

Desenvolvimento de pastas condutoras poliméricas esticáveis para aplicação em eletrônica têxtil

Bruna Eduarda G. Soares^{1,2}, Kayo de Oliveira Vieira², Antonio C. C. do Amaral² e Fernando Ely²

bgsoares@cti.gov.br, kovieira@cti.gov.br, fely@cti.gov.br

¹ Faculdade de Tecnologia de Campinas – FATEC – Campinas - SP

² Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Campinas- SP

Resumo. A eletrônica têxtil (e-têxtil) é um avanço da eletrônica vestível e pressupõe a integração e fabricação de dispositivos eletrônicos diretamente nas roupas ou objetos têxteis do nosso dia a dia, conferindo a eles novas funcionalidades. Assim, a criação de circuitos eletrônicos e caminhos condutores através de técnicas de impressão é vista como essencial para o avanço da e-têxtil. Nesse sentido, tintas e pastas condutoras são elementos essenciais para a viabilização de aplicações em e-têxtil. No entanto, existem limitadas soluções disponíveis no mercado compatíveis com substratos têxteis. Assim, nesse trabalho descrevemos resultados preliminares do desenvolvimento de formulações de pastas condutoras poliméricas utilizando-se pós prata e testes de sua aplicação em tecidos comerciais, utilizando a técnica de doctor-blade. As medidas de resistividade elétrica foram feitas pelo método de 4 pontas e através de sistema eletro-mecânico, especificamente desenvolvido, para medição de resistência para os filmes condutores em tecidos, que analisa a elasticidade e a resistência após esticamento. As pastas desenvolvidas demonstraram excelente condutividade aliada a boa robustez mecânica e estabilidade ambiental.

Abstract. Electronic textiles (e-textiles) are an advancement of wearable electronics and presupposes the integration and manufacture of electronic devices directly into clothes or textile objects of our day-to-day life, giving them new functionalities. However, convergence between electronics and textiles is particularly challenging as it must occur naturally and non-intrusively to be accepted by users. Thus, the creation of electronic circuits and conductive paths through printing techniques is seen as essential for the advancement of e-textiles. In this sense, inks and conductive pastes are essential elements for the feasibility of applications in textile electronics. However, there are limited solutions available on the market that are compatible with textile substrates. Herein, we describe preliminary results on formulations of polymeric conductive pastes using silver powder were developed and tested on commercial fabrics using the doctor-blade technique. The electrical resistivity measurements were evaluated by the 4-point method and through an electro-mechanical system specifically developed for resistance on conductive stretchable fabrics which analyzes elasticity and resistance after stretching. The developed pastes demonstrated excellent conductivity combined with good mechanical robustness and environmental stability.

1. Introdução

Eletrônicos têxteis e vestíveis integram diversas funções em uma única vestimenta e, usualmente, incorporam tecidos inteligentes passivos ou ativos que são capazes de sensoriar e sensoriar/responder ao ambiente, respectivamente. Esses dispositivos disruptivos encontram diversas aplicações em roupas inteligentes na área militar, esportiva e na área de saúde, viabilizando monitoramento de, por exemplo: temperatura corporal, batimentos cardíacos, oxigenação, dentre outros parâmetros [Ribeiro, et al., 2021], **Figura 1**.



Figura 1. Áreas de intensa aplicação da eletrônica têxtil.

A eletrônica têxtil (e-têxtil) é um avanço da eletrônica vestível e pressupõe a integração e fabricação de dispositivos eletrônicos diretamente nas roupas ou objetos têxteis do nosso dia a dia, conferindo a eles novas funcionalidades. No entanto, a convergência entre eletrônica e têxteis é particularmente desafiadora pois o produto final deve parecer mais como um tecido do que com um hardware. Assim, a criação de circuitos eletrônicos e caminhos condutores através de técnicas de impressão é vista como essencial para o avanço da e-têxtil. Para essas aplicações são utilizados vários métodos de deposição incluindo: *inkjet* (impressora a jato), *doctor blade*, *spin - coating* e *screen printing* (serigrafia). Nesse sentido, tintas e pastas condutoras são elementos essenciais para a viabilização de aplicações em e-têxtil. No entanto, existem limitadas soluções disponíveis no mercado compatíveis com substratos têxteis. As tintas e pastas condutivas são normalmente formuladas a base de partículas metálicas, como a prata e o cobre. A prata, possui a mais elevada condutividade elétrica, baixo limiar de percolação e ductilidade, o que permite a formação de filmes condutores e com certa flexibilidade [Lee, et al., 2018], aumentando o desempenho dos dispositivos eletrônicos fabricados [Fernandes et al., 2023].

Nesse trabalho descrevemos resultados preliminares do desenvolvimento de formulações de pastas condutoras poliméricas utilizando-se pós prata e testes de sua aplicação em tecidos comerciais, utilizando a técnica de *doctor-blade*. As pastas desenvolvidas demonstraram excelente condutividade aliada a boa robustez mecânica e estabilidade ambiental.

2. Experimental

2.1 Materiais e métodos

Os materiais foram adquiridos comercialmente e utilizados sem purificação prévia. Pó de prata (AgNF – flocos de prata doados pela empresa Ticon Tintas Condutoras Ltda.), Acetato - vinila de etileno (EVA, ELVAX-250, DuPont), Borracha de Estireno Butadieno (SBR, Sigma-Aldrich), Fluor-surfactante (Novec, 3M), Terpeno (93%, Sigma-Aldrich), Tolueno (99,5%, Synth), Hidróxido de sódio (NaOH, Synth) e Água DI.

2.2 Equipamentos

Os seguintes equipamentos foram utilizados no estudo: agitador magnético (IKA-C MAG HS7 DIGITAL); 4 pontas (JANDEL - model RM3000+); Turrax (IKA T25 DIGITAL).

2.3 Preparação das pastas de prata

A pasta condutora foi formulada a partir da composição mostrada na **Tabela 1** abaixo. As pastas são compostas de resina polimérica de etileno vinil acetato, pó de prata, fluorpolímero e solvente, atuando, respectivamente, como espessante, carga, surfactante e veículo. Foram testados dois solventes como veículo: tolueno, de baixo ponto de ebulição (111°C) e viscosidade - AgNF#03 e um terpeno, de mais altos ponto de ebulição (178°C) e viscosidade - AgNF#04.

Tabela 1. Composição das pastas de prata preparadas.

AgNF#03	AgNF#04
AgNF: 53,48 % p/p	AgNF: 53,48 % p/p
EVA: 7,30 % p/p	EVA: 7,30 % p/p
Tolueno: 38,9% p/p	Terpeno: 38,9% p/p
F-surfactante: 0,33 % p/p	F-surfactante: 0,33 % p/p

As composições AgNF#03 e AgNF#04 foram preparadas a partir do pó de prata juntamente com o EVA, previamente criogenicamente pulverizado, adicionando-se os respectivos solventes e homogeneizando-se em turrax por 30 minutos a 7.000 rpm. A temperatura foi monitorada para evitar evaporação do solvente e, conseqüente, alteração da composição ponderal. A **Figura 2**, mostra a pasta AgNF#04 durante a preparação e finalizada.

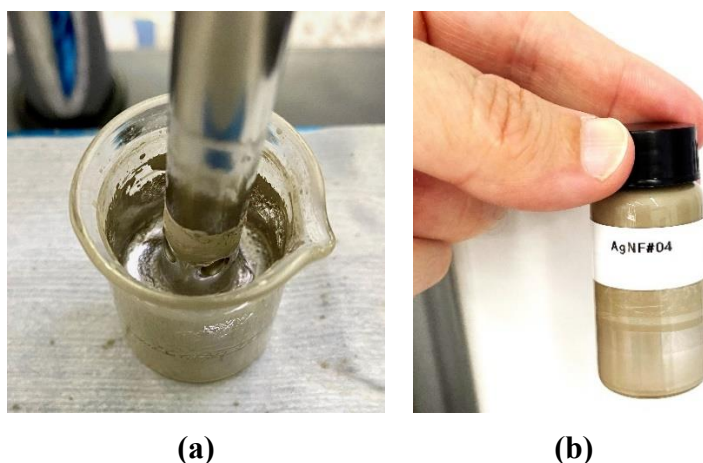


Figura 2. Fotos digitais da pasta de prata durante a preparação (a) e finalizada (b).

2.4 Deposição dos filmes de prata

As pastas de prata foram depositadas pela técnica *doctor-blade* manual [Brandt. *et al.*, 2016] sobre substratos de vidro e sobre banda elástica comercial. Foi utilizada uma fita de poliimida de 125 µm de espessura como espaçador. Após a deposição, os substratos foram submetidos a tratamento térmico, durante 15 min à 120°C em chapa quente. Por fim, a resistência elétrica pelicular (folha) foi analisada pelo método de 4 pontas.

3. RESULTADOS E DISCUSÃO

Na **Figura 3a-b** são mostrados típicos filmes de Ag obtidos e a correspondente resistência elétrica (R_s). Visualmente os filmes apresentam boa cobertura, aderência e uniformidade que foi confirmada por microscopia óptica, onde podemos confirmar o excelente recobrimento das fibras da banda elástica. De maneira geral, os filmes obtidos da pasta formulada com tolueno (AgNF#03) apresentaram R_s 20% inferior, em substratos de vidro, e até 75% inferior sobre a banda elástica. Como esperado a R_s foi até 4x superior sobre o substrato têxtil quando comparado com substrato de vidro. Ainda assim, os valores são excelentes e melhores que a maioria das pastas comerciais, atingindo valores médios de $R_s = 252,3 \text{ m}\Omega/\square$.

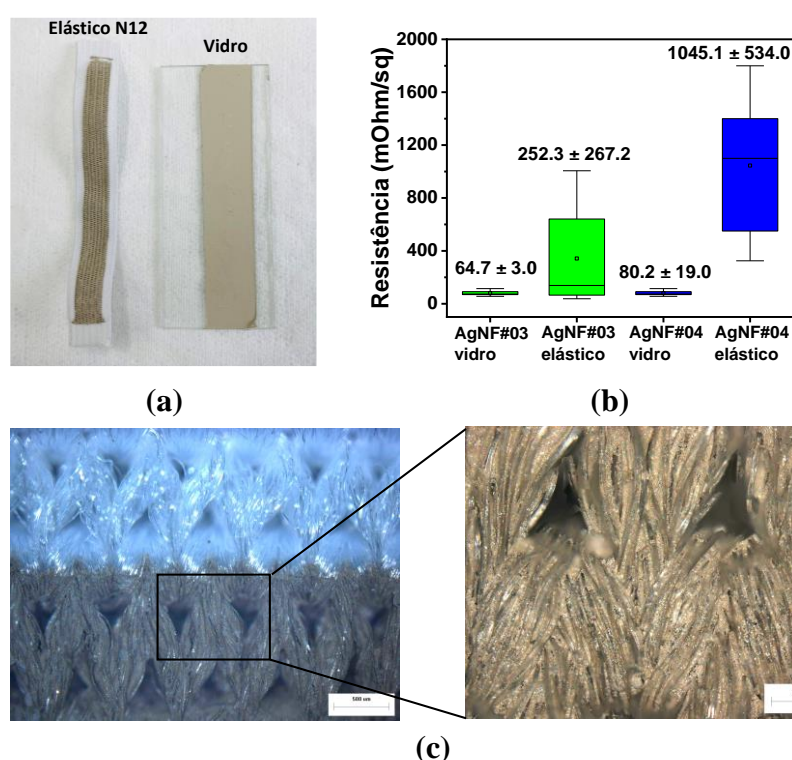


Figura 3. (a) foto digital dos filmes de Ag depositados a partir da pasta AgNF#03 sobre banda elástica N12 e vidro. (b) medidas de resistência elétrica em substrato de vidro e de banda elástica (c) microscopia óptica do filme depositado sobre banda elástica. Composição da banda elástica N12: 68% poliéster + 32% dieno.

Além das medidas elétricas estáticas, utilizando o método 4 pontas, foram realizadas medidas elétricas dinâmicas para avaliar a estabilidade do filme de Ag à sucessivos ciclos de esticamento e compressão. Inicialmente as medidas foram realizadas em um estágio manual acoplado a um multímetro digital (**Figura 4a**). Posteriormente foi desenvolvido um sistema automático para realização das medidas (**Figura 4b**). Este sistema de tração mecânica é composto de um motor de passo, atuador mecânico (responsável pela contração e estiramento mecânico da amostra sob teste), microcontrolador e circuito de corrente constante. Neste sistema a amostra de material elástico condutor é presa no atuador mecânico, o qual promove um estiramento controlado da amostra. O microcontrolador, através de seu software gerencia o funcionamento do sistema, promovendo ciclos de estiramento e contração repetitivos e leitura da resistência ôhmica

em função da distância de estiramento. Todos os dados são enviados em tempo real para um computador para armazenamento e análise posteriores.

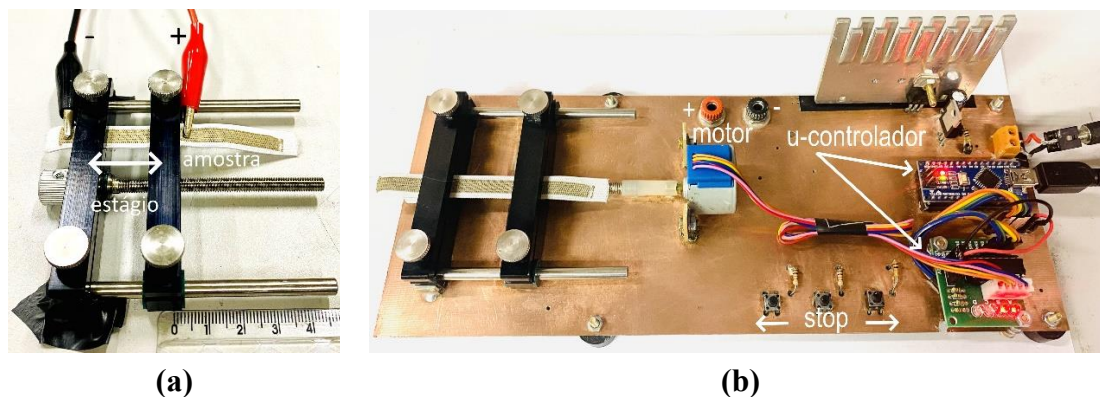


Figura 4. Sistema manual (a) e (b) automático de medidas elétricas dinâmicas.

A **Figura 5** abaixo, mostra resultados preliminares das medidas elétricas dinâmicas para ambas as pastas condutoras desenvolvidas e depositadas sobre banda elástica. Como podemos ver para ambas as formulações, sob esticamento a resistência elétrica aumenta continuamente até atingir um valor máximo e depois passa a cair novamente atingindo um valor próximo ao valor inicial no máximo de esticamento avaliado. Esse comportamento, aparentemente anômalo, pode ser explicado considerando que a banda elástica passa por dois processos durante o esticamento. No início as fibras da banda elástica se distendem continuamente aumentando a distância linear e, por consequência, a resistência elétrica que diretamente proporcional ao comprimento. Após atingir o valor máximo de esticamento possível do material, as fibras da trama começam a se aproximar até se tocarem, o que por sua vez, aumenta a área e diminui gradativamente a resistência para o fluxo de elétrons. Comportamento similar, mas inverso, é observado quando a banda elástica é submetida a compressão (curvas em vermelho). A formulação baseada em tolueno (AgNF#03) apresentou menor resistência elétrica, no entanto, a formulação com terpeno apresentou melhor aderência e elasticidade perante os testes ciclados de esticamento-compressão.

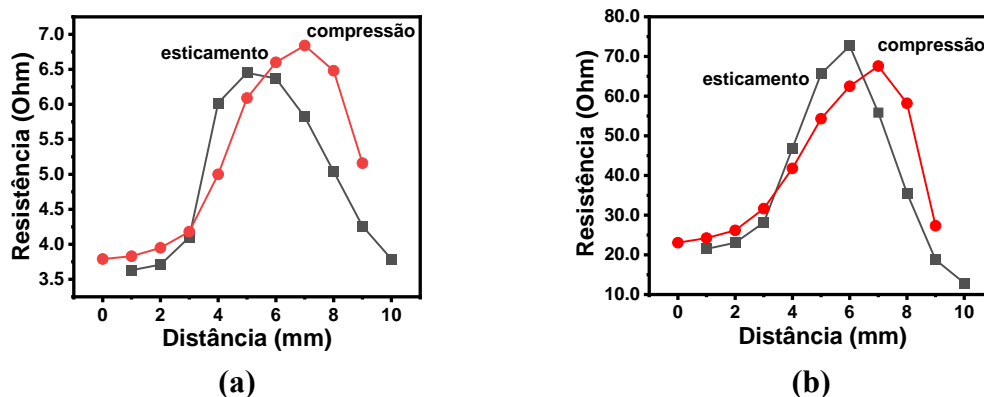


Figura 5. Gráficos de medidas elétricas dinâmicas para amostra da pasta AgNF#03 (a) e AgNF#04 (b).

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Duas formulações de pastas condutoras poliméricas contendo termoplástico EVA foram desenvolvidas utilizando solventes de alto (terpeno) e baixo (tolueno) pontos de ebulição e viscosidade. Ambas as formulações produziram filmes contínuos, uniformes e com boa aderência à substratos de vidro e banda elástica composta por poliéster-dieno, que serviu como substrato têxtil modelo. A resistência elétrica pelicular da formulação à base de tolueno produziu filmes com menor de resistência elétrica enquanto filmes obtidos da formulação com terpeno apresentaram maior robustez mecânica durante teste ciclados de esticamento-compressão realizados na banda elástica. Assim, os resultados sugerem que formulações com combinação, em proporções adequadas, de tolueno e terpeno como veículo podem resultar em filmes condutores de prata de baixa resistividade e elevada elasticidade, compatíveis com aplicações em eletrônica têxtil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fernandes, Lara Janaína et al. Síntese de nanopartículas de prata para produção de tintas condutoras: uma revisão. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312124091_sintese_de_nanoparticulas_de_prata_para_producao_de_tintas_condutoras_uma_revisao. Acesso em: 8 fev. 2023.

Lee, E.; Ahn, J.; Kwon, H.; Ma, S.; Kim, K.; Yun, S.; Moon, J. All-Solution-Processed Silver Nanowire Window ElectrodeBased Flexible Perovskite Solar Cells Enabled with Amorphous Metal Oxide Protection. *Advanced Energy Materials*, v. 8, n. 1702182, p. 1-11, 2018.

T. Brandt, R. Hillebrand, and G. Steinebach, "Doctor Blade Coating," in *Coating Technology Handbook*, Third Edition, 2016, pp. 203-232.

Ribeiro, Ricardo *et al.* Desenvolvimento de Colete com Sensores Embarcados para Aplicação Civil e Militar. *Força Aérea Brasileira*, p. 1-5, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Filipe-Wiltgen/publication/354839801_desenvolvimento_de_colete_com_sensores_embarcados_para_aplicacao_civil_e_militar_development_of_vest_with_onboard_sensors_for_civil_and_military_application. Acesso em: 27 ago. 2023.