

Project of Ceramic Pressure Transducer with Thick Film

O. Correa, J.M. de Oliveira Jr., W. Bonventi Jr., and N. Aranha

Abstract— The Aim of this work is to develop a pressure transducer using conductive silver-palladium paste (AgPd), providing a cost reduction in the final product. It was developed a pressure sensor on alumina substrate with conductive tracks of silver-palladium (AgPd) and ruthenium oxide (RuO₂) as sensor elements and piezo resistors, using thick film technology. The AgPd paste sensor withstood over 10 million cycles at 1Hz without any damage. The developed transducer presented linear response in all working pressure range, even under different temperatures. The results obtained in this project using thick film are interesting for small industries due the low cost of the final product compare with thin films technic.

Index Terms— Pressure sensor, thick film, alumina substrate.

I. INTRODUCTION

O mercado global de sensor de pressão atingiu o valor de US\$ 6,53 bilhões em 2014 e a previsão para 2020 é de US\$ 9,36 bilhões, sendo que desse total, os sensores piezo resistivos representam a maior demanda, tendo seu valor de mercado atingido US\$ 1,82 bilhões em 2014. A demanda por esse tipo de sensor é atribuída ao aumento da produção veicular e seu uso na área médica, mercados cativos para esse tipo de tecnologia. Do total de US\$ 1,82 bilhões, US\$ 1,69 bilhões representam somente a demanda do mercado automotivo, correspondendo a 92,86% do mercado global atual. Além disso, há uma forte pressão para a redução de emissões de gases poluentes e eficiência energética; em 2013 foi firmado um acordo entre os países do mercado comum europeu, que impôs que, a partir de 2018 todos os veículos produzidos dentro do bloco, deverão atender as novas exigências [1]. Dentro deste contexto, o controle da pressão sobre o sistema de lubrificação do motor é essencial, incrementando mais um sensor de pressão nos veículos automotores, item foco deste trabalho.

O mercado de sensores de pressão está dividido por segmento, sendo liderado pelo mercado automotivo, seguido pela indústria médica, industrial em geral, indústria do petróleo e gás. No mercado automotivo, os sensores de pressão são amplamente aplicados em componentes vitais como: pressão do óleo lubrificante do motor, freio ABS, bomba de combustível, transmissão, *airbags*, pressão dos pneus, gás da exaustão,

entrada de ar, pressão do ar condicionado e pressão do sistema de injeção direta de gasolina [1, 2, 3].

Levando em conta o tipo de sensor, o mercado está dividido em sensor extensométrico, piezoresistivo, piezelétrico, capacitivo, eletromagnético (LVDT) e óptico, sendo o sensor piezoresistivo o líder no mercado automotivo atual e em crescimento acelerado [2, 3].

Este trabalho explora a piezoresistividade, a tecnologia de filme espesso [4, 5] e o substrato de alumina, bem como propõe a aplicação da pasta condutora de prata-paládio em substituição à usual pasta de ouro (Au), no desenvolvimento de um transdutor de pressão piezoresistivo, utilizando a tecnologia de filme espesso. Atualmente os transdutores de pressão piezoresistivos a filme espesso utilizam a pasta de ouro como pasta condutora, sendo que a sua substituição pela pasta de prata-paládio proporciona uma redução significativa no custo final do produto, visto que a pasta de ouro tem um custo de US\$ 86,00/grama e a de prata-paládio US\$ 5,00/grama, portanto, uma redução extremamente significativa para o mercado automotivo.

A substituição dessa pasta implica em avaliar o desempenho da pista condutora de prata paládio sobre condições de fadiga, provocado pela deformação da membrana, que ocorre a cada partida do veículo, onde a temperatura pode variar de -40°C a 150°C . O mercado automotivo exige uma garantia de vida útil do produto de 10 anos ou 10 milhões de ciclos de acionamentos.

A decisão em adotar a tecnologia de filme espesso [6, 7, 8] como ideal para aplicação em detrimento a filme fino é justificada, tomando como referência a Tabela I.

TABELA I
PROPRIEDADES DE FILMES FINOS E ESPessos [2].

Propriedade	Tecnologia	
	Filme fino	Filme espesso
Resolução	< 0,25 μm	> 2 μm
Temperatura de trabalho	< 125 $^{\circ}\text{C}$	>> 125 $^{\circ}\text{C}$
Dimensão do sensor	< 0,75 μm	> 90 μm
Custo para produção em escala	Baixo	Moderado
Precisão geométrica	Muito alta	Pobre
Custo para pequenas quantidades	Alto	Baixo
Possibilidade de dispositivos não encapsulados	Baixa	Alta
Versatilidade	Baixa	Muito boa
Consumo de energia no processo	Baixo	Moderado
Manuseio	Difícil	Fácil
Investimento em equipamentos para processo	Muito grande	Pequeno

O. Correa, TSA Tecnologia em Sistemas Automotivos Ltda, Itu, São Paulo, Brasil, (e-mail: osvaldo@tsadobrasil.com.br)

J.M de Oliveira Jr., Universidade de Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil, (e-mail: jose.oliveira@prof.uniso.br)

W. Bonventi Jr., Universidade de Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil, (e-mail: waldemar.bonventi@prof.uniso.br)

N. Aranha, Universidade de Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil, (e-mail: norberto.aranha@prof.uniso.br)

Conforme Taylor [2], as duas tecnologias apresentam vantagens e desvantagens, devendo-se considerar a aplicação para definir qual delas deve ser adotada. Para aplicação como sensor de pressão, tomando a tabela de Taylor como referência, foram consideradas as seguintes características:

- (i) Facilidade na manipulação, implicando em processo mais simples com custos menores.
- (ii) Faixa de temperatura de trabalho entre -40°C e 150°C .
- (iii) Confiabilidade e o baixo custo de produção para baixo volume.
- (iv) Disponibilidade do processo de filme espesso, localmente.
- (v) O mercado solicita o produto com a tecnologia de filme espesso (segundo norma do cliente, Chrysler Group / Performance Standard PF 11858).
- (vi) Disponibilidade de representante local das fabricantes de pastas para filme espesso.
- (vii) Disponibilidade de representante local do fabricante de substratos para sensores de pressão.
- (viii) Disponibilidade de estrutura local treinada e motivada por novos desafios.

Portanto, a decisão não foi puramente técnica, mas o contexto criou todo um ambiente favorável ao desenvolvimento deste projeto, que teve início em uma solicitação do próprio mercado. Apesar da tecnologia de filme espesso ter sido desenvolvida já a algumas décadas, ela ainda compete com soluções mais atuais, podendo ser aplicada com vantagens segundo os parâmetros descritos acima. Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um transdutor de pressão sobre substrato de alumina, utilizando pasta condutora de prata e paládio (AgPd), proporcionando com isso uma redução de custo no produto final.

II. MATERIAIS E MÉTODO

As amostras foram preparadas utilizando substratos de alumina A-471 da empresa Kyocera, as pastas piezoresistiva 2041, condutora 7484R e polimérica 5480, da empresa americana Dupont.

A impressão do circuito sobre o substrato de alumina foi realizada por litografia convencional [9, 10], utilizando uma tela de aço com 350 fios por polegada. Inicialmente, foi aplicada a pasta de AgPd para a impressão das trilhas, a qual foi sinterizada a 850°C por 30 minutos [11, 12]. Em seguida aplicou-se a pasta de óxido de rutênio (RuO_2) para a impressão dos piezoresistores. A temperatura e o tempo de secagem da pasta de RuO_2 foi o mesmo utilizado para a pasta de AgPd.

As características dimensionais do sensor após o processo de sinterização foram obtidas por meio de um projetor de perfil digital marca Pantec modelo CPJ-3015J

As medidas da resistência ôhmica dos piezoresistores foram realizadas com um multímetro Fluke modelo 8842A.

O processo de ajuste do zero do transdutor foi realizado com uma máquina laser da empresa Teradyne modelo W640, o qual possui um laser Nd-Yag de 1064 nanômetros, específico para tecnologia de filme espesso. Este processo de ajuste consiste em

efetuar um corte no filme resistivo, limitando sua largura e comprimento, incrementando, portanto, seu valor ôhmico/resistivo.

Após a impressão das trilhas de AgPd e dos piezoresistores de RuO_2 sobre a placa de alumina, cobriu-se o circuito com pasta polimérica curada a 200°C . A função do polímero neste caso é proteger o circuito mecânica e eletricamente.

Foi desenvolvido especialmente para este projeto, um dispositivo para montagem dos transdutores individualmente, e outro em que os transdutores são fixados para realização dos testes mecânico e elétrico. Este dispositivo é composto por uma bomba hidráulica, marca SALCAS, modelo 1000, para aferição do transdutor de pressão, as saídas do transdutor foram conectadas à entrada do multímetro Fluke modelo 8842A, para leitura da sua tensão da saída.

Utilizando uma estufa com temperatura controlada realizaram-se os testes para o levantamento da curva de resposta dos sensores na faixa de $26,5^{\circ}\text{C}$ a 150°C [13]. Nesse teste foi utilizado um sistema de aquisição de dados marca Graphtec, modelo Midiloggeer GL220, onde foram armazenados os dados de pressão e temperatura.

O teste de durabilidade à temperatura ambiente foi realizado utilizando um sistema com oscilador de 1 Hz, com um tempo relativo desligado de 35% e ligado de 65%, e a pressão ajustada para 1 MPa no transmissor de pressão digital de referência da marca SMC, modelo ISE30-01-65-M. Assim, foram levantadas as curvas de resposta em: 100 mil, 200 mil, 500 mil, 1 Milhão, 5 Milhões e 10 Milhões de ciclos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 mostra o sensor com as trilhas de AgPd e os piezoresistores de RuO_2 .

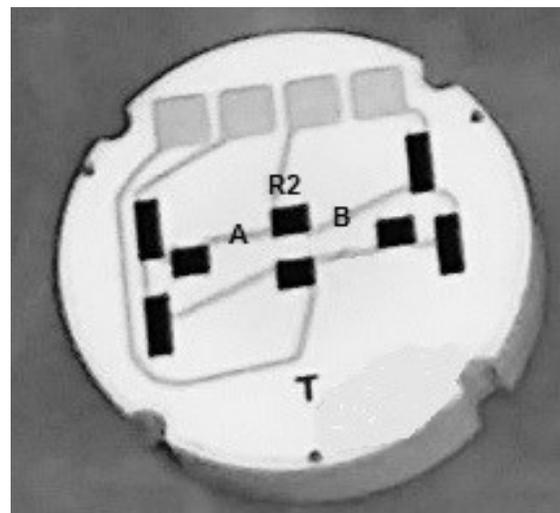


Fig. 1. Vista do elemento sensor com as trilhas de AgPd e os piezoresistores de RuO_2 .

O perfil da curva da Fig. 2 mostra que pequenas variações na espessura da camada de pasta resistiva depositada sobre o substrato podem corresponder a um grande incremento da resistência ôhmica. A resistência de “folha” ou “resistividade por quadrado”, é uma característica muito importante do

processo, ela depende da resistividade intrínseca do material e da espessura ou profundidade da camada [14].

A variação da espessura do substrato não exerce nenhuma influência na espessura da impressão, pois esta é realizada com um dispositivo sob pressão constante. Pequenas variações de espessura no substrato são compensadas por um sistema de avanço pneumático vertical que mantém a espessura da camada, que é definida pela espessura da tela emulsionada, mantendo a resistência final do resistor [14].

A curva da Fig. 2 é importante, pois auxilia o operador da impressora para possíveis ajustes, e é fundamental para ajustar os parâmetros do processo de impressão, visto que a espessura de impressão é determinada pela espessura da emulsão aplicada na confecção da tela.

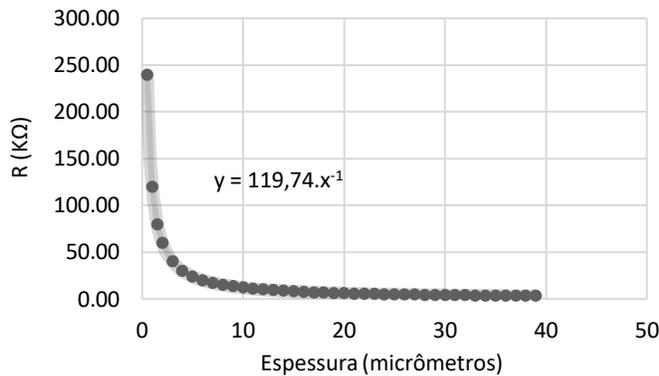


Fig. 2. Relação entre espessura do filme e a resistência obtida após a sinterização da pasta de RuO₂.

TABELA II
VARIAÇÃO DIMENSIONAL (mm)

R	Dim	Sp	S1	ΔDim	ΔDim (%)
R ₁	C1	0,5	0,57	0,07	14,00
	L1	2,5	2,46	-0,05	-1,80
R ₂	C2	1,0	1,05	0,05	5,10
	L2	1,2	1,17	-0,03	-2,33
R ₃	C3	1,0	1,09	0,09	9,30
	L3	1,2	1,16	-0,04	-3,00
R ₄	C4	0,5	0,51	0,01	1,40
	L4	2,5	2,46	-0,05	-1,80
R ₅	C5	0,5	0,48	-0,02	-3,80
	L5	2,5	2,44	-0,06	-2,24
R ₆	C6	1,0	1,05	0,05	5,00
	L6	1,2	1,17	-0,03	-2,33
R ₇	C7	1,0	1,04	0,04	4,40
	L7	1,2	1,17	-0,03	-2,50
R ₈	C8	0,5	0,51	0,01	2,40
	L8	2,5	2,47	-0,03	-1,16

R é o resistor, Dim as dimensões, C o comprimento, L a largura, Sp o valor projetado, S1 os valores medidos, ΔDim = S1 - Sp, ΔDim % a variação percentual.

Na Tabela II são apresentadas as variações entre as

dimensões projetadas (em milímetro) e as medidas obtidas dos piezoresistores que estão indicados na Fig. 3, assim como as respectivas variações percentuais. O comprimento e a largura dos piezoresistores variaram na faixa de -0,02 a 0,09mm e de -0,06 a -0,03mm, respectivamente. Nota-se uma variação dimensional significativa em R₁ (14%), porém, como R₁ não é um resistor ativo, essa variação não afeta o desempenho do produto. Entre os resistores ativos, R₂, R₃, R₆ e R₇, a maior variação dimensional, de 9,3%, é encontrada em R₃. Apesar deste valor, essa variação não deve ser analisada isoladamente, mas sim num contexto tridimensional, espessura, largura e comprimento.

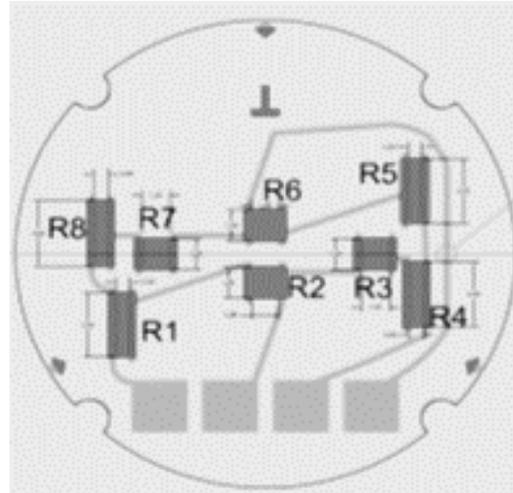


Fig. 3. Esquema do posicionamento dos piezoresistores sobre a placa de alumina.

A Tabela III apresenta a constante dimensional teórica (Kdt) e a real (Kd-S1), baseado nas dimensões medidas no protótipo testado. Os valores de Kdt são obtidos pela relação teórica do comprimento dividido pela largura do resistor; (Kd-S1) representa a relação real do comprimento dividido pela largura do resistor, Δd corresponde à diferença (Kd-S1 - Kdt), enquanto Δd % é a variação percentual. Observa-se que entre os piezoresistores ativos, R₂, R₃, R₆ e R₇, ocorre uma variação maior em R₃ de 12,68%, como já havia sido observado anteriormente.

A seguir foi analisada a variação da resistência ôhmica. Na Tabela IV são apresentados os valores dos piezoresistores projetados (Rt), os valores piezoresistivos calculados baseados nas dimensões medidas (Rc) e o valor real (Rr) das resistências medidas nos próprios piezoresistores.

O valor de ΔR na Tabela IV corresponde à diferença Rr - Rc, que caracteriza a diferença entre o valor resistivo lido (Rr) e o valor calculado (Rc), baseado nas dimensões reais medidas. ΔR% corresponde à variação percentual entre Rr e Rc.

Observando os piezoresistores ativos R₂, R₃, R₆ e R₇, nota-se que R₃ apresenta maior discrepância na sua resistência em relação a R₂, confirmando a influência dimensional já notada anteriormente em R₃, nas tabelas 2 e 3. Essas variações observadas não afetam em nada as características físicas ou elétricas do produto final, pois o balanceamento da ponte de Wheatstone (formada pelos piezoresistores R₂, R₃, R₆ e R₇)

pode ser ajustado com o laser, que promove a compensação desses desvios, permitindo que a ponte permaneça em equilíbrio.

TABELA III
VARIACÃO DA CONSTANTE DIMENSIONAL PROJETADA E A OBTIDA

Variação: Kdt, Kd-S1				
R	Kdt	Kd-S1	Δd	$\Delta d \%$
R ₁	0,20	0,23	0,03	16,09
R ₂	0,83	0,90	0,06	7,61
R ₃	0,83	0,94	0,11	12,68
R ₄	0,20	0,21	0,01	3,26
R ₅	0,20	0,20	0,00	-1,60
R ₆	0,83	0,90	0,06	7,51
R ₇	0,83	0,89	0,06	7,08
R ₈	0,20	0,21	0,01	3,60

TABELA IV
VALORES PROJETADOS E MEDIDOS DOS PIEZORESISTORES

Variação Resistiva (Ω)						
R	Rt	Rc	tc $\Delta R\%$	Rr	ΔR	$\Delta R\%$
R ₁	2100	2.437,88	16,1	4752,2	2314,3	94,9
R ₂	8750	9.415,96	7,6	16832,1	7416,1	78,8
R ₃	8750	9.859,54	12,7	17338,1	7478,5	75,9
R ₄	2100	2.168,43	3,3	4705,0	2536,5	117,0
R ₅	2100	2.066,49	-1,6	4414,6	2348,11	113,6
R ₆	8750	9.407,00	7,5	17297,4	7890,4	83,9
R ₇	8750	9.369,23	7,1	17202,3	7833,0	83,6
R ₈	2100	2.175,64	3,6	4647,1	2471,4	113,6

Na Fig. 4 são apresentadas as curvas de resposta (tensão *versus* pressão) obtidas para dois transdutores testados, em vermelho o transdutor de referência (Tr) e, em azul, o protótipo construído (Td). O transdutor de referência é um produto comercial, baseado em um sensor cerâmico de pressão modelo CPS 1184. Observa-se que o protótipo apresenta resposta linear semelhante ao transdutor de referência. Nota-se uma diferença no ganho entre os transdutores, havendo um ganho de 16,81 (3,362 mV/V) no transdutor de referência e de 11,79 (2,358 mV/V) para o transdutor desenvolvido. Essa diferença pode ocorrer por diversos motivos, entre eles, posicionamento dos piezos resistores sobre o substrato, variação da espessura do substrato ou processo de sinterização [6, 15].

A linearidade de um transdutor de pressão é definida no projeto, a partir de características físicas do corpo/substrato onde será aplicado os elementos sensores, considerando-se a relação de Poisson, módulo de Young [7], ponto de

engastamento e uniformidade da espessura, portanto, não passível de alteração ou qualquer tipo de ajuste após sua construção. O ganho de um transdutor de pressão, assim como a linearidade, também é uma característica física [16, 17], porém, pode se incrementar o ganho acrescentando um amplificador ou um condicionador de sinais, promovendo assim seu aumento na saída do transmissor. Deve-se observar que não houve uma alteração no ganho do transdutor, mas sim à amplificação do sinal de saída do transdutor devido a utilização do condicionador (ou amplificador) resultando numa melhor resposta do transmissor.

Apesar do protótipo apresentar um ganho menor em relação ao transdutor comercial, essa diferença pode ser minimizada com um novo layout, ajustando a posição dos piezoresistores R₃ e R₇, aumentando assim o ganho do transdutor. Para uma tensão de saída de 4,5 volts, com o transdutor desenvolvido, seria necessário um amplificador com ganho de 381,68, enquanto para o transdutor de referência seria preciso um ganho de 267,69, o que pode ser facilmente obtido com um amplificador para instrumentação disponível no mercado.

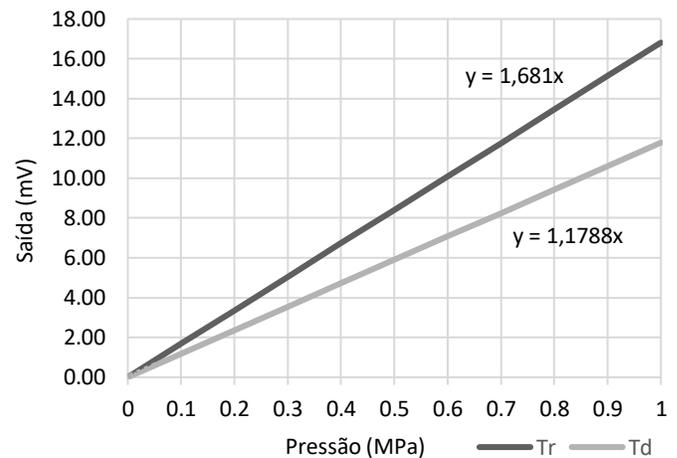


Fig. 4. Curvas da resposta do transdutor de referência (Tr) e transdutor desenvolvido (Td).

A resposta do protótipo em função da pressão, para diferentes temperaturas está apresentado na Fig. 5. Cada reta corresponde a uma temperatura em que as medidas foram realizadas, iniciando em 26,5°C (com uma tensão offset de 0 mV para pressão de 0 MPa) e seguido pelas temperaturas de 40, 60, 80, 100, 110, 130, 140 e 150°C (com uma tensão offset de -6,6 mV para pressão de 0 MPa).

Observa-se no gráfico da Fig. 5 que a resposta da tensão de saída do transdutor *versus* a pressão aplicada é linear em toda faixa estudada e para as diferentes temperaturas utilizadas nos testes. Conforme esperado, nota-se um deslocamento da tensão de offset proporcional à temperatura. O que indica que o transdutor de pressão projetado, neste caso, também pode ser utilizado como sensor de temperatura uma vez calibrado para este fim.

Os resultados obtidos mostram que na pressão de 0 MPa, de 26,5°C à 150°C, ocorre um deslocamento da tensão de offset de -6,6 mV, sem que seja alterada a pressão sobre o transdutor. Essa característica é observada em toda a faixa de pressão, com

uma variação de $-6,6$ mV a $7,2$ mV. Este efeito pode ser compensado adicionando um condicionador de sinal na entrada de offset, um NTC com uma curva que atenda a essa aplicação. O NTC é um resistor com coeficiente térmico resistivo negativo, ou seja, quando aumenta a temperatura sua resistência diminui. Este elemento sensor pode ser construído com a própria pasta de RuO_2 , utilizada neste projeto [8, 18].

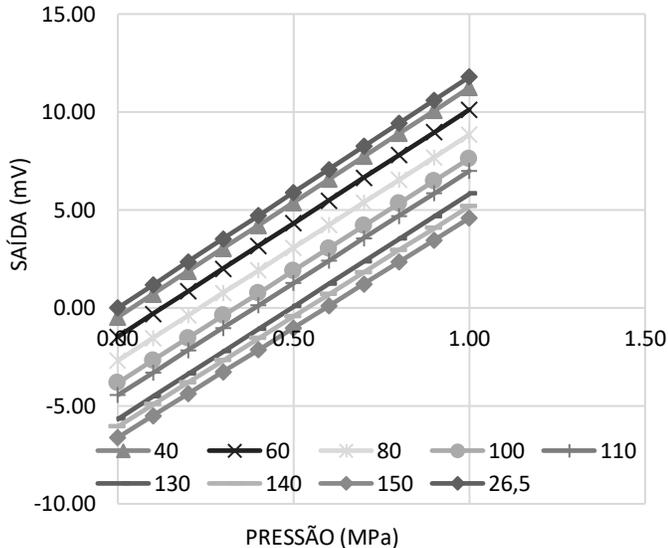


Fig. 5. Curvas da resposta do transdutor à variação de temperatura.

O teste de durabilidade do transdutor, conforme montagem apresentada na Fig. 6, foi realizado durante 5 meses, com frequência de 1 Hz, tempo relativo de 0,65s desligado e 0,35 s ligado, com 86.400 ciclos de teste por dia, a uma pressão de 1,0 MPa, totalizando 10.022.400 ciclos ao final do teste. A pressão de teste foi ajustada para 1,0 MPa, portanto para cada ciclo o transdutor foi submetido a pressão tipo degrau de 1,0 MPa por 0,35s e a 0 MPa por 0,65 s.

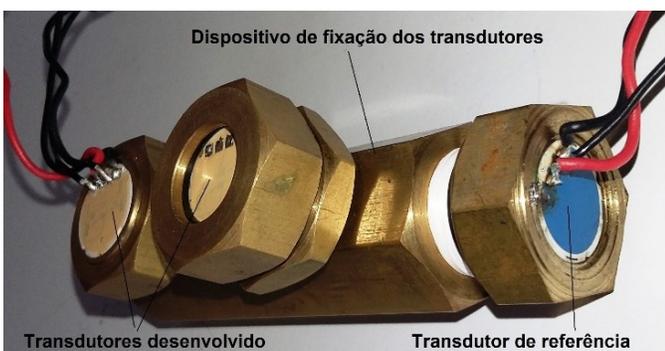


Fig. 6. Dispositivo desenvolvido para os testes de durabilidade e térmico do protótipo.

Os resultados obtidos com os testes de durabilidade, para uma pressão aplicada de 0,7 MPa, apresentaram um erro de $\pm 0,96\%$ da tensão de saída do transdutor, valor este que atende à aplicação como sensor de pressão de óleo automotiva. Para efeito comparativo são apresentados na Tabela V os resultados de teste de durabilidade de alguns transdutores comerciais disponíveis atualmente no mercado. Pode-se observar que para esses dispositivos comerciais o erro nos testes de durabilidade

encontra-se na faixa de 0,50% a 1,10%. Portanto, em relação a este parâmetro, o transdutor desenvolvido neste trabalho encontra-se dentro dos valores exigidos pelo mercado.

A Fig. 7 apresenta a foto da tomografia de raios-x realizada no dispositivo após o teste de durabilidade, onde o transdutor foi submetido a 10.022.400 ciclos. Como se pode observar no detalhe, não há indícios de destruição, rompimento, ou qualquer desgaste nos piezoresistores R_2 , R_3 , R_6 e R_7 , bem como nas trilhas que os interliga eletricamente.

TABELA V
VALORES DO ERRO NOS TESTES DE DURABILIDADE DE TRANSDUTORES COMERCIAIS

Fabricante	Erro (%)
Metallux AG - CPS1184-10bar	$\pm 0,75$
WIKA SCT-1-10bar	$\pm 0,75$
Citysensor - MS18C-10	$\pm 0,50$
Amsys - 651 10	$\pm 1,10$

Fonte: <https://www.metallux.de>; <https://www.wika.de>; <http://www.citysensors.com>; <http://www.amsys.info>

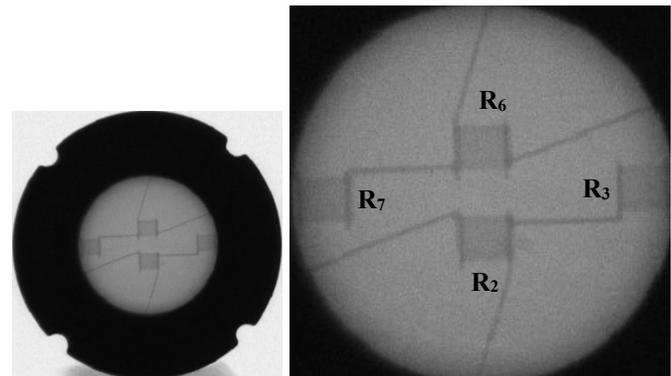


Fig. 7. Foto da tomografia de raios-x do elemento sensor (esquerdo), mostrando-o no detalhe (direito) com os piezoresistores ativos R_2 , R_3 , R_6 e R_7 .

Os resultados apresentados mostram a robustez do transdutor desenvolvido neste trabalho e a qualidade do elemento sensor produzido com as trilhas de AgPd e piezoresistores de RuO_2 . A utilização de prata-paládio em substituição à pasta de ouro utilizada comercialmente mostrou-se viável na produção de sensores de pressão eficientes e compatíveis com as necessidades exigidas pelo mercado automobilístico.

IV. CONCLUSÕES

O AgPd , demonstrou ser uma boa alternativa à pasta de Au na produção de transdutores de pressão, visto que, além de apresentar as mesmas características, como sua fácil manipulação e a mesma resolução que a pasta de ouro, o AgPd apresenta ainda um custo dez vezes menor do que o Au. Essa característica torna a pasta de AgPd um forte candidato para substituir a pasta de Au em aplicações comerciais.

A utilização da pasta de AgPd , mesmo após ser submetida a um intenso teste de fadiga de 1 Hz, 10 milhões de ciclos, não apresentou nenhum indício de fadiga, mostrando-se apta para atender à aplicação em transdutores de pressão industrial.

O transdutor desenvolvido apresentou resposta linear em toda faixa de pressão de trabalho, mesmo submetido a diferentes temperaturas.

O TCR negativo da pasta de RuO₂ gerou uma variação na tensão de offset quando submetido a diferentes temperaturas. Conforme previsto, porém, esse efeito é compensado com a adição de um resistor em série com a ponte, sobre o próprio transdutor, assim compensando essa variação inerente ao sistema.

A variação na espessura das membranas de alumina afeta diretamente o ganho do transdutor. Esse problema foi detectado e pode ser compensado reposicionando os elementos sensores sobre a membrana.

Os testes realizados com o transdutor desenvolvido neste projeto mostraram que os valores dos parâmetros testados são compatíveis com dispositivos disponíveis comercialmente.

Os resultados obtidos indicam que a utilização da técnica de filme espesso é interessante, devido à facilidade na produção dos transdutores de pressão e ao seu baixo custo, se comparada à técnica de filme fino, particularmente para empresas de médio e pequeno porte.

AGRADECIMENTOS

A empresa TSA Tecnologia em Sistemas Automotivos Ltda, e CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] Global pressure sensors market to reach US\$9.36 billion in 2020: transparency market research. 2015. [Online] Disponível em: <http://www.businesswire.com/news/home/20150210005629/en/Global-Pressure-Sensors-Market-Reach-US9.36-Billion>. Acesso em: 18 novembro. 2019.
- [2] R. F. Taylor and J. S. SCHULTZ, *Handbook of Chemical and Biological Sensors*. New York, IOP, 1996, pp.76.
- [3] S. J. Prosser, “Automotive sensors: past, present and future”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 76, pp. 1-6, 2007.
- [4] W. J. Fleming, “Overview of automotive sensors”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no 4, pp. 296-308, Dec. 2001.
- [5] N. White, “Thick Films”, *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, Springer International Publishing AG 2017, cp. 29, pp. 708-720, 2017.
- [6] L. Manjakkal and R. Dahiya, “Screen printed thick film reference electrodes for electrochemical sensing”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no 19, pp. 7779-7785, Oct. 2018.
- [7] M. Pospischila, K. Zengerlea,d, J. Spechta, G. Birkleeb, P. Koltayb, R. Zengerleb, A. Henningc, M. Neidertc, C. Mohrc, F. Clementa and D. Biroa, “Investigations of thick-film-paste rheology for dispensing applications”, *Energy Procedia*, vol. 8, pp. 449–454. 2011.
- [8] R. Faddoul, R. Nadège and A. Bruas. Formulation and Screen Printing of Water Based Conductive Flake Silver Pastes Onto Green Ceramic Tapes for Electronic Applications. Elsevier 2012.
- [9] N.M. White, S.P. Beeby and N.J. Grabham, “Thick-film piezoelectric and magnetostrictive devices”, *Electroceramic-Based MEMS - Fabrication-Technology and Applications*, 2005, Chap. 4, pp. 49-79.
- [10] Z. Zhou, R. W. Johnson and M. C. Hamilton, “Mechanical reliability of thick films for high-temperature packaging”, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no 6, Jun. 2018.
- [11] L. Zongrong and D. D. L. Chung, “Burnout of the organic vehicle in an electrically conductive thick film Paste”, *Journal of Electronic Materials*, vol. 33, no 11, 2004.
- [12] M. Jakubowska, M. Jarosz, K. Kielbasinski and A. Mlozniak, “New conductive thick film paste based on silver nanopowder for high power and high temperature applications”, *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp 1235-1240, Elsevier 2011.
- [13] D. Kim and S. Hwang, “Effect of the thermal properties of frits on the electrical properties of screen-printed silicon solar cells. Incheon”, *Journal of Korean Physical Society*, vol. 55, pp. 1046, Sep. 2009.
- [14] H. Garethi, J. S. Darren J., P. Evans and J. D. Harrison, “Examination of silver graphite lithographically printed resistive strain sensors”. Elsevier, 2007
- [15] G. Saijie, S. Yue and G. Feng, “Preparation of graphene thick film on AlN substrate”. Eighth International Conference on Thin Film Physics and Applications, 2013.
- [16] T. Masashi, Y. Syuichi, T. Toshihiko and M. Hiroaki, “Microanalyses on the RuO₂ particle glass matrix interface in thick film resistors with piezoresistive effects”. *Applied Ceramic Technology*, vol. 6 pp 195-204, Oct. 2009.
- [17] G. O. Coraucci, R. V. D. Oliveira, V. Garcia and F. Fruett, “A Study of the geometrical correction factor and the membrane thickness on the sensitivity of the transversal piezoresistive pressure sensor”. *Journal Integrated Circuits and Systems*, vol. 5, no 2, pp.140-147, Sep. 2010.
- [18] N. Serra, T. Maeda, P. Lemaire and P. Ryser, “Formulation of composite resistive pastes for fabrication of micro heaters”. *Sensor and Actuator A162* pp 367-372, Elsevier 2010.



Osvaldo Corrêa, graduado em Física pela Uniso (2014) e mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais (2016) pela Uniso. Atua a 40 anos nas áreas de eletrônica, instrumentação e, nos últimos 7 anos vem se dedicando ao desenvolvimento de sensores e circuito integrados híbridos com tecnologia de filme espesso. Atualmente ocupa a função

de diretor de P&D da Divisão Microsistemas da TSA, tecnologia em sistemas automotivos Ltda.



Waldemar Bonventi Jr é graduado (Licenciatura e Bacharelado) em Física pela USP (1989), mestre em Física pela USP (1992) e doutor em Engenharia Elétrica (Sistemas Digitais) em 2005. Especialista em lógica *fuzzy* e processamento de imagens. É professor do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais, nível

mestrado e doutorado profissional, da Universidade de Sorocaba – UNISO, atuando em modelagem computacional, sistemas inteligentes e ensino de engenharia.



José Martins de Oliveira Jr., Bacharel em Física pela Universidade Estadual de Londrina (1985), Mestrado em Física Nuclear pela Universidade de São Paulo (1988) e Doutorado em Ciências, com ênfase em Física Nuclear pela Universidade de São Paulo (1994). No Pós-Doutorado trabalhou no estudo de

propriedades espectroscópicas de núcleos exóticos (11N e 10N). Atualmente está ocupando o cargo de Pró-Reitor Acadêmico da Universidade de Sorocaba. É professor titular dos Programas de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas, nível mestrado e doutorado acadêmico, e do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais, nível mestrado e doutorado profissional, da Universidade de Sorocaba – Uniso, vinculado a linha de pesquisa Processamento

e Caracterização de Materiais e Produtos. Tem larga experiência na área de Física Nuclear Aplicada



Norberto Aranha, graduado em Física (licenciatura e bacharelado) pela UNICAMP (1985), mestre em Física pela UNICAMP (1987) e doutor em ciências pela UNICAMP (1994). Atualmente é professor do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais, nível mestrado e doutorado profissional da

Universidade de Sorocaba – Uniso, vinculado à linha de pesquisa Processamento e Caracterização de Materiais e Produtos. Atua na área de ciência dos materiais não-metálicos e de ensino de física.