

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

PROJETO DE UM SENSOR DE UMIDADE: ESTUDO E EXPERIMENTO SOBRE A HIGROEXPANSIBILIDADE DO PAPEL¹

DESIGN OF A HUMIDITY SENSOR: STUDY AND EXPERIMENT ON PAPER HYGROEXPANSIBILITY

**Carlos Eduardo Andrades², Luiz Antônio Rasia³, Débora Aline Kotz⁴, Cristiane Sonego
Rolim⁵**

¹ Experimento realizado a partir do efeito piezoresistivo do grafite.

² Doutorando em Modelagem Matemática

³ Líder do Grupo de Pesquisa em Materiais de Dispositivos (GPMaD) da UNIJUÍ

⁴ Mestre em Modelagem Matemática

⁵ Mestre em Modelagem Matemática

Resumo

As características do papel são amplamente estudadas para a aplicação como substrato eficiente em elementos sensores. Nesse trabalho, estudamos o efeito do teor de umidade nas fibras de celulose e realizamos um experimento inicial para desenvolver um projeto de um sensor de umidade relativa piezoresistivo de grafite em substrato de papel. É reconhecida a direção ideal para a deposição do filme semiconductor de grafite no papel para obter a variação proporcional da resistência elétrica em função da umidade relativa. Apresentamos resultados de um teste experimental inicial e discutimos a variação da resistência elétrica correspondente a quantidade de umidade relativa presente em dois dias de ensaio.

Palavras-chave: Umidade Relativa; Grafite; Efeito Piezoresistivo.

Abstract

The characteristics of paper are widely studied for application as an efficient substrate in sensor elements. In this work, we studied the effect of moisture content on cellulose fibers and carried out an initial experiment to develop a project for a graphite piezoresistive relative humidity sensor on paper substrate. The ideal direction for the deposition of the graphite semiconductor film on paper is recognized to obtain the proportional variation of the electrical resistance as a function of the relative humidity. We present results of an initial experimental test and discuss the variation in electrical resistance corresponding to the amount of relative humidity present in two days of testing.

Keywords: Relative Humidity; Graphite; Piezoresistive Effect.

1 INTRODUÇÃO

A medição da umidade é relevante para o ser humano evoluído. Para a meteorologia, é um indicativo proporcional para a tendência de chuva, ou seja, quanto menor a quantidade de vapor de água presente na atmosfera (umidade) menor a probabilidade de ocorrência de chuvas. Quanto maior a quantidade, maior o favorecimento a chuvas.

Um sensor de umidade relativa é uma forma de sensor químico que responde à presença de

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

moléculas de água no ambiente. Umidade é a quantidade de vapor d'água no ar em comparação com a quantidade de vapor necessária para saturar o ar na temperatura atual em que se encontra o dispositivo sensor.

Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, áreas como a da indústria alimentícia, agronegócios, agricultura, automotiva, ambiental, manufatureira, médica, controle de processos industriais e processamento eletrônico mostram uma maior demanda por monitoramento da umidade ambiental, conforme sugere WU et al. (2019). LAMBERTI et al., (2017) sugerem que os sensores de umidade podem ser usados em aplicações e equipamentos da área médica, agrícola, aquecimento, ventilação e sistemas de condicionamento de ar, bem como, no controle inteligente do ambiente de vida em edifícios, higrômetros, bens de consumo e em fornos de micro-ondas entre outros.

O papel é amplamente estudado como um substrato eficiente, de baixo custo e biodegradável para elementos sensores. Neste trabalho será estudada a expansibilidade das fibras de celulose ao ambiente úmido para a utilização como substrato de filmes finos de grafite no projeto de um elemento sensor de umidade piezoresistivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados alguns conceitos importantes relacionados ao trabalho.

A UMIDADE RELATIVA E SUA MEDIÇÃO

A umidade relativa (UR) do ar indica a quantidade de vapor de água presente no ar em relação à quantidade de vapor na condição de saturação e, por definição, é expressa pela razão entre a pressão parcial do vapor de d'água no ambiente e pressão de vapor na condição de saturação dada pela equação (1),

$$UR = \left(\frac{p_w}{p_{w,s}} \right) \times 100 \quad (1)$$

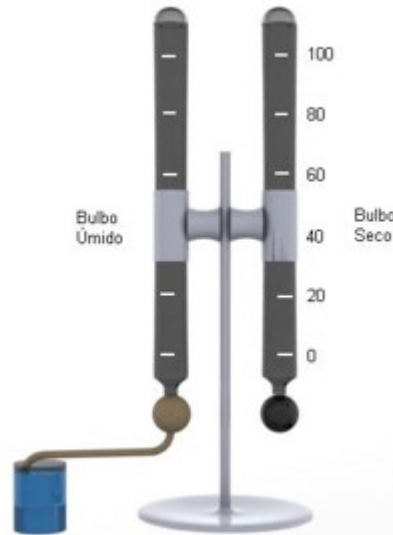
onde, UR , é a umidade relativa do ar dada em %, p_w , é a pressão parcial do vapor d'água do ambiente dada em Pascal, $p_{w,s}$, é a pressão de vapor de saturação.

Os instrumentos de medição de umidade relativa podem ser divididos em não-elétricos e elétricos. Um exemplo de um instrumento não-elétrico é mostrado na Figura 1 e é chamado de psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido, ambos de mercúrio. O princípio de expansão do mercúrio quando aquecido e de contração quando resfriado faz movimentar o indicador de temperatura. Conforme mostra a Figura 1, o instrumento é composto por dois termômetros semelhantes onde um deles é revestido por um tecido imerso em água (bulbo úmido) e o outro sem tecido (bulbo seco). É calculada a diferença de temperatura existente entre eles e o resultado é consultado em uma tabela com as respectivas umidades determinadas.



Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

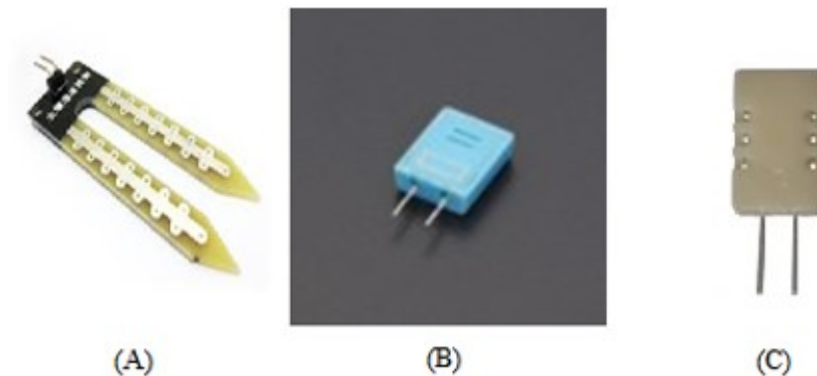
Figura 1. Instrumento de medição de Bulbo Seco e Bulbo Úmido com o princípio de mercúrio.



Fonte: KWIATKOWSKI (2011).

Instrumentos com o princípio elétrico podem ser divididos em capacitivos e resistivos, como mostra a Figura 2. Os capacitivos (Figura 2A) possuem dois eletrodos onde a diferença de capacitância entre eles é alterada devido a oscilação de umidade.

Figura 2. Sensores de umidade com o princípio (A) capacitivo e (B) e (C) resistivos.



Fonte: Souza et al., (2018).

Os resistivos são arrançados em substratos expansivos a ação da umidade. A variação da umidade provoca tensões mecânicas no substrato que são transformadas em sinais de tensão elétrica (Figura 2B) ou resistência elétrica (Figura 2C), respectivamente. Os sinais capacitivos, elétricos e resistivos são tratados eletronicamente e podem ser exibidos em displays ou alimentar um circuito automatizado, conforme a necessidade.

EFEITO PIEZORESISTIVO

O efeito piezoresistivo consiste na alteração da resistividade elétrica de materiais quando recebem a aplicação de tensão mecânica (GNAZDOWSKI; KOWALSKI, 1998). A equação (2) representa

esse efeito.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l T_l + \pi_t T_t \quad (2)$$

Onde $\Delta\rho$, é a variação da resistividade elétrica, π_l e π_t , são os coeficientes piezoresistivos longitudinais e transversais, T_l e T_t são as tensões longitudinais e transversais, respectivamente. O grafite, que é uma forma alotrópica do carbono, possui essas propriedades elétricas.

HIGROEXPANSIBILIDADE DO PAPEL

A higroexpansibilidade é uma propriedade que altera as dimensões o papel em consequência de variações no teor de umidade. Em geral, é uma função complexa da estrutura interna do papel e das propriedades higroelásticas das fibras de celulose que o constituem. Estas fibras se dilatam ou se contraem sob a influência da absorção ou reabsorção da água. Esta variação pode ser causada por alterações de umidade relativa ou da temperatura do ambiente onde se encontra o papel em equilíbrio segundo (JOFFRE et al., 2016).

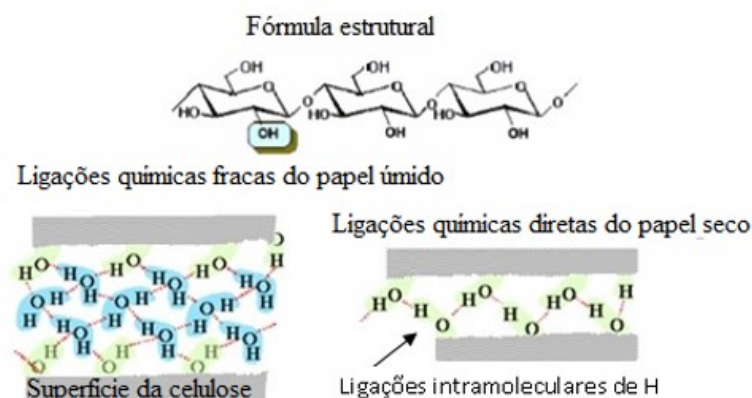
As fibras celulósicas são higroscópicas e absorvem a água rapidamente. Entretanto, em condições de equilíbrio a umidade do papel depende da umidade relativa e da temperatura do ambiente. A umidade do papel é expressa em base seca por meio da razão entre a massa de água presente na folha e a massa de sólidos secos, dado pela equação (3),

$$H_p = \left(\frac{m_t - m_d}{m_d} \right) \times 100 \quad (3)$$

onde, H_p , é a umidade do papel em %, m_t , massa de água contida na amostra de papel considerada dada em gramas, m_d é a massa da amostra, após a secagem, durante no mínimo duas horas a 105 °C e, m , é a massa total inicial da amostra de papel úmido dada em gramas.

A Figura 3 mostra os tipos de ligações fracas para o papel úmido e ligações diretas para o papel seco após tratamento térmico, cuja aglomeração destas cadeias poliméricas leva a formação da fibra de celulose.

Figura 3. Ilustração estrutural e as ligações na superfície da celulose.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

As fibras absorvem água tanto internamente quanto na superfície, se expandem ao absorver e se contraem ao perder a água (CONTI et al., 2017). Abaixo de 50% de umidade o papel encolhe, curva e perde estabilidade em sua forma original, inutilizando o rolo de papel, causando assim altos custos para o fabricante. Para evitar isso, o nível ótimo de umidade é de 55% UR. Quando esse nível é mantido, a umidade no papel mantém, não apenas a flexibilidade, mas também a estabilidade durante a produção e a embalagem final.

De outro modo, a porosidade define a resistência do papel à penetração do ar. A estrutura porosa consiste de vazios da superfície e espaços entre as fibras e poros, ou canais, que atravessam o papel. Papéis não revestidos têm moderada porosidade; papéis revestidos são relativamente não porosos. A porosidade afeta a absorção do veículo das tintas gráficas e a penetração de adesivos e vernizes e água (LOVIKKA; RAUTKARI; MALONEY, 2017).

O grau de porosidade do papel depende do modo de fabricação, ou seja, o papel constituído apenas de fibras longas é mais poroso que aquele que contém apenas fibras curtas, porque estas ficam mais compactadas durante o processo de fabricação. A carga mineral do processo de fabricação torna o papel menos poroso.

O grau da cristalinidade das fibras da celulose e o número de grupos de hidroxilas livres assumem uma importância fundamental na absorção da água pelo papel.

A razão entre a variação dimensional, resultante de uma alteração no teor de umidade e a sua dimensão inicial definem a higroexpansão do papel segundo (MOHAMMADZADEH; BARLETTA; GISARIO, 2020) dado pela equação (4):

$$\varepsilon_h = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

onde, ε_h , higroexpansão, %, Δl , variação no comprimento da amostra em, l_0 , comprimento inicial da amostra de papel.

As micro fibrilas presentes na estrutura das paredes das fibras, se encontram orientadas essencialmente na direção paralela à do eixo longitudinal das fibras e a maior parte da deformação dimensional se desenvolve na direção transversal, ou seja, perpendicular ao eixo da fibra (LEPPÄNEN et al., 2017).

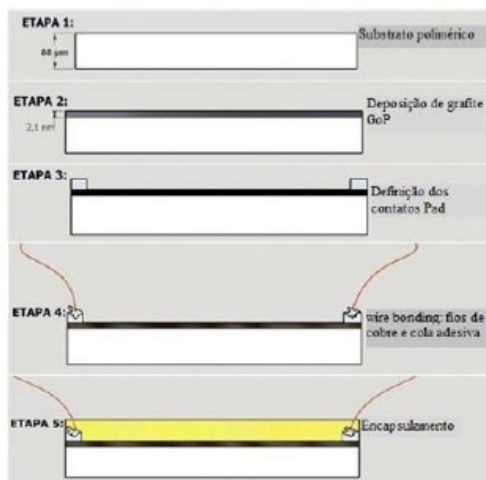
3 METODOLOGIA

Amostras de papel foram arranjadas como substrato de elemento sensor de grafite para a verificação do fenômeno da higroexpansibilidade das fibras de celulose.

Para a extração dos dados experimentais dos elementos sensores piezoresistivos de grafite, foram seguidas etapas conforme a Figura 4.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

Figura 4. Etapas da construção das amostras.

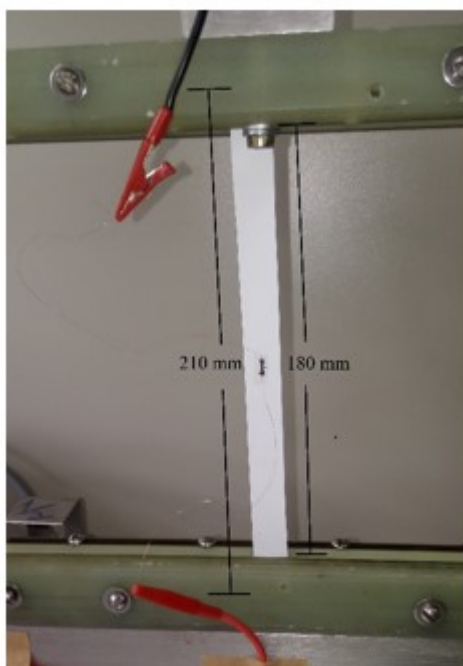


Fonte: Pedrali et al., (2018).

O substrato de papel foi recortado na medida 210mmX15mm (Etapa 1); o filme de grafite foi depositado através da técnica GoP (Etapa 2); é definido e fixado os terminais de medição nas extremidades do filme de grafite (Etapa 3 e 4); foi realizado o encapsulamento final de proteção (Etapa 5).

A amostra é inserida em uma máquina de ensaio de tração para aplicação de tensões mecânicas, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5. Amostra fixada na máquina de ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

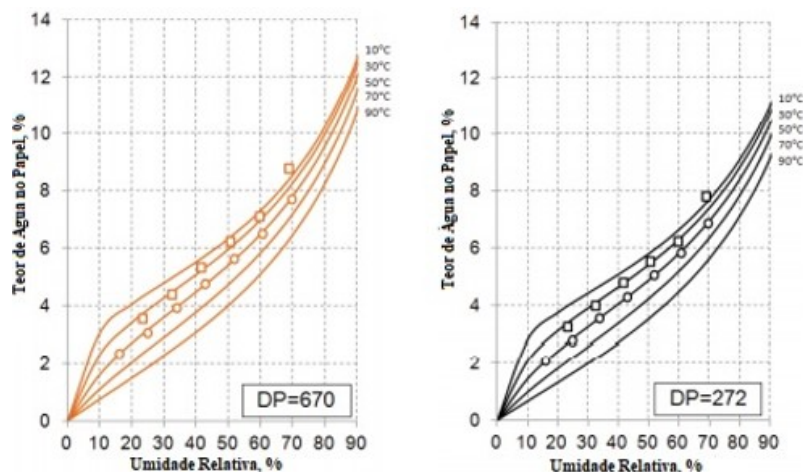
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

Na Figura 5 verificamos a amostra ajustada na máquina recebendo tensões longitudinais. E, ao mesmo tempo, realizando a leitura da resistência elétrica através dos terminais tipo garras de jacaré. A umidade relativa aplicada na amostra do elemento sensor é a quantidade presente no momento do ensaio experimental. As duas amostras foram ensaiadas, uma com o piezoresistor na posição longitudinal e outra na posição transversal, em dois dias com umidades relativas distintas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A umidade do papel em condição de equilíbrio com o ambiente diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o incremento da umidade relativa do ar, conforme ilustra as curvas de isoterma mostradas na Figura 6.

Figura 6. Curvas de isoterma da umidade do papel pela umidade relativa do ar em diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Przybylek (2016).

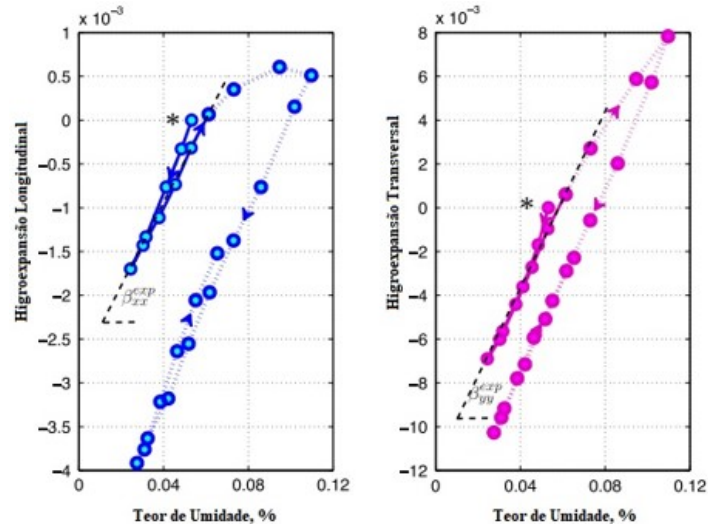
As amostras de papel tipo Kraft polimerizadas DP=670 e DP=272 (PRZYBYLEK, 2016) foram mantidas, inicialmente, em 180°C por 3 h e 20 h, respectivamente.

A Figura 6 mostra que a umidade relativa influencia no teor de água do papel, mas a temperatura alta diminui consideravelmente o teor de água nas fibras. Em condição de umidade relativa constante, a umidade do papel depende da temperatura ambiente.

O papel se deforma em função da variação do teor de umidade. Porém, segundo Leppänen et al. (2017), o processo de expansão e contração do papel, devido à mudança no teor de umidade, não é linear, nem reversível, em todas as condições, conforme ilustra a Figura 7.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

Figura 7. Curvas de expansão e contração do papel para diferentes umidades.



Fonte: Adaptado de Bosco et al. (2015).

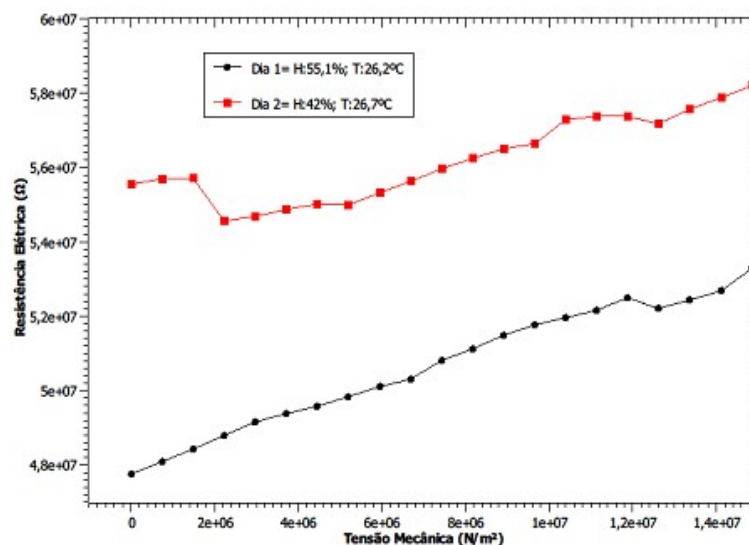
A higroexpansão das fibras das fibras individuais é marcadamente anisotrópica.

De acordo com a Figura 7, é percebido que a higroelasticidade transversal do papel possui uma maior proporcionalidade ao teor de umidade do que a higroelasticidade longitudinal. Com isso, se pode considerar que a direção transversal é a apropriada para a deposição do filme fino de grafite.

Analisando os resultados dos testes experimentais iniciais foi percebido a influência da variação da umidade relativa nas propriedades elétricas dos elementos sensores piezoresistivos de grafite.

O conceito da higroexpansibilidade do papel foi confirmado onde a variação das dimensões das fibras de celulose são alteradas devido ao teor de água contido, conseqüentemente, a variação da resistência elétrica também foi modificada. A Figura 8 mostra esse efeito na amostra D7.

Figura 8. Variação de resistência elétrica da amostra D7 com 55,1% e 42% de U.R.

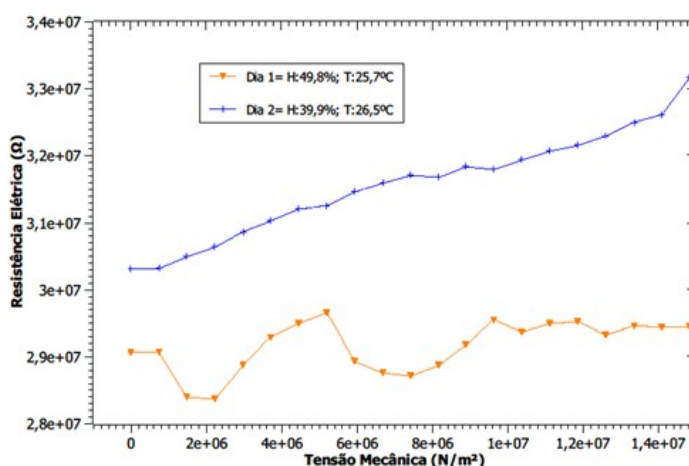


Fonte: Próprio Autor (2020).

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

A diminuição de 13,1% de umidade relativa provocou um aumento na variação da resistência elétrica quando comparados o Dia 1 com o Dia 2.

Figura 9. Variação de resistência elétrica da amostra C4 com 49,8% e 39,9% de U.R.



Fonte: Próprio Autor (2020).

A diferença de, aproximadamente, 10% de umidade relativa e 1°C provocou um aumento na variação da resistência elétrica do elemento sensor. Ou seja, nas duas amostras acima, a resistência elétrica obteve um comportamento inversamente proporcional ao comportamento da umidade relativa. Pode-se confirmar que as fibras de celulose do papel absorveram a umidade do ambiente e consequentemente mudaram suas dimensões devido ao teor de água contidas nelas. Provocaram tensões mecânicas no filme de grafite e ocorreu o efeito piezoresistivo.

Comparando a capacidade de resposta a variação da umidade relativa do elemento sensor de grafite em substrato de papel da Figura 8 com a Figura 9, na primeira é percebido que apesar da variação da umidade o elemento sensor mantém suas propriedades elétricas e mecânicas proporcionais diferentemente da segunda onde ocorrem oscilações consideráveis.

Tais resultados são importantes para a continuação do projeto de um sensor de umidade piezoresistivo de grafite.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSCO, Emanuela; BASTAWROUS, Mary V.; PEERLINGS, Ron H.j.; HOEFNAGELS, Johan P.m.; GEERS, Marc G.d.. **Bridging network properties to the effective hygro-expansivity of paper: experiments and modelling: experiments and modelling.** Philosophical Magazine, [s.l.], v. 95, n. 28-30, p. 3385-3401, 20 abr. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14786435.2015.1033487>.

CONTI, A.; PALOMBO, M.; PARMENTIER, A.; POGGI, G.; BAGLIONI, P.; LUCA, F. de. **Two-phase water model in the cellulose network of paper.** Cellulose, [s.l.], v. 24, n. 8, p. 3479-3487, 29 maio 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/>

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

s10570-017-1338-2.

GNIAZDOWSKI, Zenon; KOWALSKI, PaweÅ., Practical approach to extraction of piezoresistance coefficient. **Sensors And Actuators A: Physical**, [S.L.], v. 68, n. 1-3, p. 329-332, jun. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-4247\(98\)00034-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-4247(98)00034-x).

JOFFRE, T.; ISAKSSON, P.; DUMONT, P. J. J.; DUROSCOAT, S. Rolland; STICKO, S.; ORGÉAS, L.; GAMSTEDT, E. K.. **A Method to Measure Moisture Induced Swelling Properties of a Single Wood Cell**. *Experimental Mechanics*, [s.l.], v. 56, n. 5, p. 723-733, 5 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-015-0119-9>.

KWIATKOWSKI, Jotair Elio Junior. **Simulação e Controle do Sistema de Aeração da Massa de Grãos de Soja**. 2011. 233 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.

LAMBERTI, Nicola A.; LAMURA, Monica; GRECO, Nicola; D'UVA, Pasquale; APUZZO, Valerio. **A resonant sensor for relative humidity measurements based on a polymer-coated quartz crystal**. 2017 7th Ieee International Workshop On Advances In Sensors And Interfaces (iwasi), [s.l.], v. 7, n. 7, p. 259-262, jun. 2017. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iwasi.2017.7974266>.

LEPPÄNEN, Teemu; ERKKILÄ, Anna-leena; KOUKO, Jarmo; LAINE, Valtteri; SORVARI, Joonas. **A plasticity model for predicting the rheological behavior of paperboard**. *International Journal Of Solids And Structures*, [s.l.], v. 106-107, p. 38-45, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.11.033>.

LOVIKKA, Ville A.; RAUTKARI, Lauri; MALONEY, Thaddeus C.. **Changes in the hygroscopic behavior of cellulose due to variations in relative humidity**. *Cellulose*, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 87-104, 11 nov. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-017-1570-9>.

MOHAMMADZADEH, A.; BARLETTA, M.; GISARIO, A.. **Manufacturing of cellulose-based paper: dynamic water absorption before and after fiber modifications with hydrophobic agents. : dynamic water absorption before and after fiber modifications with hydrophobic agents**. *Applied Physics A*, [s.l.], v. 126, n. 5, p. 382-383, 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-020-03577-4>.

PEDRALI, Patricia Carolina; RASIA, Luiz Antonio; VALDIERO, Antonio Carlos; FRAGA, Mariana Amorim. **Graphite Piezoresistive Sensors in Polymeric Substrates**. *International Journal Of Advanced Engineering Research And Science*, [s.l.], v. 5, n. 10, p. 105-109, 2018. AI Publications. <http://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.10.14>.

PRZYBYLEK, P.. **Water saturation limit of insulating liquids and hygroscopicity of cellulose in aspect of moisture determination in oil-paper insulation**. *Ieee Transactions On Dielectrics And*

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 12 - Consumo e produção responsáveis

Electrical Insulation, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 1886-1893, jun. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tdei.2016.005627>.

SOUZA, Rodolfo et. al. **Sensores de baixo custo para determinação do conteúdo volumétrico de água do solo**. Conference: XI Encontro de Recursos Hídricos em SergipeAt: Aracaju-SE, 2018.

WU, Jin; WU, Zixuan; XU, Huihua; WU, Qian; LIU, Chuan; YANG, Bo-ru; GUI, Xuchun; XIE, Xi; TAO, Kai; SHEN, Yi. **An intrinsically stretchable humidity sensor based on anti-drying, self-healing and transparent organohydrogels**. Materials Horizons, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 595-603, 2019. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c8mh01160e>.

Parecer CEUA: 3.069.588