

## NANOCOMPÓSITOS DE ARAMIDA INTEGRADAS COM NANOPARTÍCULAS METÁLICAS PARA APLICAÇÕES AVANÇADAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Kaline Maria Queiroz de Azevedo Galvão<sup>1</sup>

Dany Geraldo Kramer<sup>2</sup>

### Resumo

A procura por materiais de alto desempenho tem levado a busca por nanocompósitos de aramida combinadas com nanopartículas metálicas, graças à sua leveza, resistência e pode incorporar funcionalidades elétricas, térmicas e químicas. Assim, objetivou-se uma pesquisa bibliográfica sobre esta temática. Para tanto, realizou-se uma revisão narrativa em bases de pesquisas com foco em publicações a partir de 2020. Como resultado, foram analisados sete artigos selecionados. A literatura mostra que rotas como a redução in situ favorecem uma alta dispersão metálica e excelentes propriedades eletrotérmicas. Além disso, as combinações com cerâmicas e materiais bidimensionais melhoram o desempenho mecânico, a estabilidade térmica e a resistência química. Nota-se que a interface entre as nanofibras e as nanopartículas desempenha um papel crucial na eficácia estrutural e funcional desses compósitos, afetando diretamente sua condutividade, resistência e durabilidade. O conjunto dos estudos aponta que, embora haja um grande potencial tecnológico, ainda existem problemas a serem resolvidos em relação à compatibilidade interfacial.

Palavras-chave: Aramida, compósito, Revisão.

### 1 INTRODUÇÃO

As nanofibras de aramida (ANFs) vêm se destacando como uma base importante para compósitos avançados por causa da sua resistência mecânica excepcional, estabilidade térmica e capacidade de formar redes tridimensionais através de ligações de hidrogênio (Fan et al., 2021). Pela sua

dimensão reduzida, essas fibras aumentam a área superficial e facilitam a fixação de nanopartículas metálicas, o que permite que elas tenham novas propriedades, como condução elétrica, resposta rápida ao calor e sensibilidade sensorial.

A incorporação de metais e óxidos metálicos em ANFs tem crescido rapidamente. Por exemplo, nanopartículas de prata proporcionam excelente condutividade elétrica e reagem rapidamente ao efeito Joule, tornando-se ideais para criar dispositivos que aquecem com eficiência (Zhou et al., 2020). Além disso, filmes que usam partículas de níquel em cima do SiC demonstraram desempenho superior na dissipação do calor, o que é bastante promissor para ajudar a controlar o calor em aparelhos eletrônicos (Liu et al., 2023). Ainda, a inclusão de óxidos metálicos pode ampliar resistência química e estabilidade superficial, contribuindo com propriedades protetoras importantes (Nazeer et al., 2020).

Outro caminho de crescimento envolve materiais bidimensionais, como o grafeno e o óxido de grafeno reduzido (rGO). A interação entre as nanofibras de carbono (ANFs) e o rGO formam redes condutoras que conseguem suportar tensão mecânica e manter um bom desempenho eletroquímico, tornando essas estruturas boas opções para eletrodos flexíveis (Wang et al., 2023). A química do óxido de grafeno, explicada por Dreyer et al. (2010), ajuda a entender como ele é reduzido e como pode ser integrado em matrizes de polímeros.

Além das suas boas propriedades elétricas e térmicas, sistemas feitos com aramida e metais têm mostrado potencial antibacteriano, catalítico e antioxidante quando incorporados a filmes e membranas poliméricas (Fierascu et al., 2023). Entretanto, há desafios a serem enfrentados, especialmente no controle da interface entre ANFs e nanopartículas, na estabilização das partículas por meio de processos coloidais e na obtenção de uma dispersão uniforme.

Assim, compreender os mecanismos que governam as interações entre ANFs e nanopartículas metálicas é fundamental para o avanço tecnológico desses compósitos multifuncionais.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Metodologia

Este artigo de revisão baseou-se exclusivamente nos sete estudos referenciados, publicados entre 2010 e 2023, incluindo pesquisas experimentais e revisões focadas em nanofibras de aramida, nanopartículas metálicas, óxidos metálicos e materiais carbonáceos como grafeno e óxido de grafeno. Cada artigo foi examinado quanto às rotas de síntese, propriedades estruturais, comportamentos mecânicos, térmicos, elétricos e funcionalidades químicas. As informações extraídas foram então integradas de forma comparativa, buscando-se estabelecer conexões entre os mecanismos relatados e suas aplicações tecnológicas em nanocompósitos ANF-metal.

### 2.2. Estruturas Fundamentais e Interações Interfaciais

A forma como as nanofibras de aramida (ANFs) são organizadas é fundamental para o comportamento mecânico e funcional dos nanocompósitos estudados. As ANFs são formadas por longas cadeias rigidamente orientadas e fortemente interligadas por ligações de hidrogênio, o que resulta em elevada cristalinidade e resistência mecânica superior aos polímeros convencionais (Fan et al., 2021).

Essa estrutura simplifica a integração com nanopartículas metálicas, que podem aderir por interações eletrostáticas,  $\pi$ - $\pi$  ou por ligação química após tratamento da superfície. Entender a química das superfícies, principalmente em materiais à base de carbono como óxido de grafeno (GO) e grafeno reduzido (rGO), tem sido essencial para otimizar essas superfícies de contato, como explicam Dreyer et al. (2010), ao detalhar a reatividade e a importância dos grupos de oxigênio do GO na fixação às matrizes poliméricas.

A área de contato entre ANF e nanopartícula é muito importante para o resultado final. Formar uma área de transição adequada e quimicamente compatível evita falhas como separação de camadas ou acúmulo de metal. Como pode ser observado na Figura 1, a morfologia fibrilar das ANFs favorece a ancoragem e a formação de interfaces estáveis. Entretanto, a literatura

mostra que o controle completo dessa interface ainda é um dos maiores desafios enfrentados pelos pesquisadores. Estudos como os de Wang et al. (2023) mostram que pequenas variações na concentração de rGO ou na densidade de grupos funcionais oxidativos alteram significativamente o desempenho mecânico e elétrico dos filmes.

## 2. Rotas de Síntese, Estabilidade Coloidal e Estratégias de Dispersão

Os métodos de síntese influenciam o tamanho e a forma das nanopartículas metálicas, bem como sua dispersão e estabilidade na matriz de aramida. Entre os métodos mais utilizados, destaca-se a redução *in situ*, que consiste na formação das nanopartículas diretamente sobre as ANFs. Zhou et al. (2020) exploraram essa técnica para criar papéis de prata altamente condutores. A ancoragem direta das partículas previne a agregação, que normalmente ocorre quando partículas pré-sintetizadas são adicionadas ao polímero.

Outra abordagem envolve a combinação de nanopartículas metálicas com estruturas cerâmicas. Liu et al. (2023) mostram que a deposição de níquel sobre SiC antes da incorporação ao filme ANF resulta em partículas mais estáveis e melhor distribuídas, gerando compósitos com desempenho térmico superior. A estabilidade coloidal é importante para sistemas híbridos de ANF/rGO, já que o GO tem características anfífilas e pode tanto dispersar como aglomerar dependendo do pH, força iônica e presença de surfactantes (Dreyer et al., 2010).

## 3. Propriedades Mecânicas: Tensão, Flexibilidade e Durabilidade

A combinação de uma matriz altamente resistente com nanopartículas metálicas pode melhorar ou prejudicar as propriedades mecânicas, dependendo da qualidade da interface e da dispersão. Fan et al. (2021) mostram que as ANFs formam redes tridimensionais densas, que conferem alta resistência à tração e um módulo de elasticidade maior do que os polímeros comuns. A adição de rGO, conforme demonstrado por Wang et al. (2023), aumenta ainda mais a resistência mecânica por meio de uma estrutura lamelar que redistribui tensões e diminui a propagação de trincas.

No entanto, a resistência diminui significativamente se houver aglomerações metálicas. Zhou et al. (2020) apontam que altas concentrações de prata podem formar aglomerados que atuam como pontos de descontinuidade, facilitando fraturas sob tensão mecânica. Como pode ser observado na Figura 2, a presença de aglomerados de nanopartículas de prata promove descontinuidades na matriz de aramida, reduzindo a resistência mecânica e favorecendo a iniciação de trincas.

Por outro lado, a adição de partículas Ni-SiC, como discutido por Liu et al. (2023), não prejudica a estrutura e ainda melhora a resistência à perfuração e a estabilidade térmica, mostrando que o tipo e a forma das partículas influenciam o resultado final do compósito.

#### 4. Propriedades Elétricas e Soluções para Eletrônica Flexível

Entre as funcionalidades mais investigadas dos nanocompósitos ANF-metal, a condutividade elétrica é uma das mais importantes. Materiais poliméricos comuns têm baixa condutividade, porém a integração de prata transforma compósitos de ANF em plataformas eficientes para dispositivos eletrônicos flexíveis. Zhou et al. (2020) mostram que papéis ANF/Ag aquecem de forma rápida e estável, com resposta contínua mesmo após várias dobras, o que é essencial para componentes de eletrônica portátil.

A presença de rGO também contribui significativamente para o transporte elétrico. Wang et al. (2023) descobriram que filmes ANF/rGO apresentam redes percolantes bem definidas, alta condutividade elétrica com boa estabilidade mecânica. Diferentemente da prata, o rGO oferece estabilidade eletroquímica e maior resistência à oxidação, tornando esses compósitos adequados para eletrodos em supercapacitores e baterias flexíveis.

#### 5. Desempenho Térmico e Aplicações em Dissipação de Calor

Os compósitos destinados à dissipação térmica são cada vez mais importantes devido ao aumento da densidade energética de dispositivos eletrônicos. Filmes contendo Ni-SiC incorporados em ANFs demonstraram condutividade térmica substancialmente superior, conforme Liu et al. (2023). O SiC serve como plataforma cerâmica que estabiliza o Ni e melhora a difusão

de calor, enquanto as ANFs garantem flexibilidade, leveza e integridade mecânica. Isso torna esses compósitos adequados para dissipadores flexíveis, substratos para LEDs e filmes de proteção térmica. Conforme demonstrado na Figura 3, o compósito ANF/Ni-SiC exibe uma distribuição térmica mais equitativa e uma eficiência superior na dissipação, evidenciando a função do SiC como estabilizador e promotor da transferência de calor.

A prata também contribui na transferência de calor, embora seu papel seja predominante na condução elétrica. A estrutura ANF/Ag, quando ativada por efeito Joule, gera aquecimento controlado e uniforme, formando sistemas de aquecimento ultrafinos e de resposta rápida.

#### 6. Propriedades Químicas, Antimicrobianas e Funcionais Avançadas

A introdução de nanopartículas metálicas pode conferir propriedades como atividade antimicrobiana, antioxidante e catalítica. Fierascu et al. (2023) demonstram que metais nobres e óxidos metálicos aumentam as funções químicas de polímeros, tornando-os úteis em aplicações biomédicas, têxteis antibacterianos e revestimentos inteligentes. A incorporação desses mecanismos em ANFs tem grande potencial, pois a matriz aramida já oferece resistência térmica e química superiores.

Na área da proteção de superfícies, Nazeer et al. (2020) apresentam que compósitos aramida-ZrO<sub>2</sub> apresentam forte resistência à corrosão e degradação química em ambientes salinos. Esses resultados podem ser aplicados a sistemas híbridos ANF-metal, aumentando seu potencial para aplicações marítimas, petroquímicas e aeroespaciais.

#### 7. Perspectivas Futuras e Desafios Estruturais

Apesar dos avanços, ainda é difícil controlar totalmente a dispersão, morfologia e adesão interfacial. As principais limitações envolvem:

- \* tendência natural das nanopartículas a se aglomerarem;
- \* incompatibilidade química entre as superfícies;
- \* formação de tensões residuais entre as fases;
- \* dificuldades na produção industrial em larga escala.

Pesquisas apontam que métodos verdes, controle de pH, modificação da superfície, uso de redutores não tóxicos e integração com materiais 2D

podem ajudar a resolver esses problemas. O avanço dessas estratégias deve permitir a criação de compósitos mais leves, eficientes e fáceis de produzir em grande escala.

### 3 CONCLUSÃO

A análise dos sete estudos indica que os nanocompósitos de nanofibras de aramida com nanopartículas metálicas ou híbridos cerâmico-carbono são materiais muito interessantes para eletrônica flexível, dissipação de calor e dispositivos de alto desempenho. A estrutura hierárquica das nanofibras de aramida, é boa para fixar partículas metálicas e formar redes 3D. A química do óxido de grafeno, ajuda a melhorar a interface e a estabilidade.

Os resultados experimentais dos artigos mostram que o tipo de produção e as nanopartículas usadas afetam o resultado final. Os sistemas produzidos por redução *in situ*, como os de prata, têm alta condutividade e boa resposta eletrotérmica. Ainda existem problemas para resolver, principalmente no controle da dispersão, compatibilidade química e formação de interfaces estáveis entre as nanofibras e as nanopartículas. A literatura diz que o futuro depende de usar engenharia molecular, métodos de produção ecológicos, modificação da superfície e integração com materiais 2D para controlar a transferência de carga, dissipação de calor e resistência. Para que os nanocompósitos de nanofibras de aramida e metal se tornem materiais industriais, será preciso equilibrar o desempenho, a estabilidade e a produção em grande escala.

### REFERÊNCIAS

- DREYER, D. R.; PARK, S.; BIELAWSKI, C. W.; RUOFF, Rodney S. The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, v. 39, p. 228–240, 2010.
- FAN, Y.; LI, Z.; WEI, J. Application of aramid nanofibers in nanocomposites: a brief review. *Polymers*, v. 13, n. 3071, 2021.

FIERĂSCU, R. C.; ANTONIAC, I. V.; MIRICESCU, D.; SĂNDULESCU, O.; FIERĂSCU, I. C. Metal and metal oxide nanoparticle incorporation in polymers. *Polymers*, v. 15, 2023.

LIU, Y.; GUO, Y.; LUO, J.; CHEN, S.; ZHOU, Y.; LI, Y.; WANG, B. Nickel nanoparticle decorated silicon carbide as a thermal filler in thermal conductive aramid nanofiber-based composite films. *RSC Advances*, v. 13, p. 23312–23320, 2023.

NAZEER, A. A.; ALI, M.; KHAN, A.; ALHUSSEN, M.; RAHMAN, S.; SHAHEEN, S. Aramid–zirconia nanocomposite coating with excellent corrosion protection of stainless steel in saline media. *Frontiers in Chemistry*, 2020.

WANG, J.; WANG, X.; YU, X.; LI, T.; ZHANG, H.; ZHAO, Y.; LI, W.; CHEN, Y. Aramid nanofibers/reduced graphene oxide composite electrodes with high mechanical properties. *Nanomaterials*, v. 13, n. 103, 2023.

ZHOU, Y.; GUO, S.; GAO, P.; GU, B.; WANG, Y.; ZHANG, T.; HU, J. Highly conductive silver nanoparticle-functionalized aramid fiber paper for electrical heaters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020

Sobre o(s) autor(es)

1. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da UFRN, kalinegalvao08@gmail.com
2. Prof. Dr. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da UFRN. dgkcs@yahoo.com.br