

**RECICLAGEM DE FIBRAS DE CARBONO ORIUNDAS DE
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DE MATRIZ EPÓXI POR
PROCESSO TÉRMICO DE PIROLISE E APLICAÇÃO COMO
MATERIAIS DE ELETRODO EM SUPERCAPACITORES.**

**RELATÓRIO PARCIAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)**

Valdinei Euzebio Rodrigues (FATEC – Faculdade de Tecnologia de São
Paulo, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: valdinei.rodrigues@fatec.sp.gov.br

Jorge Tadao Matsushima (FATEC – Faculdade de Tecnologia de São
Paulo, Orientador)
E-mail: jorge.matsushima@fatec.sp.gov.br

COLABORADORES

Dr. Mauricio Ribeiro Baldan (CTE/LAS/INPE)

Julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto PIBIC juntamente com Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os quais permitiram o desenvolvimento do projeto, este com a estrutura física, laboratórios e equipamentos, já aquele com fornecimento da bolsa de iniciação científica a qual custeia o projeto.

Faz-se necessário agradecer também a Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SJC) à qual aluno e professor são vinculados e onde foram feitas as pirolises iniciando-se assim os estudos realizados.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a reciclagem de fibras de carbono oriundas de compósitos estruturais de matriz epóxi e sua aplicação como material de eletrodo para supercapacitores. Hoje, compósitos de epóxi e fibras de carbono vem ganhando cada vez mais importância nos diferentes setores industriais, especialmente o setor da aeronáutica e aeroespacial, devido as suas excelentes propriedades destacadas pela baixa massa específica e elevada resistência mecânica. Destaca-se também, a sua durabilidade, mas como qualquer tipo de material, por mais longo que seja seu tempo útil, este é finito, necessitando-se o seu devido descarte, que, hoje, se faz com o uso de aterros sanitários e incineração ainda considerados ambientalmente e economicamente ineficientes. Fibras de carbono, por ser um material de alto valor econômico agregado tem despertado muito interesse em sua reciclagem e em seu uso em aplicações secundárias. Sua recuperação tem sido alcançada por processo de pirólise ao degradar a matriz epóxi sem perder suas características estruturais. No setor de energia, fibras de carbono são traduzidas como bons materiais de armazenamento de energia, por apresentar desejáveis características condutoras e capacitivas que potencializam sua aplicação como material de eletrodo em supercapacitores. Baseada nas considerações feitas, nesta primeira etapa de trabalho, os descartes de compósitos epóxi e fibras de carbono foram pirolisados em diferentes condições de temperatura e tempo e submetidas a dois tratamentos específicos (termoquímicos e químicos) para aprimorar as propriedades superficiais, condutoras e capacitivas. O tratamento químico foi realizado utilizando-se ácido nítrico concentrado em ebulição por 1 hora e o tratamento termoquímico ocorreu em um forno tubular em uma temperatura de 600oC por 30 minutos. As fibras de carbono pirolisadas e tratadas foram submetidas à análise morfológica, estrutural e eletroquímica. Pode-se verificar a integridade estrutural das fibras de carbono por espectroscopia Raman e por Difração de Raios-X. A presença ou não de porosidade foi analisada por microscopia eletrônica de varredura. Por fim, as propriedades redox, condutoras e capacitivas foram analisadas pela técnica eletroquímica de voltametria cíclica e

curvas de carga-descarga. Os resultados parciais até então obtidos, mostram que as fibras pirolisadas e tratadas termoquimicamente e não tratadas apresentam melhores propriedades condutoras e capacitivas. Esta propriedade se perdeu com o tratamento químico realizado devido provavelmente a incorporação de possíveis grupos oxidados que diminuiu a eficiência no processo condutivo e capacitivo. Para dar continuidade a este projeto de Iniciação Científica, estão programadas a deposição de grafeno sobre as fibras de carbono, a caracterização e a implementação do sistema supercapacitor em plataformas de gerenciamento de energia.

Palavras-chave: Fibra de Carbono, Pirolise, Reciclagem, Eletrodos, Supercapacitores.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – Montagem da célula eletroquímica.....	15
Figura 4.1 - Imagens SEM-FEG (a) FCP, (b) FCP-TQ e (c) FCP-TQ, ampliação de 500x.	17
Figura 4.2 - Imagens SEM-FEG (a) FCP, (b) FCP-Q e (c) FCP-TQ, ampliação de 5000x	18
Figura 4.3 - Imagens SEM-FEG (a) FCP-Q, (b) FCP-Q , ampliações de 5000x e 20000x.	18
Figura 4.4 - Voltametria Cíclica de Varredura na velocidade de $5\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$	19
Figura 4.5 - Voltametria Cíclica de Varredura nas velocidades de (a) $50\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) $500\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente.	20
Figura 4.6 - Curvas de carga e descarga obtidas em solução $2,0\text{ mol L}^{-1}$ H_2SO_4 estabelecidas em uma corrente de 1 mA	21

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1: Valores de Cesp, P e W.	22

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
FC	Fibra de Carbono
epóxi/FC	Resina Epóxi/Fibra de Carbono
FCP	Fibra de Carbono Pirolisada
FCP-Q	Fibra de Carbono Pirolisada Oxidação Química
FCP-TQ	Fibra de Carbono Pirolisada Oxidação Termoquímica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FEG-SEM	Field Emission Gun – Scanning Electronic Microscopy
FATEC-SJC	Faculdade de Tecnologia de São Paulo – São José dos Campos

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 Objetivos do trabalho.....	12
2.1 Objetivos Específicos.....	12
3 Experimental.....	13
3.1 Materiais.....	13
3.2 Métodos.....	13
4 Resultados e discussão.....	17
5 Conclusão.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (FC) vêm ganhando cada vez mais utilidade dentro da indústria aeronáutica e trata-se de um produto com alto valor comercial e tecnológico agregado, do qual a sua utilização visa diminuir o peso e o consumo de combustível e, conseqüentemente, o custo operacional da aeronave. Porém, o seu uso gera resíduo, que são dispostos em aterros sanitários ou são incinerados, atendendo assim a legislação vigente da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que por sua vez acarreta em prejuízos ambientais ainda que atenuados, portanto a reciclagem é um processo viável para a destinação das fibras de carbono. Os compósitos estruturais a base de epóxi e fibra de carbono (epóxi/FC) são materiais bastante utilizados com extraordinário desempenho estrutural e estético em diversos seguimentos industriais, em especial, aqueles da indústria naval, aeronáutica e automobilística, pois apresentam excelentes propriedades, como: baixa massa específica além de elevada resistência mecânica e resistência à corrosão (CALLISTER, 2006; LEVY NETO, 2006), além de ter grande durabilidade, ou seja, os produtos desenvolvidos tem uma vida útil longa mantendo durante todo este período a qualidade estrutural. Entretanto, por mais longo que seja seu tempo útil, este é finito.

Atualmente, a partir deste prisma, o desafio tecnológico se dá em buscar maneiras de reaproveitar, na totalidade e de forma eficiente, os materiais que constituem os compósitos epóxi/FC. Todavia a forma menos nobre de se reaproveitar tais compósitos tem sido pela reciclagem mecânica que é feita através da trituração do material e utiliza-lo como reforço para processar novos compósitos (JACOB, 2011). O prejuízo de propriedades mecânicas devido a falta de adesão do reciclado com a nova resina incorporada, é inevitável neste tipo de reciclagem, mesmo utilizando baixas quantidades do reciclado (PICKERING, 2006). Para um reaproveitamento sublime dos componentes, especialmente as FC, que tem um grande valor econômico atrelado, outros processos de reciclagem tem sido realizados (AKENSON et al., 2012; MEYER;

SCHULTE, 2009; OLIVEUX et al., 2015), emprega-se o processo térmico por pirolise para essa finalidade, mas a reciclagem não ocorre de forma direta e rápida, pois a resina epóxi e a FC não são recuperadas de forma a atingir suas características originais. Para a resina epóxi, sua propriedade termofixa não permite a fusão e quando processada termicamente ocorre degradação por conta da complexidade de sua formação química, formando voláteis tóxicos, diferentes moléculas gasosa, substâncias oleosas de carbono residual. Ainda que estáveis quimicamente, quando as FC são submetidas a processos térmicos estas perdem suas propriedades mecânicas, seja pela estrutura porosa que ela adquire ou pelo resquício de materiais carbonosos presentes na superfície da fibra, inviabilizando sua aplicação como material de reaproveitamento em processamento de compósitos estruturais. O que leva a utilização FC reciclada de compósitos estruturais para outros fins como apontam os estudos, relacionando desde influência dos parâmetros de processo (tempo, temperatura e taxa de aquecimento), como estudos de caracterização e aplicações em várias frentes tecnológicas (OLIVEUX et al., 2015).

Uma das frentes tecnológicas a ser explorada é a da utilização das FC em uma interface bastante interessante para aplicações em sistemas de armazenamento de energia, as estruturas carbonosas são conhecidas por apresentarem elevada área superficial, justificando sua aplicação como fase de armazenamento de energia, pois apresentam grande capacitância específica, ou seja, sua aplicação como eletrodos de supercapacitores se torna uma opção viável.

Neste intuito este trabalho versa reutilizar as FC provenientes de compósitos estruturais a base de epóxi oriunda de descarte do setor aeroespacial e estudá-las através de processo termoquímicos de pirolise com a carbonização parcial da resina para a obtenção de fibras de carbono pirolisadas (FCP), visando aplicá-las como material de eletrodos de supercapacitores, as fibras receberam tratamentos de oxidação químico (FCP-Q) e termoquímico a 600°C (FCP-TQ). A capacidade de armazenamento de energia é o que define a tecnologia

desses dispositivos, que atualmente tem recebido bastante atenção em razão de suas características intrínsecas relacionadas a sua elevada densidade de potência e de energia [8].

A caracterização morfológica das FC foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura e o potencial de armazenamento de energia das FC foram avaliados por Voltametria cíclica e curvas de carga e descarga.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

De forma geral o intuito deste trabalho é realizar uma destinação mais nobre para os compósitos poliméricos estruturais reforçados com fibras de carbono, oriundas do setor aeronáutico, aplicando as fibras de carbono como eletrodos de supercapacitores.

Especificamente realizando a caracterização morfológica das fibras através de microscopia eletrônica de varredura e a caracterização eletroquímica por voltametria cíclica e operação de carga e descarga, aplicadas às fibras após o processo de pirolise, oxidação química e oxidação termoquímica a 600°C. Além da posterior montagem do dispositivo supercapacitor.

2.1 Objetivos Específicos

- Preparar amostras de fibras de carbono oxidadas quimicamente com ácido nítrico e oxidadas termoquimicamente a temperatura de 600°C, além de fibras pirolisadas.
- Caracterizar os três tipos de amostras quanto a sua morfologia através da microscopia eletrônica de varredura, verificando a superfície da fibra analisando a sua rugosidade.
- Caracterizar eletroquimicamente as diferentes amostras através de voltametria cíclica e curvas galvanostáticas de cargas e descargas, afim de determinar qual fibra apresenta melhores características para aplicação como eletrodo de supercapacitores.

3 EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Primeiramente a fibra (prepreg tecido plain wave e resina epoxídica 8552/AS4 Hexcel) foi submetida ao processo de pirólise que ocorreu no forno InforGel (temperatura de trabalho 100°C a 1200°C) sob atmosfera de Argônio PA.

Na oxidação química foi utilizado o ácido nítrico 65% em volume, agitador magnético com aquecimento EVEN, modelo HJ-4, capela Permution, modelo CE0703 e Estufa Analógica para Secagem Sterilifer modelo SX 1.3 AS.

Já a oxidação térmica foi realizada no forno tubular EDG Equipamentos, modelo EDG10P-S.

Para caracterização morfológica foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura MEV modelo SEM-FEG FEI Quanta 650 (FEG-SEM do inglês Field Emission Gun – Scanning Electronic Microscopy), auxiliado pelo software VegaTCx64.

A caracterização eletroquímica foi realizada com a utilização do potenciostato AUTOLAB, modelo AUT84095 e tipo PGSTAT302N, com o auxílio do Booster AUTOLAB modelo BST7321 e tipo BSTR10A; os eletrodos utilizados foram de platina e prata/cloreto de prata e mergulhados em solução 2,0 mol L⁻¹ de H₂SO₄, os dados foram obtidos auxiliados pelo software NOVA. Além de vidrarias de laboratório.

3.2 Métodos

A pirólise foi realizada no forno a temperatura de 500°C ± 10°C, durante quatro horas em atmosfera de Argônio, processo executado na FATEC-SJC.

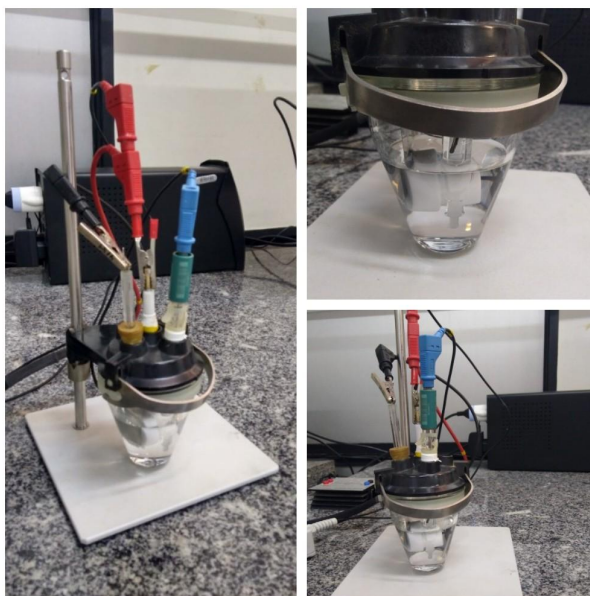
Quanto às oxidações, foram realizadas, a química e a termoquímica, para esta a amostra foi inserida no forno tubular em atmosfera oxidante com rampa de aquecimento de 5°C por minuto até atingir o patamar de 600°C onde permaneceu por 30 minutos e depois resfriou-se naturalmente, obtendo-se

desta forma as fibras de carbono pirolisadas termoquimicamente tratadas (FCP-TQ), já para aquela a amostra foi mergulhada em ácido nítrico 65% e procedeu-se com o aquecimento até a ebulição que continuou durante 1 hora, dentro da capela com exaustor acionado, em seguida a amostra foi colocada na estufa a 100°C por 24 horas, obtendo-se as fibras de carbono pirolisadas quimicamente tratadas (FCP-Q). O tratamento eletroquímico não foi realizado por questões de infraestrutura existente, uma vez que houve problemas funcionais com a fonte de corrente a ser utilizada e que, no momento, encontra-se em manutenção.

Para a caracterização eletroquímica das amostras, foi realizada a voltametria cíclica de varredura nas velocidades de 5-10-50-100 e 500mV.s⁻¹, o comportamento eletroquímico caracterizado pelos processos de carregamento/descarregamento da dupla camada elétrica e dos processos redox foi analisado por voltametria cíclica utilizando uma célula eletroquímica constituída por três eletrodos acoplado ao um equipamento potenciostato AUTOLAB 302.

Os estudos eletroquímicos foram realizados utilizando uma solução contendo 2,0 mol L⁻¹ de H₂SO₄ em um intervalo de potencial de 0,0 V a 1,0 V e em diferentes velocidades de varredura. e quanto a sua eficiência no processo de carga/descarga no intervalo de potencial estudado e aplicando-se diferentes densidades de corrente aplicadas, e a montagem da célula seguiu de acordo com a imagem.

Figura 3.1 – Montagem da célula eletroquímica.



Fonte: Próprio autor.

As curvas galvanostáticas de carga e descarga foram obtidas para analisar a capacidade de carga específica, a densidade de potência e a ciclabilidade dos eletrodos. As medidas galvanostáticas foram realizadas aplicando-se diferentes correntes (1, 2 e 3 e 5 mA) em uma janela de potencial de 0,0 V a 1,0 V. As curvas de carga e descarga foram utilizadas para o cálculo da capacitância específica de acordo com

Equação 1.

$$C_{esp} = \frac{i\Delta t}{\Delta V m} \quad (1)$$

onde C_{esp} é a capacidade específica (F g⁻¹), i é a corrente aplicada (A), Δt é a variação do tempo (s), ΔV é a variação de potencial (V) e m é a massa dos eletrodos (g) previamente medida.

As curvas de carga e descarga foram também utilizadas para o cálculo da eficiência coulômbica (η), que é um dos parâmetros para avaliar a

reversibilidade dos processos de carga e descarga dos eletrodos, como mostra a Equação 2.

$$\alpha = \frac{t_D}{t_C} 100\% \quad (2)$$

onde t_D é o tempo de descarga e o t_C é o tempo de carga.

A partir da capacidade específica do material (C) e da faixa de potencial durante a descarga da célula, foi calculada a energia específica (W) em unidades de watt hora/quilograma de material ativo e também a potência específica (P) em watt/quilograma de material ativo, utilizando-se a Equação 3 e Equação 4.

$$W = \frac{1}{2} C_{esp} (E_D)^2 \quad (3)$$

onde E_D é o potencial de descarga e

$$P = \frac{W}{t_D} \quad (4)$$

onde t_D é a tempo de descarga.

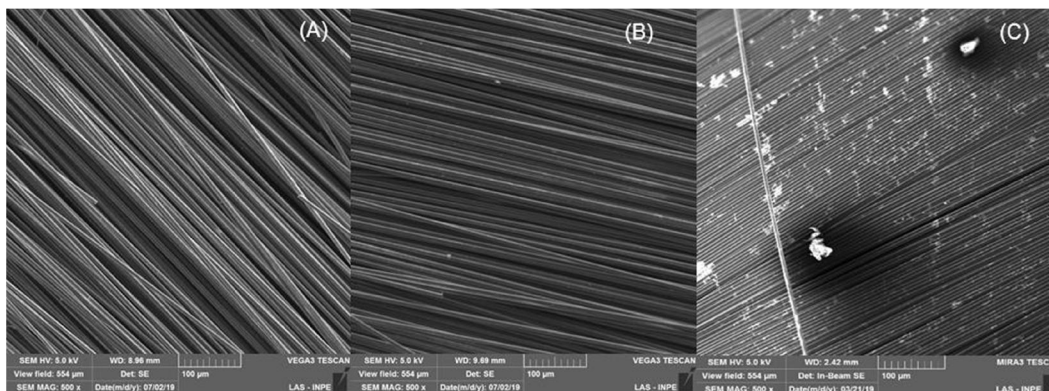
Para analisar a efetividade dos tratamentos superficiais, as FCP, FCP-TQ e FCP-Q foram caracterizadas quanto a morfologia, ao comportamento eletroquímico e a eficiência no processo de carga/descarga.

O aspecto morfológico foi analisado por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo usando um microscópio SEM-FEG FEI Quanta 650, na qual a amostra foi submetida ao microscópio e com o auxílio do software gerou-se as ampliações de 500x, 1-2.5-5-10 e 20kx. Todos os procedimentos foram realizados nas dependências do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com exceção da pirólise.

4 RESULTADOS E DISCUÇÃO

As imagens feitas no MEV apresentadas na Figura 4.1(A), 4.1(B) e 4.1(C), revelam que a FCP-Q deixou na fibra resíduos aderidos em sua superfície, por conta da resina epoxídica que não foi totalmente retirada no processo de pirolise, já as FCP-TQ e FCP apresentam poucos resíduos aderidos em suas superfícies.

Figura 4.1 - Imagens SEM-FEG (A) FCP, (B) FCP-TQ e (C) FCP-TQ, ampliação de 500x.

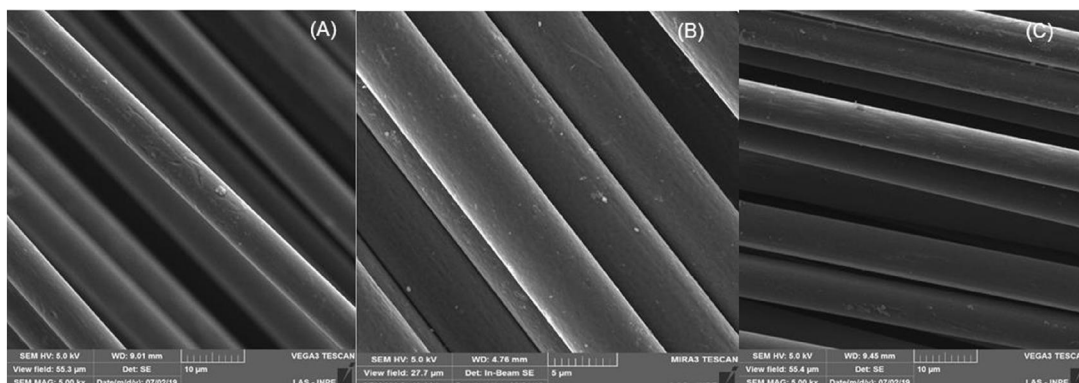


Fonte: Próprio autor.

Nas FCP-Q além de apresentarem poucos poros estes ainda ficaram obstruídos pelas impurezas apresenta na Figura 4.2 (A), observa-se também nesta imagem uma das poucas regiões onde da amostra menos incrustada e pode-se fazer uma imagem semelhante aos outros modelos para a ampliação apresentada.

Entretanto a integridade estrutural das fibras se manteve, ou seja, não houve a degradação dos filamentos, conferida pela característica morfológica uniforme aparente da superfície, pode-se observar também que as FCP e as FCP-TQ ainda que apresentassem alguns resíduos estes foram consideravelmente em menor quantidade em comparação com oxidação química, além de apresentarem grande rugosidade com sulcos e poros, podendo ser visualizadas na Figura 4.2 (B) e Figura 4.3(C).

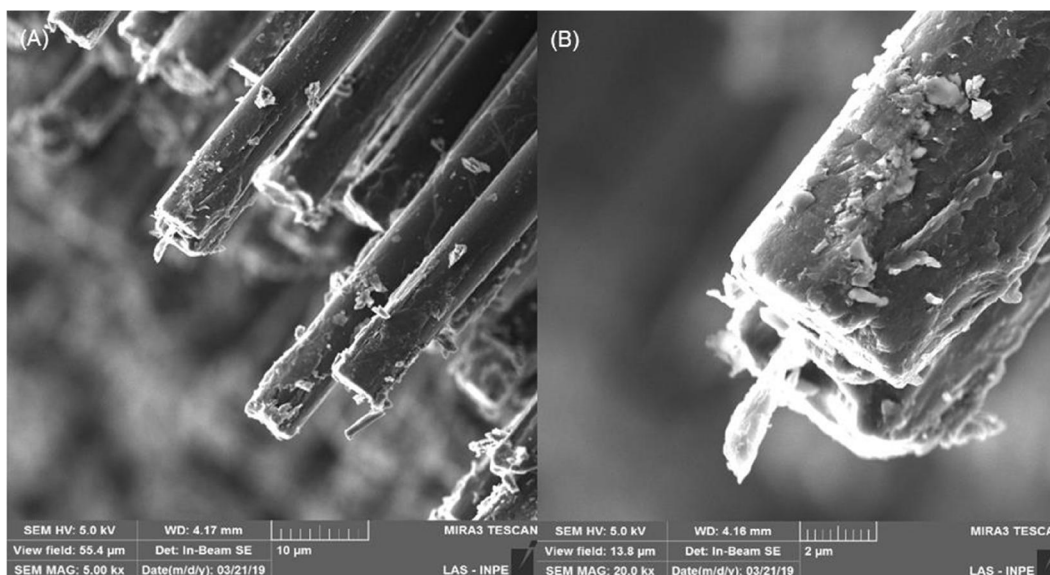
Figura 4.2 - Imagens SEM-FEG (A) FCP, (B) FCP-Q e (C) FCP-TQ, ampliação de 5000x



Fonte: Próprio autor.

As obstruções dos poros pelas incrustações das impurezas nas FCP-Q conforme foi apresentada anteriormente deu-se por toda a extensão da amostra, salvo em raras localidades, as imagens da Figura 4.3(A) revelam melhor as impurezas aderidas observadas na região da extremidade das fibras e na Figura 4.3(B) o detalhe na ponta da fibra.

Figura 4.3 - Imagens SEM-FEG (A) FCP-Q, (B) FCP-Q, ampliações de 5000x e 20000x.



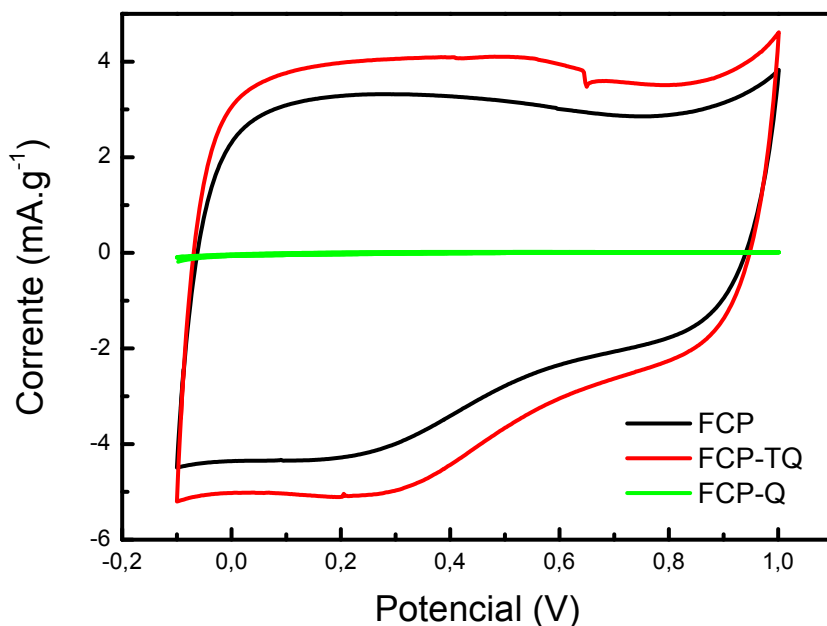
Fonte: Próprio autor.

As voltametrias cíclicas apresentaram os resultados de forma quase retangular para FCP e FCP-TQ, que define a contribuição pequena da resistência

observada na Figura 4.4. Dentre as três fibras analisadas verifica-se uma maior contribuição capacitiva da oxidada a 600°C, essa contribuição se justifica por uma corrente de carregamento e descarregamento da dupla camada elétrica.

Para FCP-Q houve uma diminuição considerável da contribuição da dupla camada elétrica, um comportamento específico a ser observado é a distorção do voltamograma no processo carregamento e descarregamento devido a maior resistividade do sistema.

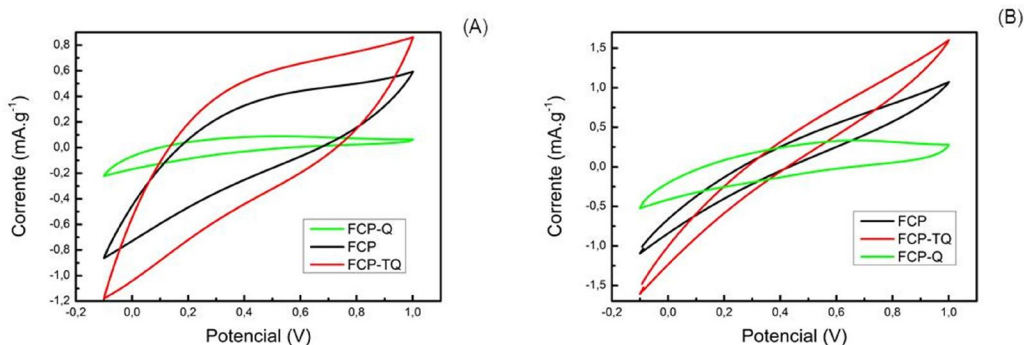
Figura 4.4 - Voltametria Cíclica de Varredura na velocidade de $5\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$



Fonte: Próprio autor.

Quando a velocidade é aumentada na varredura voltamétrica o gráfico vai apresentando distorções, perdendo a forma aproximada de retângulo e os perfis vão se assemelhando, este comportamento ocorre, pois as não há tempo hábil para as cargas aproximarem e afastarem do eletrodo, diminuindo ainda mais a interação da contribuição da dupla camada elétrica, isso é evidenciado na Figura 4.5(A) e Figura 4.5(B) as quais tem as velocidades de $50\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ e $500\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente.

Figura 4.5 - Voltametria Cíclica de Varredura nas velocidades de (a) $50\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) $500\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente.

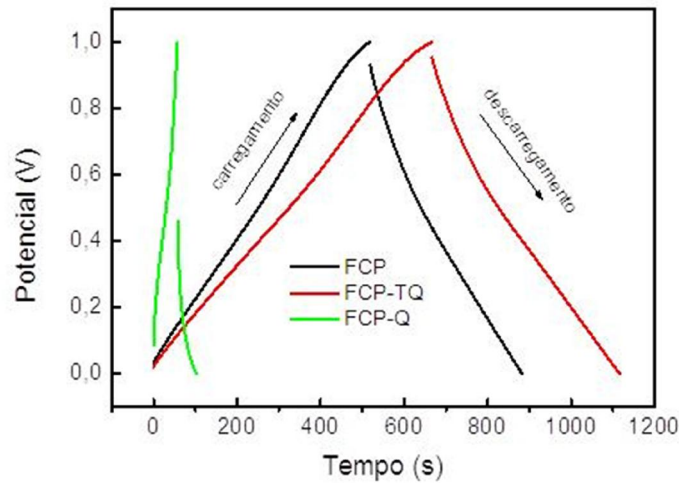


Fonte: Próprio autor.

Analisando-se as curvas galvanostáticas registradas para o 3º ciclo galvanostático, as curvas de carga e descarga para as amostras FCP, FCP-TQ e FCP-Q obtidas em meio de $2,0\text{ mol L}^{-1}$ de H_2SO_4 com a aplicação de diferentes correntes, verifica-se que o processo de carregamento e descarregamento estabelecido em $1,0\text{ mA}$ ocorre de forma quase linear para as FCP e FCP-TQ, estão apresentadas na Figura 4.6. A linearidade da curva de carga/descarga é resultado de processos que ocorre na interface eletrodo/eletrólito puramente capacitivos, ou seja, somente definido pelo arranjo da dupla camada elétrica que se forma na interface devido ao processo difusivo e sem a ocorrência de processos químicos. No entanto, as curvas de carga/descarga para as FCP e FCP-TQ apresentam um pequeno desvio da linearidade, provavelmente causado por processos redox envolvendo grupos superficiais oxigenados que trocam elétrons na interface. Outra verificação feita a partir da curva carga/descarga é o tempo em que ocorre o carregamento e o descarregamento na interface. Tempos maiores para uma determinada corrente envolvida significa maior capacidade de armazenamento e entrega de energia em uma determinada faixa de potencial. Este comportamento pode ser verificado para as FCP e FCP-TQ quando comparado as FCP-Q, onde se observa tempos poucos mais longos para a FCP-TQ devido a sua estrutura caracterizada pela maior área de superfície e grupos funcionais de superfície que provavelmente potencializaram a capacidade de armazenamento de

energia. Esse resultado é corroborado com aqueles obtidos por análise de voltametria cíclica e do aspecto morfológico.

Figura 4.6 - Curvas de carga e descarga obtidas em solução 2,0 mol L⁻¹ H₂SO₄ estabelecidas em uma corrente de 1 mA.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.1 traz os valores de capacidade específica (Cesp), densidade de potência (P) e de energia (W) para as FCP, FCP-TQ e FCP-Q calculadas usando as Equações 1, 3 e 4, respectivamente. Com base nos valores de Cesp, verifica-se que as FCP-TQ apresentou a capacidade específica mais elevada e já discutida a partir da análise morfológica, voltametria cíclica e curva carga/descarga.

Tabela 4.1- Valores de Cesp, P e W.

	Capacidade específica (Cesp / F g ⁻¹)	Densidade de potência (P / W kg ⁻¹)	Densidade de energia (W / W h kg ⁻¹)
FCP	34	37,6	4,7
FCP-TQ	28	37,4	3,8
FCP-Q	4,3	48,2	0,59
Supercapacitores convencionais		~10,0 a 10⁵	~0,06 a 10

Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

As análises realizadas até aqui evidenciam que a reciclagem para um aproveitamento mais nobre das fibras de carbono oriundas de compósitos estruturais se faz viável haja vista que estas apresentaram boas respostas capacitivas. Portanto as densidades de potência e de energia apresentaram valores que se encontram dentro da faixa apresentada pelos capacitores eletroquímicos convencionais e que evidenciaram sua aplicabilidade como produto eletrodo para supercapacitores proposto neste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKESSON, D.; FOLTYNOWICZ, Z.; CHRISTEEN J. e SKRIFVARS. **Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fiber from used blades of wind turbines.** J. Reinf. Plast. Compos. Vol. 31, pg. 1136-1142, 2012.

CALLISTER, W.D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada.** 2ª. Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

JACOB, A. **Composites can be recycled.** Reinf Plast, vol. 55, pg. 45-60, 2011.

LEVY NETO, F. e PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 2006.

MEYER, L.O.; SCHULTE, K. **CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials.** J. Comp. Mater., vol. 43, pg. 1121-1132, 2009.

OLIVEUX, G.; DANDY, L.O.; LEEKE, G.A. **Current status recycling of fibre reinforced polymers:** Review of Technologies, reuse and resulting properties, Progress in Materials Science, vol. 72, pg. 61-99, 2015.

PICKERING, S.J. **Recycling technologies for thermoset composites materials:** current status. Composites Part A, vol. 37, pg. 1206-1215, 2006.