-cromo) mostrou-se estável com valores próximos de 0,15V. Embora tenha apresentado uma leve variação no sentido

positivo do potencial, essa variação é vista como aceitável, visto, pois, pequenas instabilidades para o lado positivo do potencial podem ser indicativas de proteção do próprio processo.

Embora, a eficiência de um eletrodo, frente ao outro, não pode ser mensurado somente pelos resultados aqui obtidos, cabe, sim, maiores investigações. Sabe-se, contudo, que a formação de (γ -Fe₂O₃) conhecido como ‘maghemita’ tem potencial influência na degradação do ânodo de ferro nos sistemas de baterias alcalinas, segundo mostram Lee, Lei e Yushin (2018), em sua pesquisa de eletrodos de NiFe. Logo, essa condição pode ter influência no mecanismo eletroquímico do eletrodo, mesmo com o grafeno misturado ao ferro, condição essa que pode ser potencializada pelo tipo de processo de mistura ao qual o eletrodo fora submetido.

4 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados na pesquisa proposta evidenciam que eletrodos porosos de ferro e ferro com grafeno podem apresentar diferentes comportamentos. As diferenças de comportamento podem estar associadas em principal ao processo de mistura utilizado na homogeneização dos componentes constituintes do composto. Os eletrodos de ferro puro e ferro com grafeno misturados no moinho planetário sem uso de esferas de aço-cromo, tiveram comportamentos eletroquímicos diferentes. No entanto, o comportamento do eletrodo de ferro com grafeno homogeneizado a alta energia (com uso de esferas de aço-cromo) teve comportamento eletroquímico equivalente ao de ferro puro. Essa condição mostra que a geração de eletrodos porosos de ferro dopado com grafeno a partir da metalurgia do pó convencional pode ser possível e promissora. A estabilidade apresentada pelos eletrodos produzidos pelo processo de alta energia (99Fe1Grafeno), comparativamente ao de ferro puro, indicam que há potencial para serem utilizados como eletrodos de baterias. Essa afirmação vai ao encontro dos pré-requisitos exigidos aos projetos de componentes de baterias que é a estabilidade do meio. Já os eletrodos de ferro com grafeno misturados pelo processo convencional se mostraram inadequados para a aplicação proposta devido. No entanto, a eficiência de um eletrodo, frente ao outro, não



pode ser mensurado somente pelos resultados aqui obtidos, cabendo, sim, maiores investigações. Sabe-se, contudo, que a formação de (γ -Fe₂O₃) conhecido como ‘maghemita’ tem potencial influência na degradação do ânodo de ferro nos sistemas de baterias alcalinas. Logo, essa condição pode ter influência no mecanismo eletroquímico do eletrodo, mesmo com o grafeno misturado ao ferro.

REFERÊNCIAS

COURA, A. F. Estudo da capacidade produtiva no processo de uma indústria de ferramentas: Um estudo de caso. 2016. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Ponta Grossa, 2016.

SCHUH, G., POTENTE, T., HAUPTVOGEL, A. Methodologu for the evaculation odfore cars treliability of production planning systems. *Procedia*, v17, p. 469 – 474, 2014.

BORGES, F. Q. (2023). ENERGY SUSTAINABILITY AND SUPPLY CHAIN: THE CASE OF A BRAZILIAN SOLAR PANELS INDUSTRY. *OBSERVATORY OF LATINOAMERICANA ECONOMY*, 19(2). Retrieved from <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/35>

MARTINS, L. S., GUIMARÃES, L. F., BOTELH, A. B., TENÓRIO, J. A. S., ESPINOS, D. C. R. (2021). Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. *Journal of Environmental Management*, 295, 113091. doi:10.1016/j.jenvman.2021.11309

ADHIKARI, M., GHIMIRE, L.P., KIM, Y., ARYAL, P., KHADKA, S.B. Identification and analysis of barriers against electric vehicle use. *Sustainability*, v. 12, n. 12, p. 4850, 2020.

WANG, H., LIANG, Y., GONG, M. Anultra fast nickel–iron battery from strongly coupledin organic. nanoparticle/nanocarbonhybridmaterials. *Nat Commun* 3, 917 (2012). <https://doi.org/10.1038/ncomms1921>

SHU X, GUO Y, YANG W, WEI K, ZHU G (2021). Life cycle assessment of the environmental impact of batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports*, 7, 2302–2315. doi:10.1016/j.egyr.2021.04.038

KEERSEMAKER, M. Critical raw materials. In: *Suriname revisited: Economic potential of its mineral resources*. 1. ed. Cham: Springer, 2020. p. 69–82.

WERMUTH, D. P. Análise das propriedades físicas do compósito cobre e cinzas leves de carvão produzido por metalurgia do pó. 2015. 70 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2015.

TORRES, C. D., KNEWITZ, F.L., LUNA, W. H. D., ROCHA, A. S. Efeito da moagem de alta energia na morfologia e compressibilidade do compósito Mo-30%Cu. *Estudos Tecnológico – Vol. 5, nº 2:121-129 (mai/ago.2009)*, doi: 10.4013/ete.2009.52.01.

.ASTM B962-17, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017, www.astm.org.

.ASTM C373-88 (2006) Standard test method for water absorption, apparent density,

apparent porosity and apparent specific gravity of burnt white porcelain products.

SANTOS, R.P.G. MICROABRASÃO-CORROSÃO DE REVESTIMENTOS DE INCONEL 625 DEPOSITADOS POR PLASMA PÓ (PTAP). Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2018.

COSTA, L.A.C. ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS E DESENVOLVIMENTO DE BATERIAS DE INSERÇÃO DE PRÓTONS. Dissertação de Mestrado. Departamento de Química – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2020.

LEE, D.C., LEI, D., YUSHIN, G. Morphology and phase changes in iron anodes affecting their capacity and stability in rechargeable alkaline batteries. *ACS Energy Letters*, v. 3, n. 4, p. 794–801, 2018.