

UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA ACADEMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E
AMBIENTAIS

Oswaldo Corrêa

PROJETO DE SENSOR DE PRESSÃO CERÂMICO A FILME ESPESSO.

Sorocaba/SP

2016

Oswaldo Corrêa

PROJETO DE SENSOR DE PRESSÃO CERÂMICO A FILME ESPESSE.

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Norberto Aranha

Sorocaba/SP

2016

Ficha Catalográfica

Corrêa, Osvaldo

C844p Projeto de sensor de pressão cerâmico a filme espesso / Osvaldo
Corrêa. -- Sorocaba, SP, 2016.

95 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Norberto Aranha.

Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais)
- Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2016.

Oswaldo Corrêa

PROJETO DE SENSOR DE PRESSÃO CERÂMICO A FILME ESPESSO.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Norberto Aranha
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. José Martins de Oliveira
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Nilton Itiro Morimoto
Universidade de São Paulo

DEDICATÓRIA

A Deus e a minha família.

“Temos de fazer o melhor que podemos.
Esta é a nossa sagrada responsabilidade
humana”
(Albert Einstein).

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, por ter permitido e me sustentado fisicamente e psicologicamente durante o período deste trabalho.

Aos meus pais, pois foram eles que sempre me incentivaram a questionar e a buscar soluções.

A minha esposa Cristina e minhas filhas Laura e Júlia, pelo incentivo, apoio, paciência e compreensão nos momentos de ausência neste período.

Aos meus irmãos Mauro, Amauri, Osmar e Odair, pelo incentivo e apoio técnico na construção dos dispositivos utilizados neste trabalho.

Ao Márcio, Waine, Edson Lopes e Edson Stefano, amigos da TSA que permitiram a realização do projeto, saibam que sem este apoio não seria possível a realização deste trabalho.

Agradecimento especial ao Eng. Eduardo Henrique Bonatto, Eng. Fernando de Jesus Lopes pelo apoio técnico para realização deste trabalho de pesquisa.

Agradecimento especial à Eng^a Nathalia Lucci pelo apoio ao desenvolvimento do projeto, permitindo a utilização dos instrumentos de medição do laboratório de qualidade.

Agradecimento especial, a todos da célula de produção de filmes espessos, ao líder de produção Antônio Carlos Rolim, Aristeu e Magali que sempre me apoiaram e me auxiliaram na realização desta pesquisa.

Agradecimento especial ao Prof. Dr. Norberto Aranha, pois foi o grande incentivador que pacientemente me apoiou e orientou nos momentos de frustração durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradecimento especial ao meu amigo Eng. Michele de Angelis, da empresa Dupont pelo apoio com todas as pastas utilizadas neste projeto.

Agradecimento ao eng. Peter Pereira da Silva pelo incentivo e apoio com as amostras da Kyocera, utilizadas neste projeto.

Agradecimento especial ao Dr. Ricardo Cotrim/CTI/Campinas pelo apoio, pelas diversas discussões técnicas sobre o tema que tivemos e orientação para uso da estufa com temperatura programável, essencial na elaboração deste projeto.

Agradecimento especial ao Prof. Doutor José Luiz Antunes de Almeida, pelas sugestões e orientações para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

INTRODUÇÃO: O mercado global de sensores piezo resistivos atingiu em 2014 o valor de US\$ 1,82 bilhões. Essa demanda é atribuída ao aumento da produção veicular e médica global, mercados cativos deste tipo de tecnologia. Desse total US\$ 1,69 bilhões correspondem ao mercado automotivo, o que equivale a 92,86% do mercado global atual. Particularmente no setor automotivo, o controle da pressão sobre o sistema de lubrificação do motor é um ponto importante a ser investido. Dentro desse contexto a tecnologia de filme espesso, que tem como base o processo de serigrafia convencional, exigindo um baixo investimento em máquinas e equipamentos para o setor produtivo, mostra-se como alternativa ideal para aplicação automotiva em que ocorrem alterações frequentes nos produtos. **OBJETIVO:** Desenvolver um transdutor de pressão sobre substrato de alumina, utilizando pasta condutora de prata-paládio (AgPd), proporcionando uma redução de custo no produto final. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Neste trabalho foi desenvolvido um sensor de pressão sobre substrato de alumina, com vias condutoras de prata-paládio (AgPd) e piezoresistores de óxido de rutênio (RuO_2) utilizando a tecnologia de filme espesso. Foram realizadas medidas dimensionais, verificada a linearidade da resposta de pressão-tensão, TCO e TCR. O transdutor foi submetido a um intenso teste de fadiga sob as seguintes condições: frequência de 1 Hz, sendo 0,65 s ligado e 0,35 s desligado, com 10 milhões de ciclos, além disso foi submetido a teste de linearidade na faixa de temperatura de 26,5°C a 150°C. **RESULTADOS E CONCLUSÕES:** A pasta de AgPd, após ser submetida ao teste de fadiga com ciclo de 1 Hz, pressão de 0 e 8bar, 10 milhões de ciclos não apresentou nenhum indicio de fadiga, demonstrando ser uma boa opção para a produção de sensores de pressão, com tecnologia de filme espesso, visto que a mesma é de fácil manipulação e pequenas variações na sua espessura, podem ser compensado pelo ganho do amplificador. O transdutor desenvolvido apresentou resposta linear em toda faixa de pressão de trabalho, mesmo submetido a diferentes temperaturas.

PALAVRAS-CHAVES: Sensor de pressão, filme espesso, Substrato de alumina.

ABSTRACT

INTRODUCTION: The global market of piezoresistive sensor reached in 2014 the value of US \$ 1.82 billion. The demand increase is due the vehicles and medical markets, captive markets for this kind of technology. From this total US \$ 1.69 billion corresponds to the automotive market, which is equivalent to 92.86% of the current global market. Particularly in the automotive sector, the pressure control on the engine lubrication system is an important point to be invested. Within this context the thick film technology, which the equipment's based on the conventional screen printing process, requiring low investment in production, it was shown as an ideal alternative for automotive applications, where there are frequent changes in the products.

OBJECTIVE: The Aim of this work is to develop a pressure transducer on alumina substrate using conductive silver-palladium paste (AgPd), providing a cost reduction in the final product.

MATERIALS AND METHODS: In this work, went 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. Dimensional measurements were carried out, the linearity of the stress-strain response was verified, (TCO and TCR). The transducer was submitted to an intense fatigue test using the following condition: frequency of 1 Hz, 0.65s on and 0.35 s off, with 10 million cycles, and to linearity test in temperature range from 26.5°C to 150°C was done.

RESULTS AND CONCLUSIONS: The AgPd conductive paste, after being subjected to the fatigue test of 1 Hz and 10 million cycles did not show any evidence of fatigue. Showing to be a good option for the production of pressure sensors with thick film technology, since it is easy to handle and small variation in membrane thickness can be compensated by a gain adjust of the amplifier. The transducer developed showed a linear response in the entire operating pressure range, even at different temperatures.

KEYWORDS: Pressure sensor, Thick film, Alumina substrate

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Máquina reveladora da empresa Elenco modelo Exatus 717.....	30
Figura 2 - Processo de impressão.....	31
Figura 3 - Impressora AMI PRESCO 485 para tecnologia de filme espesso.....	31
Figura 4 - Secador para filme espesso.....	32
Figura 5 - Estrutura obtida ao final do processo de sinterização.....	33
Figura 6 - Forno de sinterização de filme espesso.....	33
Figura 7 - Processo de adensamento da pasta.....	34
Figura 8 - Efeito da ressinterização	35
Figura 9 - Esquema da Máquina de corte com jato de areia.....	36
Figura 10 - Esquema do Sistema de corte a laser tipo YAG.....	37
Figura 11 - Sistema de ajuste a laser.....	37
Figura 12 - Tipos de cortes mais comuns para ajuste a laser.....	38
Figura 13 - Estruturas de um Circuito integrado a filme fino.....	40
Figura 14 - Ilustração do Processo foto litográfico.....	41
Figura 15 - Wafer com transdutores piezoresistivos a filme fino.....	42
Figura 16 - Ilustração de um Transdutor de pressão piezométrico.....	43
Figura 17 - Ilustração de um Transdutor de pressão capacitivo.....	44
Figura 18 - Modelo de Configuração dos piezoresistores.....	45
Figura 19 - Deformação de um sólido.....	46
Figura 20 - Dispositivo de controle de espessura da membrana.....	55
Figura 21 - Viscosímetro da marca Brookfield HBT.....	56
Figura 22 - Alinhamento da tela com o substrato na impressora.....	57
Figura 23 - Tela com pasta de AgPd, pronto para iniciar impressão.....	58
Figura 24 - Perfilometro Kusakalab modelo SE1700.....	59
Figura 25 - Projetor de perfil digital marca Pantec modelo CPJ-3015J.....	60
Figura 26 - Pistas condutoras e os piezoresistores no projetor de perfil.....	60
Figura 27 - Controle dos valores ôhmicos dos piezoresistores.....	61
Figura 28 - Estufa de secagem utilizada no desenvolvimento deste projeto.....	63
Figura 29 - Sistema de ensaio com transdutor montado no dispositivo.....	64
Figura 30 - Estufa com temperatura controlada programável.....	65
Figura 31 - Interior da estufa.....	65
Figura 32 - Sistema de aquisição de dados.....	66

Figura 33 - Dispositivo de teste de durabilidade e sistema de aquisição de dados...	67
Figura 34 - Bancada de teste de durabilidade.....	67
Figura 35 - Versão 3D do substrato.....	68
Figura 36 - Vista em corte do substrato.....	68
Figura 37 - Layout geral em CAD.....	69
Figura 38 - Layout de AgPd.....	70
Figura 39 - Layout de RuO ₂	70
Figura 40 - Layout de polímero.....	71
Figura 41 - Layout do fotolito.....	71
Figura 42 - Tela	72
Figura 43 - Dispositivo de fixação do substrato na impressora.....	72
Figura 44 - Curva do secador.....	76
Figura 45 - Curva do forno	76
Figura 46 - Dispositivo para fixação do substrato na impressora.....	77
Figura 47 - Dispositivo para extração do substrato.....	78
Figura 48 - Substrato com a camada de AgPd.....	78
Figura 49 - Perfil da camada de AgPd nos terminais de solda.....	79
Figura 50 - Substratos com RuO ₂	80
Figura 51 - Substrato com as camadas condutoras e resistivas sinterizadas.....	79
Figura 52 - Perfil transversal da camada do piezoresistor central.....	81
Figura 53 - Produto finalizado	85
Figura 54 - Dispositivo desenvolvido para montagem do Transdutor.....	86
Figura 55 - Dispositivo para teste de durabilidade e térmico.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre números de quadrados e percentual de corte	38
Gráfico 2 - Simulação da deformação em Excel.....	69
Gráfico 3 - Variação da espessura das membranas dos substratos.....	73
Gráfico 4 - Relação entre espessura do filme e a resistência Ôhmica.....	75
Gráfico 5 - Resposta do transdutor à variação de temperatura	87
Gráfico 6 - Resposta do transdutor a temperatura de 26,5°C à 150°C	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de filmes finos e espessos.....	24
Tabela 2 - Dados dimensionais dos piezoresistores projetados e obtidas	82
Tabela 3 - Variação dimensional teórica e real.....	83
Tabela 4 - Valor Ôhmico projetado e o obtido.....	84
Tabela 5 - Resposta do transdutor a temperatura de 26,5°C à 150°C.....	88
Tabela 6 - Condições de teste de durabilidade.....	90
Tabela 7 - Dados obtidos durante o teste de durabilidade.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CVD - Deposição química em fase vapor.

LPCVD - Deposição química em fase vapor a baixa pressão.

LECVD - Deposição química em fase vapor estimulada por laser.

LVDT - Transformador Diferencial de Variação Linear.

MOCVD - Deposição química a vapor metal orgânico.

PECVD - Deposição química em fase vapor estimulada por plasma.

PVD - Deposição física em fase vapor.

AgPd - Prata Paládio.

RuO₂ - Óxido de Rutênio.

TCR - Coeficiente Térmico Resistivo.

TCO - Coeficiente Térmico de Offset.

CAD - Projeto Auxiliado por Computador.

LISTA DE SÍMBOLOS

R - Resistência em Ohm.

ρ_s - Resistividade elétrica do material.

c - Comprimento do condutor em metros.

Ω - Unidade da resistência elétrica.

l - Seção do condutor.

P - Pressão em Pascal.

F - Força em Newtons.

A - Área em metros quadrados.

σ - Tensão em Newtons por metro quadrado.

ε - Deformação.

ΔL - Variação de comprimento.

ΔD - Variação na altura da peça.

L_0 - Comprimento inicial.

E - Módulo de elasticidade em Newtons por metro quadrado.

ν - Relação de Poisson.

ε_t - Deformação transversal.

ε_a - Deformação axial.

D_0 - Altura inicial.

y_c - Deflexões.

t - Espessura.

ε_{R_c} - Deformação Radial no sensor.

ε_{T_c} - Deformação Transversal no sensor.

R_i - Raio

μm - Micrometros.

m - Metros.

e_0 - Ganho em mV/V.

f_n - Frequência de ressonância.

ρ - Densidade em gramas por centímetro cúbico.

TCR - Coeficiente térmico resistivo.

TCO - Coeficiente térmico de Offset.

S - Sensibilidade do transdutor.

ΔV - Tensão de saída do transdutor.

ΔP - Variação de pressão.

R - Resistência elétrica de um piezoresistor.

Dim - Dimensões do piezoresistor.

C - Comprimento do piezoresistor.

L - Largura do piezoresistor

S_p - Valor projetado do piezoresistor

S_1 - Valores reais do piezoresistor

ΔDim - Variação dimensional entre os valores reais e os valores projetados.

$\Delta Dim \%$ - Variação percentual entre os valores reais e os valores projetados.

K_d - Relação encontrada do comprimento pela largura dos resistores.

K_{dt} - Relação teórica do comprimento pela largura dos resistores.

Δd - Variação de K_{dt} .

$\Delta d\%$ - Variação de K_{dt} percentual.

R_t - Valor resistivo teórico ou projetado.

R_c - Valor resistivo calculado em relação as dimensões reais encontradas

$t_c \Delta R\%$ - Variação percentual entre R_c e R_t .

ΔR - Diferença entre o valor resistivo lido R_r e o valor calculado R_c , baseado nas dimensões reais medidas.

$\Delta R\%$ - Variação percentual entre R_r e R_c .

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Resistividade.

Equação 2 - Pressão.

Equação 3 - Tensão mecânica.

Equação 4 - Deformação de um sólido.

Equação 5 - Módulo de elasticidade ou Módulo de Young.

Equação 6 - Relação de Poisson.

Equação 7 - Deformação Transversal.

Equação 8 - Deformação axial.

Equação 9 - Deflexão máxima no centro de uma membrana circular engastada pelas bordas.

Equação 10 - Deformação Tangencial e Radial na região próxima ao centro de uma membrana engastada pelas bordas.

Equação 11 - Deformação Radial de uma membrana circular, próximo a região de engastamento.

Equação 12 - Espessura de membrana fina circular, engastada pela borda.

Equação 13 - Frequência de ressonância.

Equação 14 - Coeficiente de Térmico Resistivo, TCR.

Equação 15 - Coeficiente de Térmico de Offset, TCO.

Equação 16 - Sensibilidade.

Equação 17 - Resistividade

Equação 18 - Resistência Ôhmica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 OBJETIVO	26
2.1 Objetivo Geral.....	26
2.2 Objetivos específicos	26
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 Processo de fabricação de filme espesso.....	28
3.1.1 Projeto.....	28
3.1.2 Confecção das telas.....	29
3.1.3 Impressão.....	30
3.1.4 Secagem.....	32
3.1.5 Sinterização.....	33
3.1.6 Ajuste	35
3.2 Tecnologia de Filme fino	39
3.2.1 Processo de fabricação de filme fino.....	39
3.2.2 Fotolitografia.....	41
3.3 Transdutores de pressão.....	41
3.3.1 Transdutor de pressão Piezoresistivo.....	42
3.3.2 Transdutor de pressão Piezelétrico.....	42
3.3.3 Transdutor de pressão Capacitivo.....	43
3.4 Projeto de um transdutor de pressão.....	44
3.4.1 Configuração do layout.....	45
3.4.2 Definições.....	46
3.4.3 Modelagem matemática da deformação da membrana.....	48
3.4.4 Linearidade.....	50
3.4.5 Frequência de Ressonância	51
3.4.6 Coeficiente Térmico Resistivo TCR.....	51
3.4.7 Tensão de Offset.....	52
3.4.8 Coeficiente Térmico de Offset TCO.....	52
3.4.9 Sensibilidade.....	52
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53

4.1 Procedimentos para fabricação.....	53
4.1.1 Projeto em CAD.....	53
4.1.2 Confeção das telas.....	53
4.1.3 Preparação do Secador.....	53
4.1.4 Preparação do forno de sinterização.....	54
4.1.5 Impressão das pistas de AgPd.....	57
4.1.6 Secagem das pistas de AgPd.....	58
4.1.7 Sinterização das pistas de AgPd.....	58
4.1.8 Controle da espessura de camada de AgPd.....	58
4.1.9 Impressão dos piezoresistores de RuO ₂	59
4.1.10 Secagem dos piezoresistores de RuO ₂	60
4.1.11 Controle da camada de RuO ₂	60
4.1.12 Controle das dimensões dos piezoresistores.....	60
4.1.13 Controle da resistência ôhmica dos piezoresistores.....	61
4.1.14 Ajuste do Offset.....	62
4.1.15 Impressão da pasta polimérica.....	62
4.1.16 Secagem da pasta polimérica.....	62
4.2 Caracterização do transdutor.....	63
4.2.1 Desenvolvimento de dispositivo para caracterização.....	63
4.2.2 Resposta Pressão/Tensão de saída, a 22°C.....	64
4.2.3 Resposta Pressão/Tensão de saída, de 40 a 150°C.....	66
4.2.4 Teste de durabilidade a temperatura ambiente.....	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
5.1 Local.....	68
5.2 Considerações.....	68
5.2.1 Projeto em CAD layout.....	68
5.2.2 Fotolitos e Tela.....	71
5.2.3 Dispositivo de fixação do substrato.....	72
5.2.4 Variação da espessura da membrana.....	73
5.2.5 Variação da espessura em relação a resistência de pasta de RuO ₂	73
5.2.6 Curva de aferição da temperatura do secador.....	75
5.2.7 Curva de aferição da temperatura do forno.....	76
5.2.8 Dispositivo de fixação do substrato a impressora.....	77

5.2.9 Dispositivo de extração do substrato.....	77
5.2.10 Substrato com pasta de AgPd sinterizada.....	78
5.2.11 Controle dimensional da espessura de camada de AgPd.....	79
5.2.12 Substrato após impressão piezoresistores de RuO ₂	79
5.2.13 Controle dimensional da espessura de camada de RuO ₂	80
5.2.14 Controle dimensional dos piezoresistores.....	82
5.3 Dados do transdutor.....	84
5.3.1 Dispositivo para caracterização.....	85
5.3.2 Bancada de teste de durabilidade e térmico.....	86
5.3.3 Resposta Pressão por Tensão de saída.....	87
5.3.4 Resposta do transdutor a temperatura de 26,5 a 150°C.....	88
5.3.5 Condição de teste de durabilidade.....	90
6 CONCLUSÃO.....	92
7 TRABALHOS FUTUROS.....	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O mercado global de sensor de pressão atingiu o valor de US\$ 6,53 bilhões em 2014 e, a previsão é de atingir US\$ 9,36 bilhões em 2020, desse total, os sensores piezo resistivos representam a maior demanda, tendo seu valor de mercado atingido US\$ 1,82 bilhões em 2014. (Global...2015)

A demanda por esse tipo de sensor é atribuída ao aumento da produção veicular e médica global, mercado cativo desse 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. Dentro desse 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.

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, estão em crescimento acelerado.

Este trabalho explora a piezoresistividade, a tecnologia de filme espesso e o substrato de alumina, bem como propõem a aplicação da pasta condutora de prata paládio em substituição à usual pasta de ouro (Au), no desenvolvimento de um sensor 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 por uma 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 pasta de Prata Paládio custa US\$ 5,00 / grama, portanto, extremamente significativo 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 alcançar até 130°C. O mercado automotivo exige uma garantia de vida útil do produto de 10 anos ou 10 milhões de ciclos de acionamentos.

Os resultados obtidos foram utilizados na elaboração de um projeto de um novo sensor que será aplicado como sensor de controle da pressão da bomba de óleo lubrificante, alojada dentro do reservatório de óleo do motor, onde a temperatura pode atingir 130°C.

A decisão em adotar a tecnologia de filme espesso como ideal para aplicação em detrimento a filme fino é justificada, tomando como referência a tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades de filmes finos e espessos.

Propriedade	Tecnologia	
	Filme fino	Filme espesso
Resolução	< 0,25µm	> 2µm
Temperatura de trabalho	< 125°C	>> 125°C
Dimensão do sensor	< 0,75	> 90µm
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

Fonte: TAYLOR, R. F., SCHULTZ, J. S. Handbook of Chemical and Biological Sensors. New York, IOP, 1996, p.76.

Conforme Taylor (1996, p. 78), as duas tecnologias apresentam vantagens e desvantagem, a aplicação deve ser considerada para definir qual delas deve ser adotada. Para esta aplicação, tomando a tabela de Taylor como referência, foram consideradas as seguintes características:

- Facilidade na manipulação, implicando em processo mais simples com custos menores.

- Faixa de temperatura de trabalho entre 130°C e 150°C.
- Confiabilidade e o baixo custo de produção para baixo volume.
- Disponibilidade do processo de filme espesso, localmente.
- O mercado solicita o produto com a tecnologia de filme espesso.
- Disponibilidade de representante local das fabricantes de pastas para filme espesso.

- Disponibilidade de representante local do fabricante de substratos para sensores de pressão.

- Disponibilidade de estrutura local treinada e avida por novos desafios.

Portanto, a decisão não foi puramente técnica, mas sim, o contexto criou todo um ambiente favorável ao desenvolvimento deste projeto, que teve início em uma solicitação do próprio mercado.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um transdutor de pressão sobre substrato de alumina, utilizando pasta condutora de Prata e Paládio (AgPd), proporcionando uma redução de custo no produto final.

2.2 Objetivos Específicos

- Projeto do layout do circuito de sensoriamento
- Montagem das telas
- Deposição do filme sobre substrato de alumina
- Ajustes dos parâmetros de deposição
- Montagem do protótipo
- Medidas física para calibração do sensor

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tecnologia de filme espesso baseia-se no processo de impressão serigráfica, em que, uma tela construída com fios de aço inox, é utilizada para imprimir formas pré-definidas em um substrato, popularmente conhecida como processo serigráfico ou serigrafia, a décadas vem sendo utilizada na impressão de brindes, camisas e chaveiros, porém, para aplicação na fabricação de sensores e circuitos integrados híbridos, são utilizadas impressoras de alta precisão, pois neste processo, é necessário o controle micrométrico das dimensões, da ordem de 2 micrometros e a tinta utilizada são resistivas, condutoras e outras

Atualmente é empregada na produção de circuitos integrados híbridos, redes resistivas e, na fabricação de sensores automotivos, aplicações críticas de temperatura, pressão e umidade.

Como exemplos de aplicações, temos: aplicações militares; médicas; telecomunicação; aeroespacial; aeronáutica; e automotiva.

Podem ser utilizados como substratos a Alumina, Óxido de berilo, Aço, Alumínio, PVC, e etc.

Devido ao baixo custo relativo e sua característica física de bom condutor térmico, o alumínio tem sido utilizado intensamente como substrato no setor de iluminação, na fabricação das luminárias com LED, em que o substrato é o próprio alumínio, aumentando a eficiência do dissipador em até 30% em relação às tradicionais placas metálicas de circuito impresso.

Conforme Tseng (1995, p.16), a tecnologia de filme espesso é a base da tecnologia LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic), muito utilizada em telecomunicações, marca-passos, sensores para altíssimas pressões.

Os transdutores de pressão a filme espesso têm sido utilizados a décadas, tendo como substrato a alumina, sendo que, impresso sobre a mesma, tem-se as pistas condutoras de pasta de ouro, e os piezoresistores de RuO_2 . Esta configuração é utilizada até os dias de hoje pelas empresas fabricantes de sensores de pressão a filme espesso.

Neste trabalho foram estudados transdutores de um fabricante Suíço, um Alemão e um Chinês de Taiwan, em todos encontramos a pasta de Ouro como condutor.

O embasamento teórico deste trabalho será discutido em todas as fases do desenvolvimento do produto, processos inerentes a tecnologia empregada, sendo abordado desde a simulação matemática, projeto, processo de produção e teste para caracterização do produto final.

3.1 Processo de fabricação de filme espesso

O processo de fabricação inicia-se com a simulação matemática, onde foi empregada a modelagem citada por Doebelin (1976, p. 389). Com a planilha Excel, foi simulado a deformação, tomando como referência as variáveis físicas do substrato de alumina como, a espessura da membrana, módulo Young, relação de Poisson e o diâmetro da membrana, obtendo assim os pontos de maior tensão da membrana.

3.1.1 Projeto

Os projetos utilizando a tecnologia de filme espesso, são realizados em CAD¹, em que literalmente é desenhado o layout dos condutores e resistores. Essas ferramentas facilitam o trabalho do projetista para definição do volume de pasta a ser utilizada no projeto em que, se considera a espessura nominal da impressão sinterizada de 12,0 μ m, dado importante para definição da espessura da emulsão da tela e o custo do produto.

Em seguida, tendo o projeto das diversas camadas, condutores, resistivos e poliméricos já definidos no CAD, gera-se então, o arquivo Gerber², para confecção dos fotolitos por meio do “photoplotter”.

A confecção dos fotolitos gerados a partir dos arquivos Gerber, são produzidos por empresas especializadas disponíveis no mercado local, cabendo ao projetista, efetuar o controle da qualidade do fotolito, na sua chegada.

¹ CAD (ou *computer aided design*) é o nome genérico de sistemas computacionais (software) utilizados pela engenharia, geologia, geografia, arquitetura, e design para facilitar o projeto e desenho técnicos. Fonte: Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Desenho_assistido_por_computador> acessado em 05/03/2016.

² É um formato padrão universal de arquivo composto de uma combinação de comandos gráficos utilizados por equipamentos tipo fotoploter para a formação das imagens da placa de circuito impresso. Fonte: **Gerando Arquivos Gerber e Furação em Tango for Windows (P.CAD)**. Tutorial: Para geração de gerbers e furação destinado a circuitos impressos. Disponível em: www.griffuspcb.com.br/files/GERANDO-ARQUIVOS-GERBER-EM-TANGO-FOR-WINDOWS.pdf. >. Acessado em: 06/03/2016.

Esse controle é efetuado por meio de microscópio, verificando a definição das trilhas, curto circuito, manchas, nitidez e etc.

3.1.2 Confeção das telas

As telas confeccionadas para a tecnologia de filme espesso, são construídas com fios de aço inox, com diâmetro da ordem de 40 μ m e Mesh (nº de fios por polegada quadrada) de 120 a 400 Mesh, podendo variar o diâmetro dos fios e a tensão das telas conforme a aplicação e definição desejada.

Normalmente essas telas são coladas em molduras de alumínio com tensão controlada.

As telas devem ser lavadas com sabão neutro e secas em estufa com ar recirculante, antes de serem emulsionadas, evitando que possíveis oleosidades ou impurezas sobre a tela possam comprometer todo o processo de revelação, dificultando assim a aderência da emulsão sobre a tela.

A espessura, paralelismo e uniformidade da emulsão devem ser controladas. Assim, a aplicação é efetuada em camadas, lentamente, camada por camada, até atingir o valor especificado pelo fabricante da pasta.

Após essa fase, tendo em mãos o fotolito já desenvolvido, esse é posicionado sobre a tela, atentando se para posicionar a face revelada contra a tela, evitando o efeito sombra causado pela espessura do fotolito.

Fixado o fotolito sobre a tela, ela é inserida na máquina reveladora da empresa Elenco modelo Exatus 717, conforme a figura 1, onde pela exposição por tempo determinado à luz ultravioleta promove-se a revelação ou transferência no layout do fotolito sobre a tela.

De acordo com Kosloff (1986, p.155) o comprimento de onda de infravermelho empregado neste processo, está na faixa de 650 a 1400nm.

Figura 1 - Máquina reveladora da empresa Elenco modelo Exatus 717.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.3 Impressão

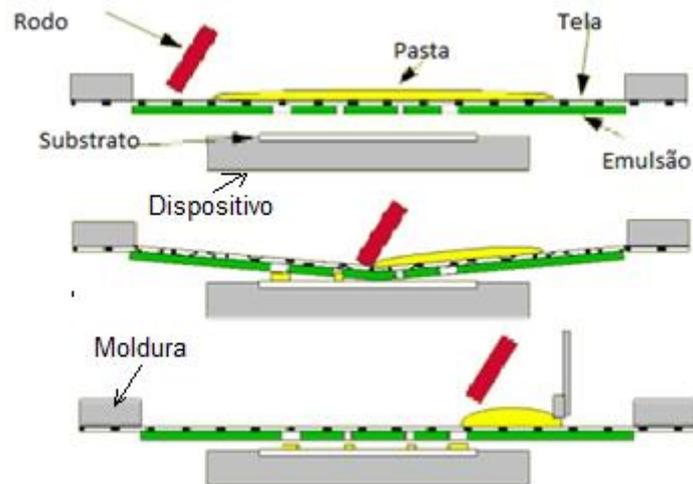
O processo de impressão por serigrafia é largamente utilizado na impressão de camisetas, brindes e na área eletrônica, para fabricação de circuitos impressos.

Na fabricação de filme espesso, o processo é similar, porém a espessura e o paralelismo da impressão devem ser controlados, tornando o processo mais crítico, exigindo assim equipamentos mais robustos, mais estáveis e com ajustes micrométricos.

Na Figura 2 que se segue, observa-se o fluxo do processo de impressão. De acordo com Jones(1986, p.31), a máxima resolução com telas de aço é de 0,127mm, para circuitos com resolução de impressão de 0,05mm a 0,10 mm de largura de pistas deve se empregar uma placa de aço com layout efetuado por erosão química.

O ângulo do rodo deve ser mantido a 45 graus. A espessura da emulsão mais a espessura da tela, basicamente definem a espessura final do filme, embora outros parametros como pressão do rodo, velocidade, viscosidade da pasta também possam interferir na espessura final do filme.

Figura 2 - Processo de impressão.



Fonte: Disponível em: <http://www.gwent.org/gem_thick_film.html. Acessado em: 09 março. 2016.

As impressoras utilizadas na tecnologia de filme espesso, conforme ilustrado na Figura 3, são robustas, estáveis e precisas, possuem ajuste de rotação, paralelismo, altura da tela, pressão do rodo, curso máximo do rodo, velocidade do rodo no avanço e retorno e sistema de cobertura da tela no retorno do rodo.

Figura 3 - Impressora AMI PRESCO 485 para tecnologia de filme espesso.



Fonte: Elaboração própria.

Os parâmetros mais importantes no processo de fabricação a filme espesso são ajuste de rotação, espessura do filme e alinhamento do substrato. O ajuste da espessura do filme e alinhamento do substrato são realizados por controles

micrométricos localizados na parte frontal da máquina impressora, como pode ser visto na Figura 3.

3.1.4 Secagem

Os secadores para tecnologia de filme espesso são constituídos por módulos de aquecimento e uma esteira transportadora de substratos, permitindo que os substratos sejam expostos às zonas de aquecimento, onde as temperaturas específicas para cada zona são ajustadas, obedecendo as características definidas pelo fabricante de cada pasta específica, estabelecendo assim o perfil de secagem da mesma.

Esse processo tem por função, eliminar os solventes orgânicos, responsáveis pelo controle da viscosidade contidos na pasta. O produto normalmente deve permanecer durante um período entre 10 a 15 minutos a temperatura de 100°C à 150°C, o perfil final do secador considera a temperatura ambiente como referência, para temperatura de entrada e saída, definindo assim um perfil de aquecimento e resfriamento. Este perfil é específico para cada tipo de pasta e fabricante e, deve ser seguido conforme especificação do fabricante. A Figura 4, mostra a foto de um secador comercial.

Figura 4 - Secador para filme espesso



Fonte: Elaboração própria.

3.1.5 Sinterização ou Cura

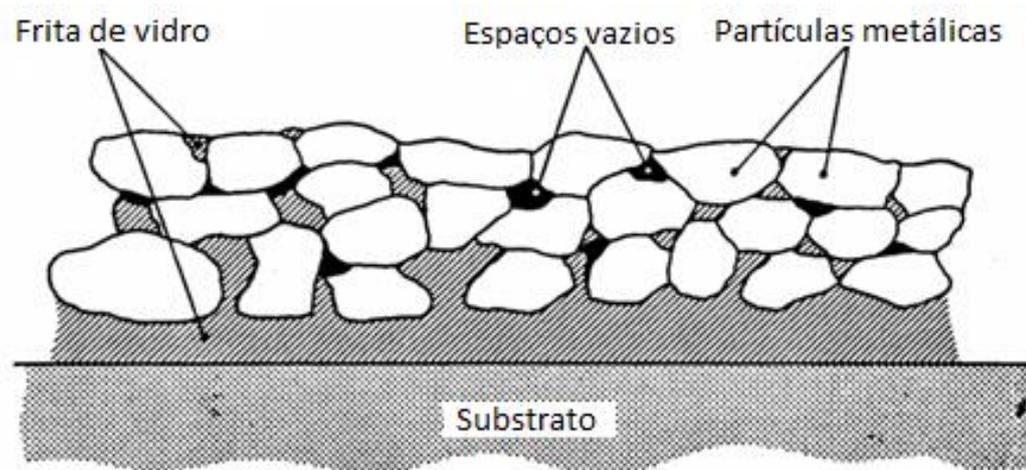
Os fornos de sinterização, também são constituídos por zonas específicas, assim como os secadores com temperaturas ajustadas para cada zona, conforme especificação do fabricante da pasta. Normalmente são constituídos de 5 a 12 zonas, dependendo do perfil de aquecimento necessário para o produto a ser produzido.

Uma das fases mais importantes do processo de sinterização é a fase burn out³, que ocorre quando a temperatura da pasta atinge entre 350°C a 450°C. É nesta fase que ocorre a vaporização de todos os solventes encontrados na pasta, restando apenas os metais e fritas de vidro.

Frita de vidro, é o vidro que foi fundido num forno, e então resfriado e moído, a frita de vidro permite a fixação dos metais presentes na pasta com o substrato. Kim (2009, p.2)

Ao atingir 850°C ocorre a fusão da frita de vidro, resultando assim, ao final do processo, numa estrutura rígida e estável, em que se observa apenas a presença de frita de vidro e as partículas metálicas. A Figura 5 ilustra a estrutura obtida ao final do processo de sinterização.

Figura 5 - Estrutura obtida ao final da sinterização.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

³ Do inglês que significa apagar, no sentido de queimar todo o material de combustão a ponto de extingui-lo. Fonte: **Cambridge Dictionaries Online**. Burn out. Disponível em: <<http://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/burn-out#translations>>. Acessado em 09 março. 2016.

Na Figura 6 pode-se observar um forno de sinterização de filme espesso e nota-se a presença de rotômetros.

Esses têm a função de controlar o fluxo de ar no interior do forno, adicionando oxigênio ao sistema, promovendo uma melhor estabilidade do TCR nos resistores construídos com pasta tendo como elemento RuO_2 .

Esse tipo de forno permite outros tipos de atmosfera no seu interior, como exemplo nitrogênio, quando se faz uso de pasta a base de cobre e não é permitido a presença de oxigênio, devido à oxidação do mesmo.

Figura 6 - Forno de sinterização de filme espesso, no detalhe, os rotômetros.

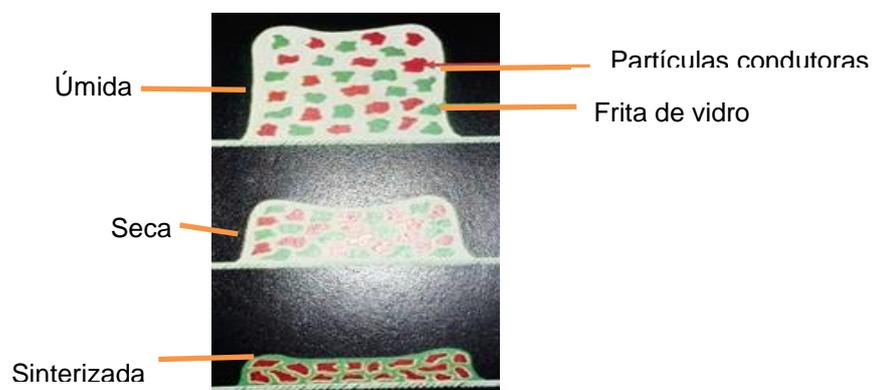


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 7, ilustra o processo de adensamento da pasta sobre o substrato desde a impressão até sua sinterização no forno de cura.

Apenas como referência, tendo uma camada de $40\mu\text{m}$ de espessura após impressão, após a secagem obtém-se $25\mu\text{m}$ e finalmente após a cura/sinterização 10 a $18\mu\text{m}$.

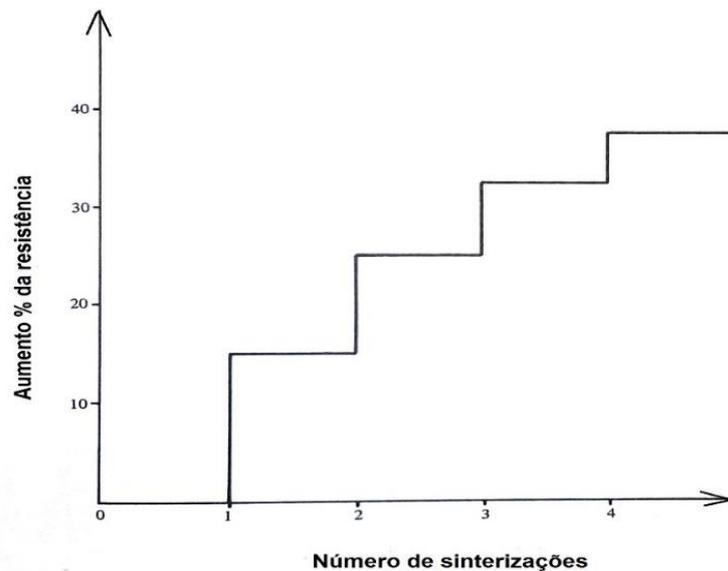
Figura 7 - Processo de adensamento da pasta.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

Durante o processo de sinterização de elementos resistivos deve se atentar para o aumento da resistividade, observado por Topfer (1971, p. 81). De acordo com Topfer, em cada processo de sinterização, nota-se um incremento da resistência ôhmica do resistor, conforme Figura 8. Assim, caso haja a necessidade da construção de várias camadas, com diferentes pastas, deve-se atentar para o incremento do valor ôhmico devido à ressinterização, isto deve ser efetuado, observando as características informadas pelos fabricantes das diferentes pastas a serem utilizadas, sendo o tempo de permanência no processo de sinterização, decisivos para o incremento ou decremento do valor ôhmico. Atualmente, com o desenvolvimento de novas pastas com adição de novos materiais, esta variação tem sido minimizada.

Figura 8 – Efeito da ressinterização RuO₂.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

Observa-se na Figura 8 que após a primeira ressinterização há um incremento de até 5% no valor do resistor de AgPd. Exemplificando, para um projeto com um resistor de 1000Ω , após a primeira ressinterização, esse mesmo resistor terá o valor de 1150Ω , incremento considerável e relevante na concepção do projeto.

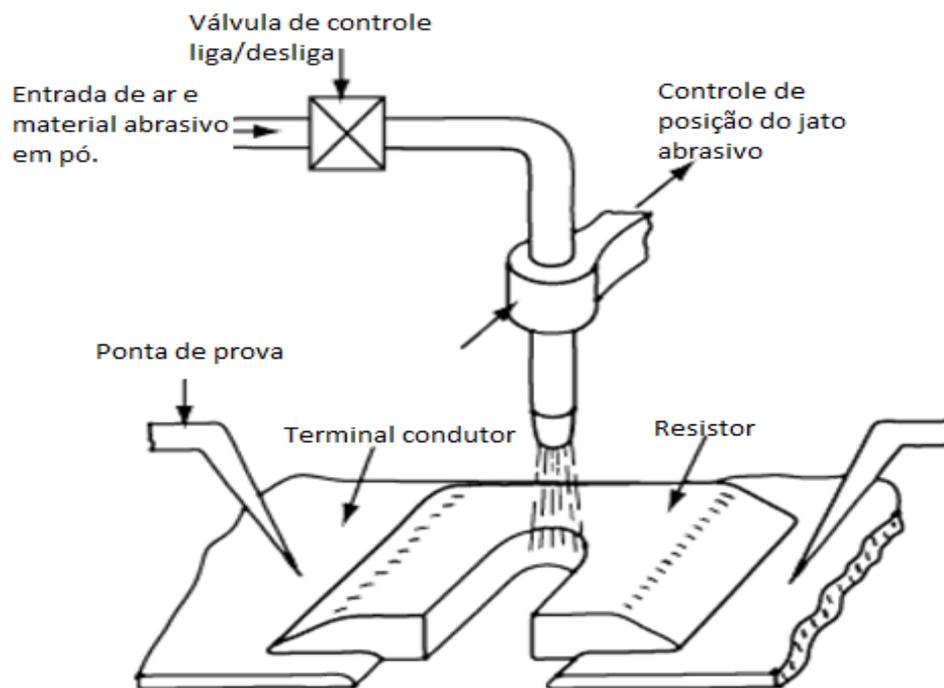
3.1.6 Ajuste

Devido ao grande número de variáveis do processo, os valores da resistência obtida com tecnologia de filme espesso, após a sinterização, podem divergir do valor

projetado em até $\pm 20\%$, assim, faz se necessário o ajuste do valor da resistência ôhmica para atingir tolerâncias menores podendo atingir até 0,5%.

Esses equipamentos têm por função o ajuste ativo da resistência dos resistores impressos e, caso haja um amplificador operacional no circuito, indiretamente pode ajustar o ganho, a frequência, a corrente e etc. Conforme Prudenziati (1994, p. 21), desde a década de 60, muitas tecnologias foram desenvolvidas, inicialmente, foram utilizadas as máquinas de ajuste com jato de areia (Figura 9) em que, eram utilizadas partículas de alumina com diâmetro de $25\mu\text{m}$, sendo intensivamente utilizados na década de 70. Por volta dos anos 80 apareceram os primeiros sistemas a laser (Figura 10), tipo ND-YAG – Neodymium Doped Yttrium Aluminium Garnet e, devido à eficiência, ainda hoje podem ser encontrados.

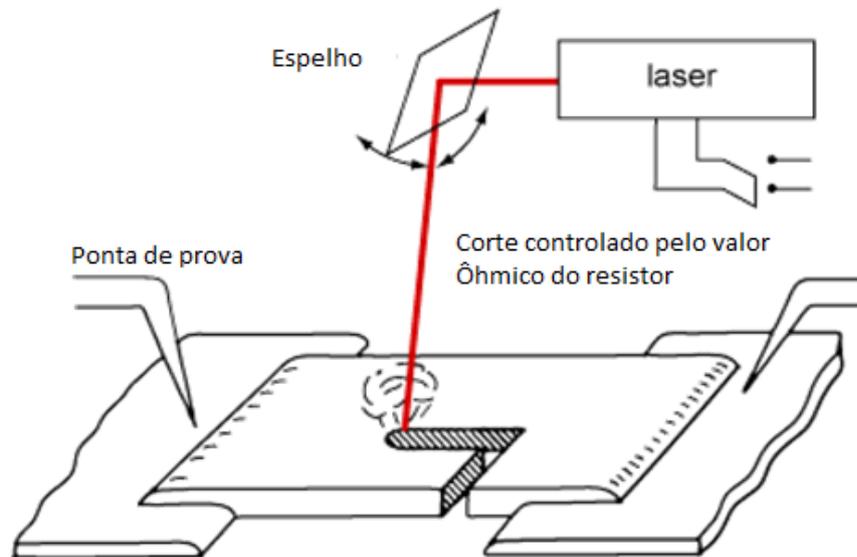
Figura 9 – Esquema do sistema com jato de areia.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

Atualmente, os novos equipamentos são construídos utilizando LED laser, reduzindo as dimensões dos equipamentos, custo e aumentando a precisão e durabilidade do sistema.

Figura 10 – Esquema do sistema a laser tipo ND-YAG.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

Os sistemas a laser, permitem que no ajuste seja efetuado simultaneamente ao processo de medição e corte/ajuste do valor do resistor. Ao atingir o valor desejado, o laser interrompe o corte automaticamente.

Figura 11 - Equipamento de ajuste a laser.



Fonte: Elaboração própria.

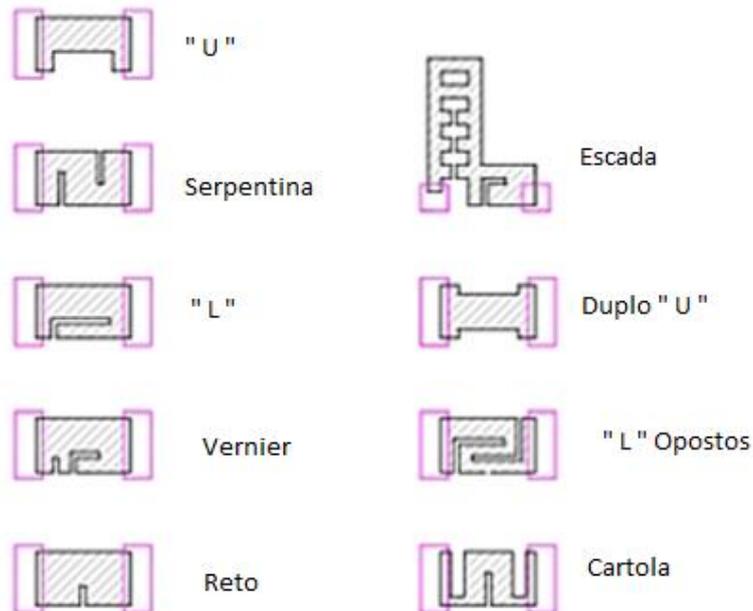
Nesse processo, ajusta-se o valor do resistor pelo corte, reduzindo sua largura. Como a resistividade é dada por:

$$R = \rho_s \frac{c}{l} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: R é a resistência em Ω (Ohms), ρ_s é a relação $\Omega/\text{quadrado}$ e $\frac{c}{l}$, c é o comprimento e l é a largura do resistor.

A espessura padrão de controle da tecnologia de filme espesso é de $12\mu\text{m}$, portanto, a relação comprimento sobre largura é que define o valor ôhmico final e, o corte sempre promove um aumento do valor ôhmico. A Figura 12 ilustra os tipos mais comuns de cortes utilizados.

Figura 12 - Tipos de cortes mais comuns para ajuste a laser.



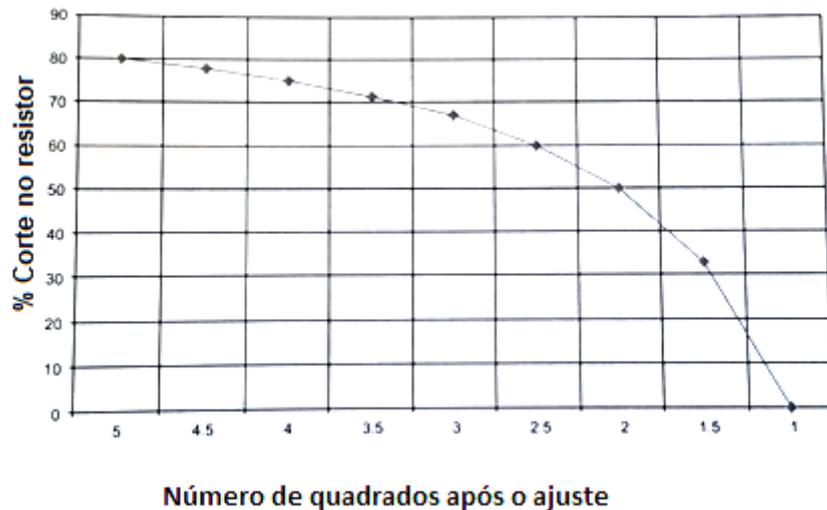
Tipos de cortes

Fonte: UBM Communities. EDN Network. Through thick and thin...film resistors of course. Disponível em: <<http://www.edn.com/electronics-blogs/looking---electronics/4411031/-Through-thick-and-thin-film-resistors-of-course->>. Acessado em: 09 março. 2016.

Reduzindo a largura do resistor, incrementa se sua resistência. Assim, durante o processo de desenvolvimento do layout é usual calcular as dimensões considerando apenas 85% do valor resistivo (R) desejado, para que durante o processo de ajuste, haja margem para atingir o valor desejado com relativa precisão.

No gráfico 1, pode-se observar a relação entre o número de quadrados e o percentual de corte em “L” do resistor, ou seja, observa-se que, tendo inicialmente um resistor com a relação comprimento sobre largura igual a 1 e, um corte em “L” equivalente a 50% do seu comprimento, o seu valor ôhmico equivale a dois quadrados. Exemplificando, para um resistor de 100Ω /quadrado, ao final do ajuste, terá atingido 200Ω .

Gráfico 1 – Relação números de quadrados por percentual de ajuste do resistor.



Fonte: DuPont Electronics and Communications Thick film Seminar. Pennsylvania, junho, 2013.

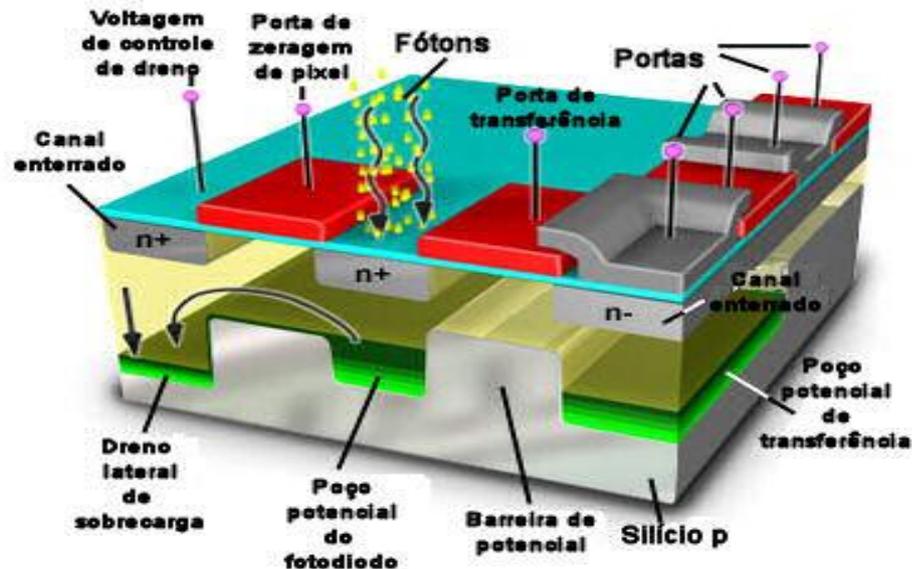
De acordo com Agnew (1978, p.93), o corte em “L” permite um ajuste mais fino, sendo melhor que o ajuste com corte reto, que apresenta uma variação exponencial.

3.2 Tecnologia de Filme fino

É a tecnologia utilizada para fabricação de circuito integrado. Na Figura 13, podem-se observar as diversas camadas que compõem um circuito integrado. Essas camadas tem a espessura de até $1\mu\text{m}$ e, embora a tecnologia de filme fino permita atingir espessuras maiores, isso não é usual, pois o custo o torna muito elevado.

Essa tecnologia baseia-se na fotolitografia, sendo largamente utilizada na fabricação de diferentes componentes eletrônicos como: microcontroladores, sensores ópticos, células fotovoltaicas e etc.

Figura 13 – Esquema do circuito integrado a filme fino.



Fonte: Astronomia e Astrofísica. Telesc. Fotografia. **Charge-Coupled Devices**. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/telesc/fotografia.htm>>. Acessado em: 09 março. 2016.

3.2.1 Processo de fabricação a filme fino

As tecnologias utilizadas para produção de filmes fino, basicamente, iniciam se com o processo de definição das formas, normalmente são realizadas em um software específicos em que se projeta toda a arquitetura do circuito integrado e também são gerados os arquivos para o desenvolvimento das máscaras.

São empregadas diferentes técnicas de deposição, dentre as quais podemos citar: Deposição química em fase vapor (CVD), Deposição química em fase vapor em baixa pressão (LPCVD), Deposição química em fase vapor estimulado por Laser (LECVD), Deposição química em fase vapor estimulado por Plasma (PECVD), Deposição química em fase vapor Metal orgânico (MOCVD), Deposição física de Vapor (PVD), Pulverização catódica e etc.

3.2.2 Fotolitografia

É a técnica utilizada para fabricação de circuitos integrados a filme fino para transferir as formas predefinidas em projeto sobre a superfície do “wafer” de silício. De acordo com a aplicação podem ser utilizadas diferentes técnicas como: fotolitografia positiva, negativa, litografia por raios X e E-beam lithography⁴.

Conforme Maly(1987, p.18), a deposição por fase vapor é muito comum na produção de circuito integrado, permitindo a deposição sobre uma grande variedade de materiais em forma e espessura de camada.

A Figura 14, ilustra um processo foto litográfico em que se nota a presença de uma fonte luz ou energia (uma máscara) com as formas/layout previamente definidas em projeto, o sistema de redução com lentes para escala de nanômetros e o “wafer” de silício onde será sensibilizado.

Figura 14 – Ilustração do processo foto litográfico.



Fonte: Tom's Hardware. The Authority on Tech. **Fotolitografia.** Disponível em: <https://www.tomshw.it/articoli/scopriamo-come-viene-creato-un-microprocessore-24199-p4> acessado em: 09 março. 2016.

3.3 Transdutores de pressão

Basicamente encontram-se no mercado três tipos mais usuais de transdutores de pressão a filme espesso: piezoresistivo, piezelétrico e capacitivo. Todos podem

⁴ Corresponde à prática de digitalizar um feixe focalizado de elétrons para desenhar formas personalizadas em uma superfície coberta com uma película sensível ao elétron.
Fonte: MARK, M. A.; MICHAEL. J. R. **SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication.** V.1. Editor: P. Rai-Choudhury. 2000.

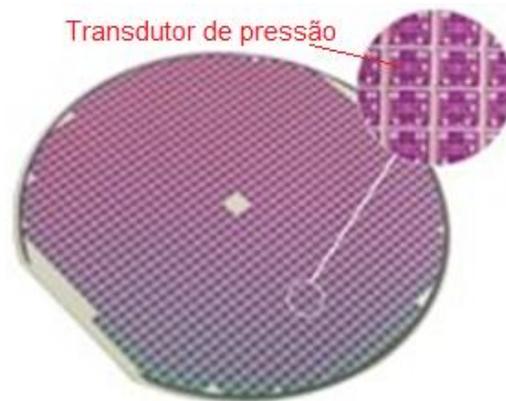
ser produzidos tanto com tecnologia de filme espesso como em filme fino. A aplicação é que irá definir a tecnologia a ser empregada.

3.3.1 Transdutor de pressão Piezoresistivo

A piezoresistividade é definida como a variação da resistência elétrica devido à pressão mecânica exercida sobre um corpo. Há dois tipos de sensores de pressão piezoresistivos no mercado, os fabricados com tecnologia de filme fino e espesso.

Na Figura 15, é apresentado um wafer⁵ com dezenas de transdutores de pressão piezoresistivos desenvolvidos com tecnologia de filme fino. E como já foi discutido anteriormente, tem suas limitações para aplicações em alta temperatura, porém com ganho maior em relação ao filme espesso à baixa temperatura.

Figura 15 - Wafer com transdutores piezoresistivos a filme fino.



Fonte: http://www.ipms.fraunhofer.de/en/mems-foundry/pilot-production/_jcr_content/contentPar/textblockwithpics_1/image1.img.jpg/wafer-with-pressure-sensors. Acessado em: 05 dezembro. 2016.

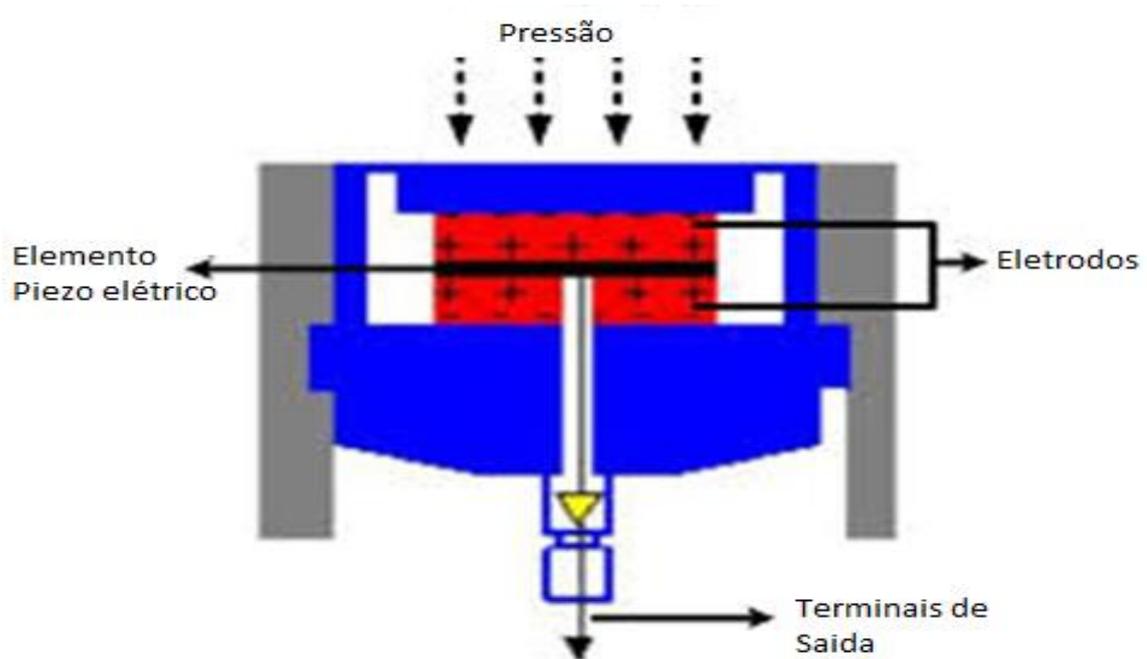
3.3.2 Transdutor de pressão Piezelétrico

A piezeletricidade, basicamente é a capacidade de gerar energia elétrica pela pressão mecânica aplicada sobre um corpo. A Figura 16 mostra a estrutura básica de um transdutor de pressão piezelétrico. Seu funcionamento depende da aplicação de

⁵ wafer é uma placa que serve como base para chips. Fonte: PEREIRA, André L.. TECMUNDO. **O que são wafers?**. 2012. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/o-que-e/23660-o-que-sao-wafers-.htm>>. Acessado em: 09 março. 2016.

uma pressão sobre os elementos sensores piezelétricos, produzindo então, uma tensão proporcional a pressão aplicada. Apresenta sensibilidade e ganho elevados, porém o custo do condicionador é alto, limitando sua aplicação em sistemas críticos de alta sensibilidade e precisão.

Figura 16 - Ilustração de um transdutor de pressão piezelétrico.



Fonte: Midi Open Access. Publishing. Sensors. Disponível em: <http://www.mdpi.com/sensors/sensors-12-09884/article_deploy/html/images/sensors-12-09884f12-1024.png>. Acessado em: 09 março. 2016.

3.3.3 Transdutor de pressão Capacitivo

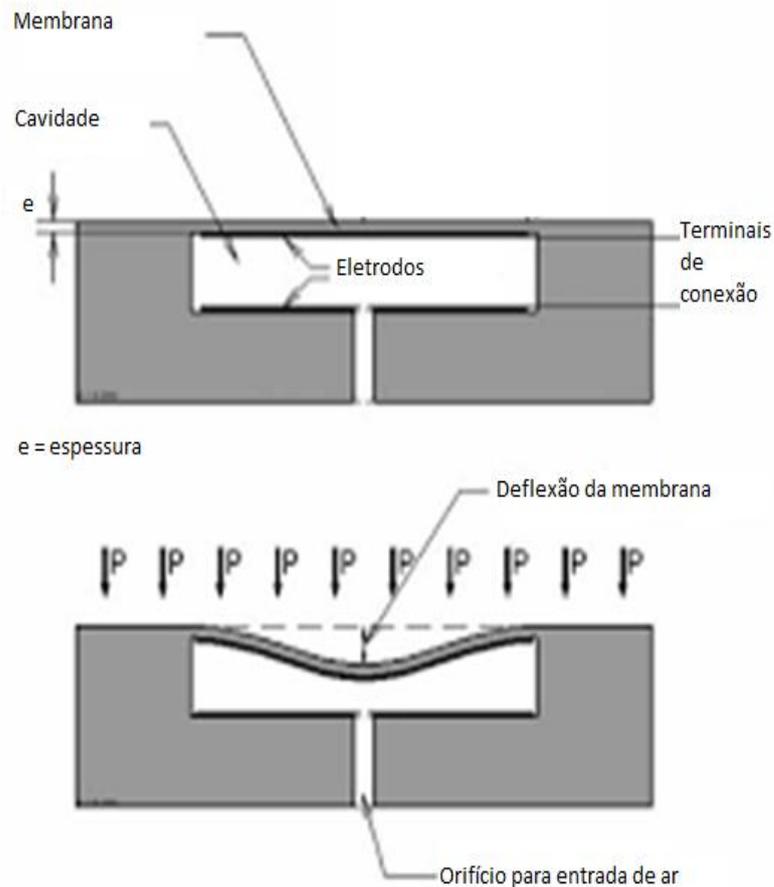
Baseiam na capacitância, entre duas placas condutoras em que, fixa-se a área das placas condutoras e, através da variação da pressão aplicada, ocorre uma variação da distância entre as mesmas, alterando a capacitância.

A Figura 17, mostra o esquema de funcionamento de um transdutor capacitivo. Embora aparentemente mais simples, o processo produtivo exige maior atenção no paralelismo e distância entre os eletrodos e, na aplicação, a umidade e a temperatura interferem na leitura da pressão.

Além disso, o custo dos condicionadores tende a ser mais elevado pois, são relativamente mais complexos em relação aos piezoresistivos.

São muito utilizados em automação industrial nas indústrias, como detectores de material orgânico e de materiais não ferrosos e, devido à alta sensibilidade, são empregados também em instrumentos científicos de laboratório.

Figura 17 – Ilustração de um transdutor de pressão capacitivo.



Fonte: Disponível em: <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSWQEE7GqzbQ-51JgU_0lxR2q2pSIUt8mWx_nyVaGsrKtafvSaQpQ>. Acessado em 01 setembro. 2015.

3.4 Projeto de um transdutor de pressão

Os transdutores de pressão são basicamente compostos por uma membrana engastada pelas bordas, podendo ter a forma circular ou outras em que, sobre uma das faces estão distribuídos os elementos sensores de forma a maximizar seu ganho.

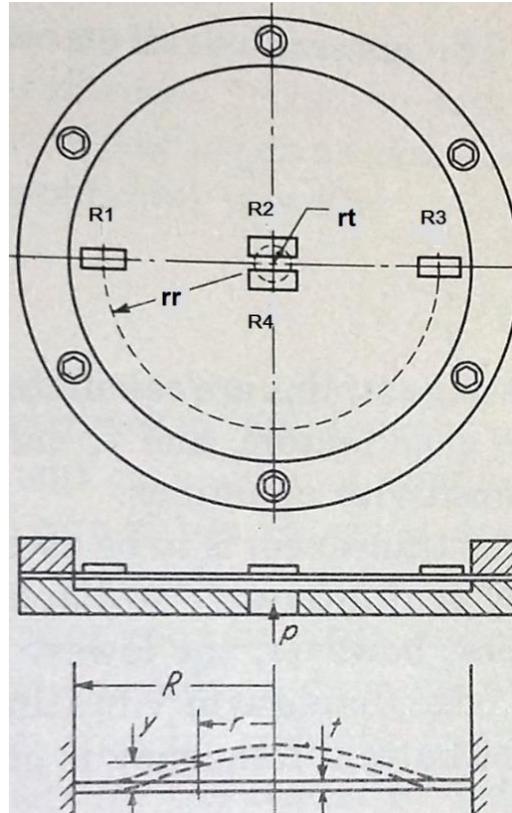
Dessa forma, a configuração do layout dos elementos sensores tem um papel muito importante, pois devem ser posicionados onde se observa maior tensão mecânica sobre o substrato, obtendo maior deformação dos elementos sensores e, conseqüentemente maior ganho do transdutor.

3.4.1 Configuração do layout

A configuração dos elementos piezo resistores sobre o substrato deve ser de tal forma que proporcione o maior ganho possível, de maneira a minimizar o efeito sinal ruído, facilitando o desenvolvimento do condicionador de sinal.

Nessa aplicação, em que se tem uma membrana circular engastada pelas bordas (Figura 18), os efeitos de tensão e compressão, são observados simultaneamente, obtendo-se maior ganho, pois enquanto nos sensores piezoresistivos R1 e R3, posicionados nas bordas da membrana nota-se a redução do valor ôhmico, devido à compressão, nos sensores piezoresistivos R2 e R4, localizados no centro da membrana, ocorre um aumento do valor ôhmico devido ao efeito de tração/alongamento. Conforme Doebelin (1976, p.388), nessa configuração, o ganho do transdutor é expandido, tendo os quatro piezoresistores da configuração ativos, obtendo assim um ganho máximo do sistema.

Figura 18 - Modelo de configuração dos piezos resistores impressos sobre a membrana.



Fonte: DOEBELIN, O. Ernest. Measurement Systems: Application and Design. New York, McGRAW-HILL, 1976, p.389.

3.4.2 Definições

Pressão, segundo as leis da física, é considerada a relação entre uma força aplicada sobre uma área, conforme a equação 2.

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

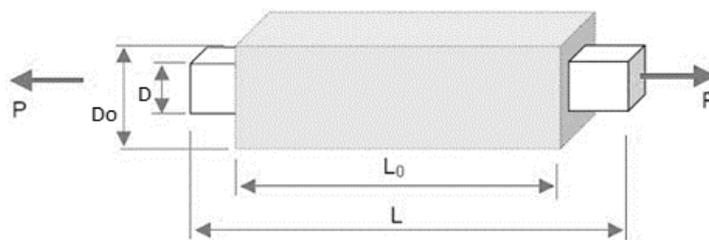
Sendo F em Newton, A em metro quadrado e P em Pascal.

A tensão, por sua vez é uma grandeza vetorial, representada pelo símbolo σ , é a força atuante sobre uma área de um corpo em N/m² (Pascal), promovendo uma deformação $\Delta L = L_0 - L$ e $\Delta D = D_0 - D$, sobre o mesmo. Callister (2009, p.153) A equação 3 apresenta a relação matemática da tensão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 3})$$

A Figura 19 ilustra o comportamento de um sólido quando submetido a uma força deformadora:

Figura 19 - Deformação de um sólido.



Fonte: Disponível em: < <http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAABQlcAK-14.jpg>>. Acessado em: 02 outubro. 2015.

Quando $\sigma > 0$ há um alongamento de um corpo sólido devido à ação da tração e quando $\sigma < 0$, o corpo sofre uma compressão.

A deformação é dada pela razão da variação do comprimento após a ação de uma tensão, pelo seu comprimento inicial, conforme equação 4.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Equação 4})$$

O módulo de Young ou módulo de elasticidade é dado pela relação entre tensão sobre deformação, conforme equação 5.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 5})$$

A relação de Poisson é aquela que relaciona a deformação transversal e a deformação axial, conforme observa-se na equação 6.

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que ε_t representa a deformação transversal, e ε_a a deformação axial.

A deformação transversal de um corpo sólido é dada pela relação da variação do diâmetro do próprio corpo sobre seu diâmetro original sem tensão, conforme a equação 7 Assim, como na equação 8, pode-se também observar que a deformação axial é a relação entre a variação da largura sobre tensão e a largura sem tensão.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\varepsilon_a = \Delta L / L_0 \quad (\text{Equação 8})$$

3.4.3 Modelagem matemática da deformação da membrana

Serão analisadas nesta fase do projeto algumas características físicas, como tensão e deformação da membrana de alumina. Assim, para o desenvolvimento do projeto foram assumidas como condições básicas os seguintes parâmetros: uniformidade da espessura da membrana, micro deflexão, rigidez mecânica ideal (visto que será utilizado um substrato de alumina tipo monobloco em que a membrana e o corpo de fixação formam um só elemento), comportamento elástico ideal, o aumento do enrijecimento e massa (devido à presença dos elementos piezoresistivos e condutores de prata paládio sobre a membrana).

Devido às premissas acima, assumidas como condição ideal, as fórmulas que serão utilizadas para cálculo poderão promover desvios do valor real. Portanto, serão utilizadas apenas para orientação no desenvolvimento do projeto. Desvios observados durante o processo empírico serão acrescentados como variáveis de processo ou constantes ao final da pesquisa, o que poderá facilitar o desenvolvimento de futuros projetos.

Transdutores de pressão com membranas têm sua deflexão proporcional à pressão do fluido. Diferentes formas geométricas podem ser utilizadas para a fabricação de membranas e as mesmas podem ser sensíveis à pequenas ou grandes tensões sendo seus comportamentos físicos distintos, dependendo da espessura da membrana aplicada.

O dimensionamento de uma membrana é efetuado normalmente, analiticamente ou por método de elementos finitos.

De acordo com a teoria descrita por Timoschenko e Woinowsky-Krieger (1959), independentemente do método adotado, o elemento ativo é uma membrana que sofre micro deformações e a tensão sobre a membrana é diretamente proporcional à pressão sobre a mesma. Essa pressão está relacionada com as constantes mecânicas do material, que dependem das orientações cristalográficas do material. Assim, as flexões ou deflexões (y_c), tendem a ser muito pequenas em relação a sua espessura (t).

Para determinar a máxima deflexão ao centro da membrana, pode se aplicar a equação 9, baseada na teoria da microdeflexão de membrana de Timoschenko e Woinowsky-Krieger (1959).

$$Y_c = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16t^3 E} \quad (\text{Equação 9})$$

Nas equações 9 e 10, Y_c corresponde a deflexão no centro, em milímetros.

E é o módulo de Young ou elasticidade; ν é a relação de Poisson do material; R_0 é o raio a partir do centro da membrana; t é a espessura da membrana e P é a pressão. As tensões radiais e tangencias são iguais no centro da membrana, portanto temos que:

$$\varepsilon_{R_c} = \varepsilon_{T_c} = \frac{3PR_0^2(1-\nu^2)}{8t^3 E} \quad (\text{Equação 10})$$

Assume-se que não existem deformações no plano médio da membrana delgada. Assim, esse plano permanece neutro durante as flexões, os efeitos das forças de cisalhamento são desprezíveis e o esforço mecânico normal na direção transversal da membrana também pode ser desprezado nos cálculos.

A tensão radial diminui rapidamente com o aumento do raio, e no ponto de engastamento ela corresponde a duas vezes a deformação do centro da membrana.

A deformação tangencial é igual a zero no ponto de engastamento conforme Watson (1986 p. 68) porém, a deformação radial é máxima e negativa e, é determinada pela equação 11.

$$\varepsilon_{R_0} = -\frac{3PR_0^2(1-\nu^2)}{4t^3 E} \mu m/m \quad (\text{Equação 11})$$

Em que P é a pressão em Pascal, R_0 é o raio, t é a espessura da membrana em metros, E é o módulo de Young e, ν é a relação de Poisson (equivalente a 0,21 para a alumina). Com a configuração utilizada, em que se tem uma membrana circular engastada pelas bordas, conforme Doebelin (1976, p. 389), pode-se usufruir da tensão radial e tangencial, utilizando quatro elementos piezoresistivos ativos.

Conforme Figura 18, os piezoresistores R2 e R4, devem ser impressos o mais próximo do centro, sendo orientados para obter a tensão tangencial máxima positiva.

Os elementos piezoresistivos R1 e R3, são responsáveis por obter a tensão radial e, devem ser impressos o mais próximo possível das bordas, obtendo assim, a tensão máxima negativa.

Dessa forma devido a configuração em ponte, o ganho obtido será a soma dos quatro elementos piezoresistivos.

A equação para deformação de membranas relaciona a deformação da membrana e a pressão aplicada sobre a mesma, sendo essa relação proporcional.

De acordo com Watson (1986, p. 68).

Para sensores de pressão com substrato de alumina, observa-se que quanto menor a deflexão, maior precisão, em geral, a deflexão no centro da membrana deve ser menor que a espessura da membrana, desta forma, para se obter uma linearidade de 0,3%, deve-se limitar a deflexão no centro da membrana em 25% da espessura.

A espessura da membrana pode ser determinada pela equação 12.

$$t^2 = \frac{0,75PR_0^2(1-\nu^2)}{e_0 E} \text{ mm} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que:

t - é a espessura,

P - é a pressão em Pascal,

R₀ - é o raio da membrana,

ν - é a relação de Poisson,

e₀ - é a sensibilidade em mV/V

E - é o módulo de Young.

3.4.4 Linearidade

A condição de linearidade normalmente é expressa pela não linearidade do transdutor, sendo o desvio máximo obtido entre o valor ideal e o valor lido, normalmente expresso em valor percentual sobre fundo de escala. Assim, quando se

diz que um transdutor tem uma pequena não linearidade, significa que o transdutor tem um menor erro.

4.4.5 Frequência de ressonância

Para um melhor desempenho em sistemas dinâmicos, a frequência de ressonância da membrana deve ser maior que a maior frequência da pressão aplicada. Há uma enorme dependência do quanto a membrana pode amortecer a frequência do fluido sobre si onde os piezos resistores foram montados, principalmente na aplicação pretendida, em que será instalada para monitoramento da pressão da bomba de óleo de lubrificação de um motor a explosão, em que estará sujeito à vibração da própria bomba pelo fluxo de óleo bombeado e dos componentes do motor onde está sendo inserido.

Conforme Watson (1986, p.74), a frequência de ressonância deve ser no mínimo de 3 a 5 vezes maior que a maior frequência de pulsação do fluido.

Aplicando-se a equação 13, pode-se determinar a frequência de ressonância do substrato.

$$f_n = \frac{0,469t}{R_0^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, Hz \quad (\text{Equação 13})$$

Em que;

ρ – é a densidade em $\frac{g}{cm^3}$;

t - é a espessura,

R_0 - é o raio da membrana,

ν - é a relação de Poisson,

E - é o módulo de Young.

3.4.6 Coeficiente Térmico Resistivo – TCR

O coeficiente térmico resistivo é dado pela razão da resistência do dispositivo após a variação de temperatura pela resistência na temperatura inicial (ou de referência).

$$TCR = ((\Delta R/R_0) 1/\Delta t)10^6 \quad (\text{Equação 14})$$

3.4.7 Tensão de Offset

Tensão de offset é a tensão residual presente nos terminais de saída do transdutor sem que seja aplicada nenhuma pressão sobre o mesmo, podendo ser minimizada pelo ajuste a laser dos resistores da ponte de acordo com a especificação da aplicação.

3.4.8 Coeficiente Térmico de Offset – TCO

O coeficiente de temperatura de offset é a razão da variação de tensão de offset em relação à temperatura de trabalho do transdutor, conforme equação abaixo, sendo seu valor expresso em ppm/°C.

$$TCO = ((\Delta V/V_0) (1/\Delta t))10^6 \quad (\text{Equação 15})$$

3.4.9 Sensibilidade

É a razão entre tensão de saída do transdutor e a pressão aplicada ao mesmo, assim:

$$S = \Delta V/\Delta P \quad (\text{Equação 16})$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta fase do trabalho serão abordados os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento do transdutor de pressão.

4.1 Procedimentos para fabricação

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.

4.1.1 Projeto em CAD

Com base nas características físicas do substrato de alumina A-471 informada pela empresa Kyocera, como módulo de Young, relação de Poisson, mais os dados de pressão e dimensões físicas do próprio substrato, efetuou-se a simulação da deformação mediante modelagem matemática. Dessa forma, foi possível determinar a melhor localização dos piezoresistores sobre a membrana. Então, por meio de um software CAD, foi definido o layout do transdutor e na sequência, também foram gerados os arquivos Gerber, para confecção dos fotolitos.

4.1.2 Confecção das telas

De posse dos fotolitos, inicia-se o processo de revelação, que basicamente é a transferência do layout desenvolvido no CAD, para a tela. Esse processo inicia-se com uma tela de aço com 350 fios por polegada, tendo sido aplicado 35 micrômetros de espessura de emulsão. Então, em uma sala com luz amarela, posiciona-se o fotolito sobre a superfície da tela e, por meio de vácuo, extrai-se todo o ar contido entre o fotolito e a tela, evitando-se assim, possíveis distorções. A face da tela onde encontra-se o fotolito é exposta à luz ultravioleta por um tempo determinado. Ao final desse tempo, tem-se a tela sensibilizada. Na sequência efetuou-se a retirada da emulsão não sensibilizada, com um jato de água direcionado. Logo em seguida, é efetuada uma inspeção visual, para verificar a qualidade da definição dos contornos. Caso esteja conforme, a tela é inserida em uma estufa para secagem definitiva da emulsão.

4.1.3 Preparação do Secador

O processo de preparação do secador consiste em ajustar a temperatura das 4 zonas de aquecimento, conforme especificado pelo fabricante da pasta. No caso da pasta de AgPd, foram ajustadas as quatro zonas a 150 °C. Aguarda-se o tempo necessário para a estabilização da temperatura e, então inicia-se o processo de aferição, que consiste em fixar um termopar tipo K, sobre um substrato e, inicia-se a leitura da temperatura até que o termopar atinja a saída do secador. Assim, graficamente, obtém-se o perfil de temperatura sobre o substrato

4.1.4 Preparação do forno de sinterização

O forno de sinterização utilizado possui sete zonas e, após o ajuste das sete zonas de aquecimento, conforme perfil especificado pelo fabricante da pasta, aguarda-se o tempo necessário para a estabilização da temperatura.

Então, inicia-se o processo de aferição, que consiste em fixar um termopar tipo K, sobre um substrato e realizando-se a leitura da temperatura até que o termopar atinja a saída do forno. Assim, graficamente, obtém-se o perfil de temperatura sobre o substrato.

Além do ajuste da temperatura, foi controlada a vazão do fluxo de ar seco das 7 zonas.

Conforme discutido anteriormente, o fluxo de oxigênio no interior do forno tem uma relação direta sobre a estabilidade do TCR das pastas resistivas.

Foram adquiridos os substratos de alumina 96% modelo A-471 da empresa Kyocera, nas dimensões especificadas e pronto para entrar no processo produtivo não necessitando de qualquer processo preparatório.

Devido à relação da espessura da membrana com o ganho do transdutor, optou-se pelo controle dessa dimensão.

Na Figura 20, observa-se o dispositivo de controle de espessura da membrana do substrato de alumina, que é composto por um suporte de aço onde foi instalado um apalpador digital da marca Mitutoyo modelo Absolute.

Figura 20 - Dispositivo de controle de espessura de membrana



Fonte: Elaboração própria.

Antes de iniciar a impressão foi preparada a pasta, homogeneizando a mesma, para que os metais presentes, sedimentados no fundo dos recipientes, sejam distribuídos uniformemente por todo o volume.

Essa operação foi efetuada com uma espátula plástica e um operador treinado, pois os movimentos efetuados não devem promover a adição de ar, formando bolhas na pasta, evitando assim possíveis não conformidades decorrentes de processo.

Em seguida, verificou-se a viscosidade, com um viscosímetro da marca Brookfield HBT, ilustrado na Figura 21.

Observou-se a leitura de 190 PaS, indicando que a viscosidade estava dentro da tolerância, 150 a 230 PaS, informada pelo fabricante Dupont.

De acordo com Harper(1974, p.3-12), viscosidade e portanto, a quantidade de solvente presente na pasta determina a espessura e as propriedades elétricas do resistor a filme espesso.

Figura 21 - Viscosímetro da marca Brookfield HBT.



Fonte: Elaboração própria.

Tendo em mãos, já desenvolvida previamente, a tela de aço inox onde o layout do projeto já foi revelado, foi instalada a tela na impressora e em seguida o dispositivo de fixação do substrato, efetuando os ajustes necessários para o alinhamento da tela com o substrato.

Na Figura 22 podem-se observar os manípulos de ajuste de alinhamento da tela.

Figura 22 - Alinhamento da tela com o substrato na impressora.



Fonte: Elaboração própria.

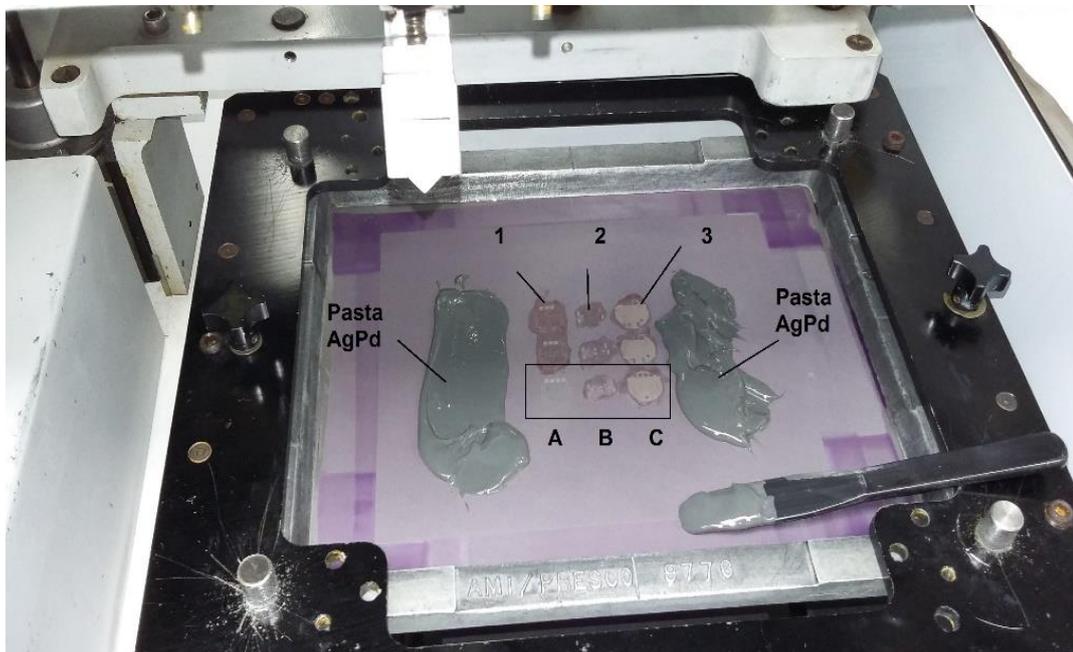
Todo esse processo foi realizado em uma impressora própria para a tecnologia de filme espesso, em que a estabilidade dos parâmetros de espessura das camadas (na ordem de micrômetros) e o paralelismo da impressão são vitais para o resultado final.

Para facilitar a extração do substrato modificou-se uma pinça, transformando a em um dispositivo para extração do substrato.

4.1.5 Impressão das pistas de AgPd

Conforme Figura 23, em uma mesma tela observam-se as três camadas de três produtos, nesse projeto serão utilizadas apenas as camadas destacadas, com uma moldura e as letras ABC, em que A, é a camada da pista condutora, em B, os piezos resistores e em C a proteção polimérica. Os outros produtos, assim como as camadas B e C deste produto, foram bloqueados, permitindo assim, apenas a impressão da pasta de AgPd.

Figura 23 – Tela com pasta AgPd, pronta para iniciar a impressão.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.6 Secagem das pistas de AgPd

Após o processo de impressão, os substratos foram levados ao secador de esteira, onde permaneceram por 15 minutos à temperatura de 150°C.

4.1.7 Sinterização das pistas de AgPd

Após o processo de secagem, os substratos foram inseridos no forno de sinterização onde permaneceram por 34 minutos em perfil de temperatura específico, dos quais, 10 a 15 minutos a 850°C.

4.1.8 Controle da espessura de camada de AgPd

Com o objetivo de controlar o processo de impressão e a qualidade do produto final, foi medida a espessura da camada de AgPd sobre o substrato, utilizando um

perfilômetro da marca Kusakalab modelo SE1700, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Perfilometro.



Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que a pasta de RuO_2 também requer os mesmos cuidados de homogeneização que a pasta de AgPd , pois o RuO_2 também tende a sedimentar no fundo do frasco. Após homogeneização foi verificada a viscosidade no viscosímetro Brookfield HBT da Figura 21.

Nas condições de 10 rpm, 25°C, dispositivo 5, foi obtido 185 PaS. Portanto, está dentro do especificado pelo fabricante Dupont (de 140 a 220 PaS).

Utilizando a mesma tela para impressão da pasta de AgPd , foi efetuado o desbloqueio do layout dos piezoresistores e bloqueados os layouts das pistas de AgPd e proteção polimérica. Logo em seguida, foi adicionada pasta de RuO_2 e efetuado o processo de ajuste e alinhamento, conforme descrito anteriormente item 4.1.7.

4.1.9 Impressão dos piezoresistores de RuO_2

Para a pasta de óxido de Rutênio, deve-se ter o cuidado de observar e garantir um bom alinhamento entre os piezoresistores e a pista condutora da camada inferior. Qualquer falha no alinhamento pode comprometer o funcionamento final do produto.

Assim como descrito no item 4.1.8, foram impressos os substratos com pasta de RuO_2 .

4.1.10 Secagem dos piezoresistores de RuO₂

Conforme o processo de secagem da pasta de AgPd, para os piezoresistores de RuO₂, seguiu-se a mesma sequência e perfil térmico, já descrita anteriormente no item 4.1.9.

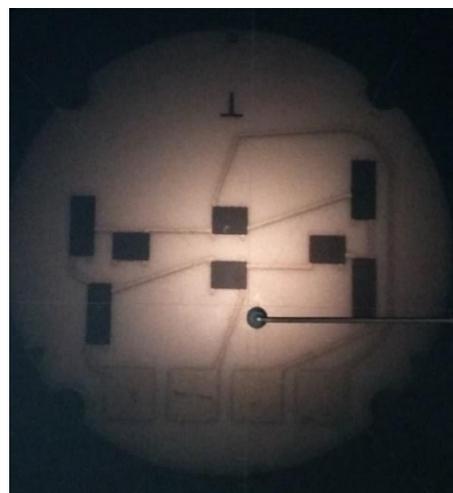
4.1.11 Controle da camada de RuO₂

O processo de medição de espessura de RuO₂, foi realizado utilizando o mesmo equipamento e procedimento do processo já descrito anteriormente para medir a espessura da pasta de AgPd no item 4.1.11. A espessura do piezoresistor, determina a resistência ôhmica do elemento sensor, e confirma os ajustes efetuados e o controle da espessura durante o processo de impressão.

4.1.12 Controle das dimensões dos piezoresistores

As características dimensionais dos sensores após o processo de sinterização, foram obtidas por meio de um projetor de perfil digital marca Pantec modelo CPJ-3015J conforme a Figura 25. Esse equipamento está equipado com sistema de leitura digital de coordenadas nos eixos X e Y com precisão de 1 micrômetro.

Figura 25 - Projetor de perfil digital (esquerda), e no detalhe (direita) a visão na tela, figura 26.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 26, podem se observar as pistas condutoras e os piezoresistores no projetor de perfil utilizado para o controle dimensional.

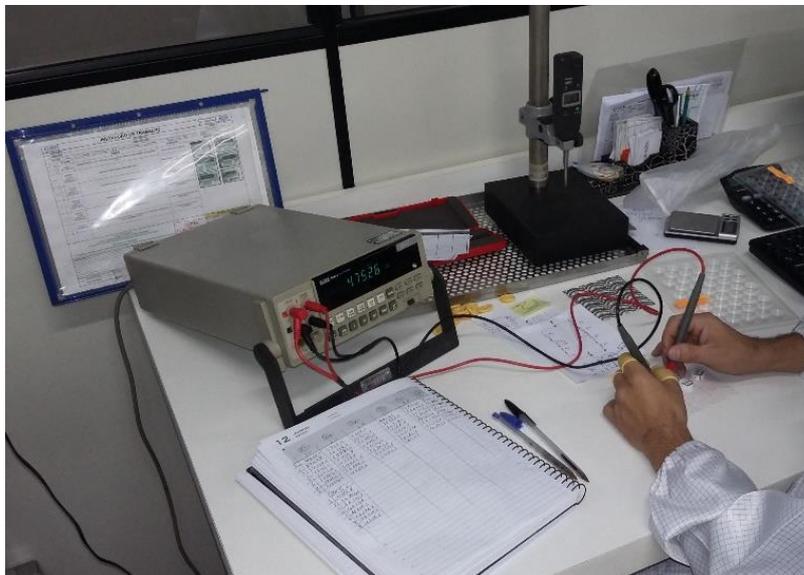
Foram medidas as dimensões dos oito piezoresistores que compõem o transdutor.

4.1.13 Controle da resistência ôhmica dos piezoresistores.

O controle da resistência ôhmica do produto, é um procedimento padrão, que tem por objetivo avaliar todas as fases do processo produtivo. O valor ôhmico obtido, pode confirmar a espessura da camada resistiva e o perfil térmico em que a peça foi submetida. Assim, foi efetuada a medição da resistência ôhmica dos oito piezoresistores, quatro ativos e quatro de balanceamento.

Na Figura 27, observa-se o momento do controle dos valores ôhmicos dos piezoresistores, efetuado com um multímetro Fluke modelo 8842A.

Figura 27 - Controle dos valores ôhmicos dos piezoresistores com auxílio de um multímetro Fluke modelo 8842A.



Fonte: Elaboração própria.

Embora o sistema a laser marca Teradyne modelo W640, utilizado neste projeto, possa efetuar o ajuste automático do transdutor, isto não ocorreu, pois teria que ser elaborado um programa e dispendidos recursos com dispositivos de fixação. Assim, optou-se por um ajuste semiautomático, em que foi medido manualmente o

valor do resistor de ajuste, e então foi inserido no programa o valor a ser alcançado com o ajuste.

4.1.14 Ajuste do Offset

Tendo o transdutor já sinterizado, iniciou-se o processo de ajuste do zero do transdutor, efetuado 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. Como descrito anteriormente, foi alimentado e posicionado o transdutor no sistema a laser, e então, foi ajustado o offset para zero Volts. Essa tensão pode variar de produto para produto ou aplicação. A preparação da pasta polimérica consiste em homogeneizar o conteúdo do frasco, para que os materiais de alta densidade que podem sedimentar ao fundo do frasco sejam distribuídos uniformemente por todo o volume. Em seguida foi verificada a densidade, seguindo os mesmos procedimentos adotados para AgPd e RuO₂, já discutidos no item 4.1.12.

Aplicando o mesmo procedimento adotado para pasta de AgPd no item 4.1.7, foram efetuados os ajustes para alinhamento da camada polimérica sobre as duas outras camadas já impressas, condutora e resistivas. O controle do alinhamento é efetuado por meio de um microscópio binocular ou lupa com um aumento de 14 vezes em relação a imagem real.

4.1.15 Impressão da pasta polimérica

O processo de impressão da pasta polimérica é similar ao processo de impressão já discutido no item 4.1.8. Assim, foi adicionada a pasta polimérica na impressora e sequencialmente impresso todos os transdutores de pressão.

Essa camada polimérica tem a função de proteger o produto contra umidade e atmosferas agressivas ao produto.

4.1.16 Secagem da pasta polimérica

A secagem e cura da pasta polimérica difere dos processos de secagem e sinterização das pastas de AgPd e RuO₂. Pois o seu processo de cura ocorre à

temperatura de 200°C. Assim, para a cura da pasta polimérica, deve-se utilizar um secador com fluxo de ar lateral, evitando assim o espalhamento da cobertura.

Na Figura 28, observa-se a estufa de secagem utilizada no desenvolvimento deste projeto.

Figura 28 - Estufa de secagem utilizada no desenvolvimento deste projeto.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Caracterização do transdutor

4.2.1 Desenvolvimento de dispositivo para caracterização

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. Esse dispositivo é apresentado mais à frente na parte de resultados.

Tendo montado o transdutor no dispositivo (esse foi montado no bocal de aplicação de pressão da bomba hidráulica, marca SALCAS, modelo 1000) para aferição de transdutores de pressão, as saídas do transdutor foram conectadas à

entrada do multímetro Fluke modelo 8842A, para leitura da tensão da saída do transdutor, conforme Figura 29.

Figura 29 - Sistema utilizado para ensaio do transdutor.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Resposta Tensão de saída/Pressão, a temperatura de 22 °C

Utilizando o dispositivo já descrito anteriormente, Figura 29, foi ajustada a pressão em 0 MPa, e lida a tensão no voltímetro, ajustando novamente a pressão a 0,1 MPa e efetuada a leitura da tensão no voltímetro e assim sucessivamente até atingir 1,0 MPa.

Foi montado o transdutor no dispositivo, conforme Figura 33 e instalado no interior da estufa Figuras 30 e 31, com temperatura programável na faixa de 40°C a 150°C.

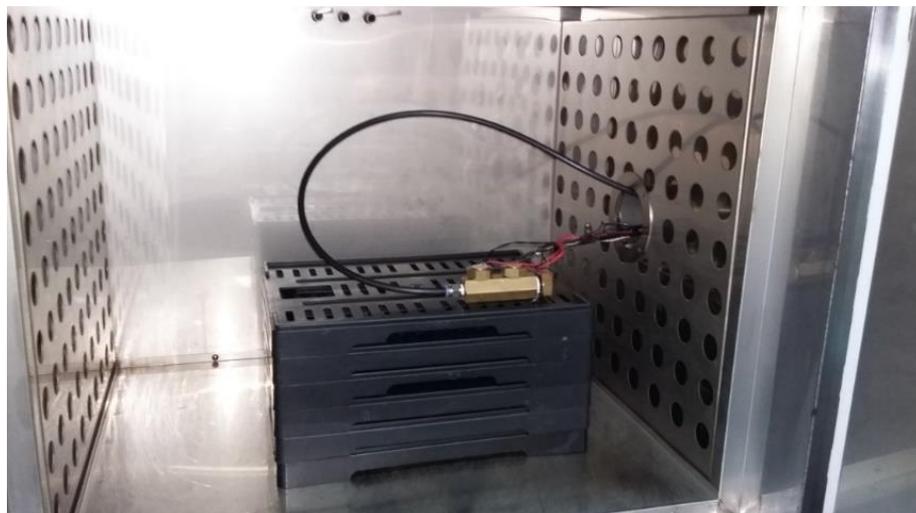
Além disso, também foi instalado um sistema de aquisição automática de dados (Figura 34), para medir a temperatura do sistema, por meio de um termopar tipo K.

Figura 30 - Estufa com temperatura controlada programável.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 - Interior da estufa.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 - Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Resposta Pressão/Tensão de saída, a temperatura de 26,5 a 150°C.

Utilizando a estufa com temperatura controlada (Figura 30) foram realizados os testes para o levantamento da curva de resposta dos sensores na faixa de 26,5 a 150°C.

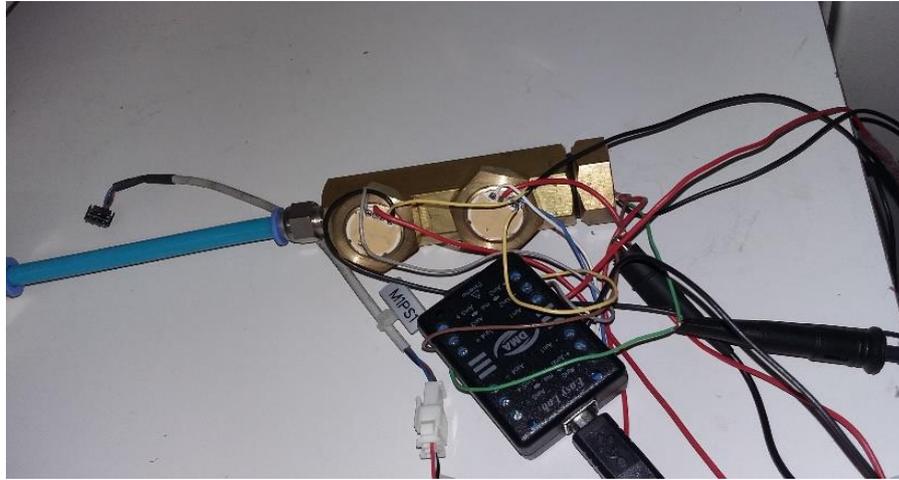
Nesse teste foi utilizado um sistema de aquisição de dados marca Graphtec Modelo Midilogger GL220, Figura 32, onde foram armazenados os dados de pressão e temperatura durante os testes.

Foi montado um dispositivo de ensaio para transdutor de pressão, conforme visto nas Figuras 33.

Nesse dispositivo foi instalado um sensor desenvolvido por um fabricante Suíço, com pasta polimérica em azul e dois dos transdutores desenvolvidos, com pasta polimérica de proteção na cor bege.

O transdutor do fabricante Suíço foi desenvolvido também sobre substrato de alumina e, utiliza também pasta piezo resistiva de oxido de Rutênio (RuO_2), porém, a pasta condutora é de ouro, o que o difere do projeto proposto em que é utilizada a pasta de Prata e Paládio.

Figura 33 - Dispositivo de teste de durabilidade com sistema de aquisição de dados.

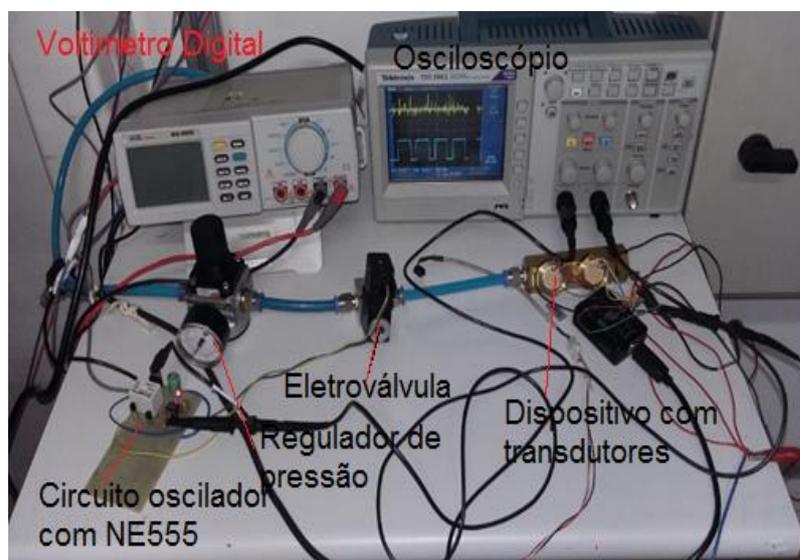


Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Teste de durabilidade a temperatura ambiente

Tendo o dispositivo montado e preparado conforme Figura 34, foi acionado o oscilador com frequência de teste 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.

Figura 34 - Dispositivo de teste de durabilidade



Fonte: Elaboração própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Local

Este projeto foi desenvolvido nas instalações da empresa **TSA - Tecnologia em Sistemas Automotivos Ltda.**, fabricante de sensores e transdutores para o mercado automotivo com tecnologia de filme espesso, localizada na cidade de Itu, São Paulo, Brasil.

5.2 Considerações

5.2.1 Projeto em CAD layout

Com base nos dados informados pelo fabricante do substrato e dimensional real da amostra, foi desenvolvida uma versão 3D do substrato para facilitar o posicionamento dos piezoresistores, Figura 35.

Figura 35 - 3D do substrato.

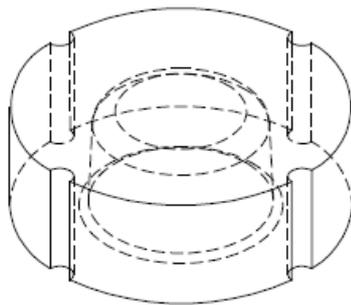
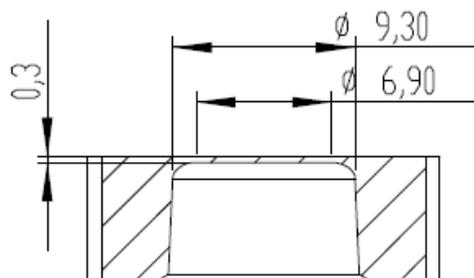


Figura 36 - Vista em corte do substrato.



Fonte: Elaboração própria.

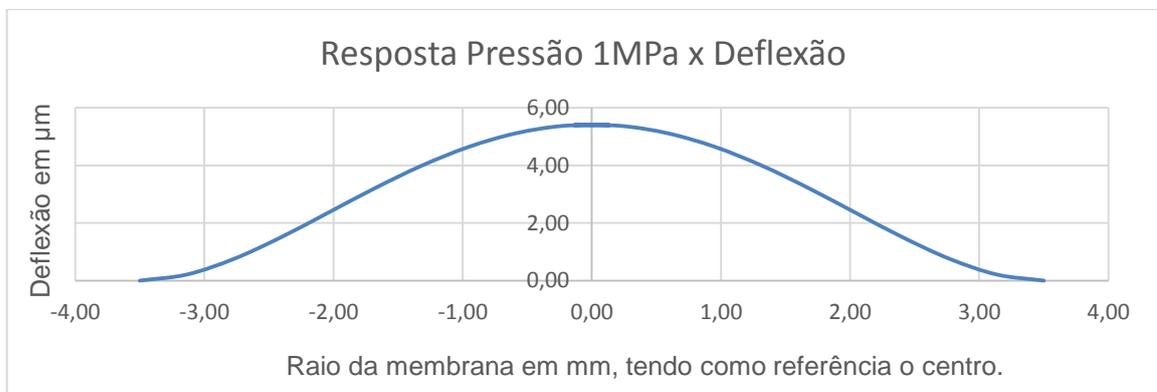
Na Figura 36 tem-se a vista em corte no centro do substrato, para melhor visualização do ponto de instalação dos piezoresistores.

Tendo como base a modelagem matemática proposta por Doebelin, (1976, p.388), para membranas delgadas circulares, engastadas pelas bordas, os dados dimensionais do substrato e as características físicas da alumina, foi efetuada a

simulação da deformação da membrana utilizando o software Excel. O gráfico 2 permite identificar os pontos de maior deflexão na membrana, sendo estes na região próxima as bordas e ao centro da membrana, tornando mais rápido o desenvolvimento do produto.

Devido ao layout proposto, nota-se que na região próxima às bordas, ocorre a compressão nos piezoresistores, e na região central da membrana o alongamento, assim, os quatro piezoresistores estarão ativos durante o processo de medição, permitindo um ganho mais elevado para o sistema

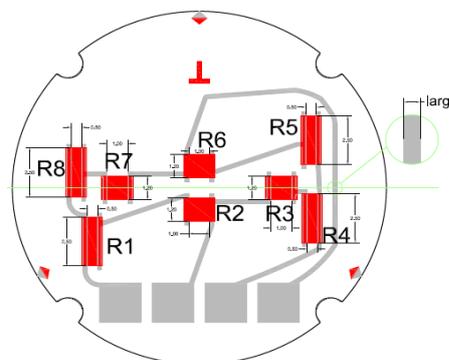
Gráfico 2 - Simulação da deformação em Excel.



Fonte: Elaboração própria.

Tendo como base a simulação acima descrita, foi projetado em CAD o layout, apresentado na Figura 37. Nessa fase do projeto, é importante a visualização das camadas sobrepostas, permitindo o controle do alinhamento entre camadas. Na Figura 37, observa-se o layout das vias condutoras na cor cinza e as vias resistivas na cor vermelha.

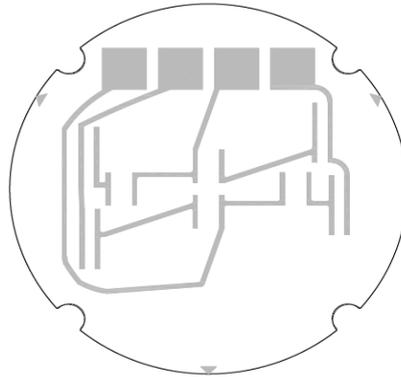
Figura 37 - Layout geral em CAD.



Fonte: Elaboração própria.

Após a definição e verificação dos registros das camadas, essas devem ser separadas para confecção dos fotolitos. Na Figura 38 observa-se somente a camada da pasta condutora de AgPd.

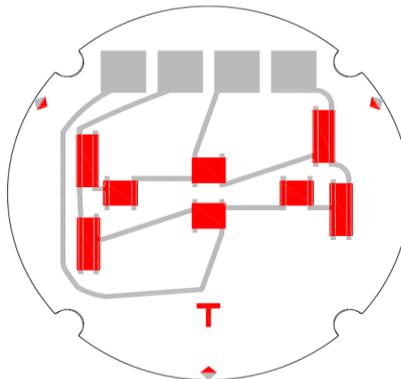
Figura 38 – Layout de AgPd.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 39, observa-se o layout em vermelho dos piezoresistores de RuO_2 e também pode-se notar em cinza as vias condutoras.

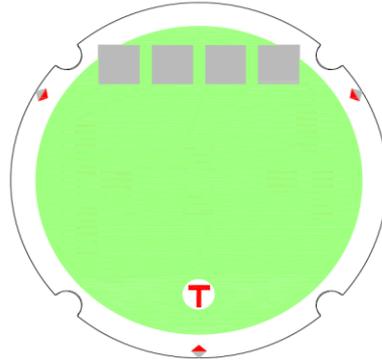
Figura 39 - Piezoresistores de RuO_2 no layout.



Fonte: Elaboração própria.

Logo a seguir na Figura 40, observa-se em verde, o projeto da camada apassivadora de polímero, responsável pela proteção dos piezoresistores da umidade do ambiente da aplicação.

Figura 40 – Layout polímero.

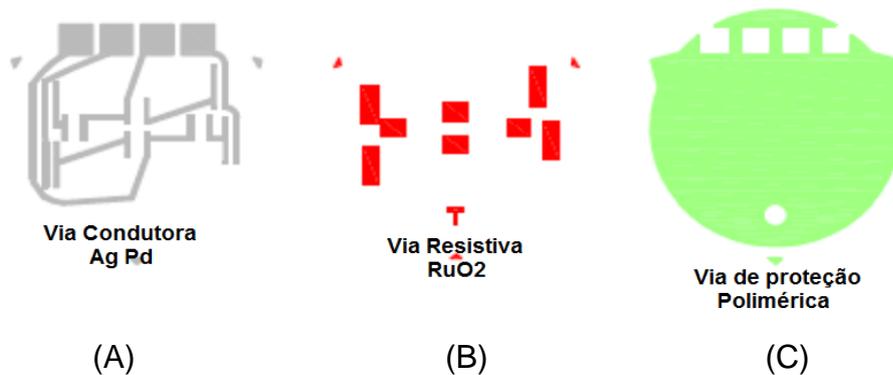


Fonte: Elaboração própria.

5.2.2 Fotolitos e Tela

Na Figura 41, visualiza-se o layout, já definido do fotolito. Normalmente, são desenvolvidas em telas separadas, porém, por se tratar de um protótipo, os três layouts foram desenvolvidos em uma mesma tela, e são bloqueados no instante da impressão.

Figura 41 - Layout do fotolito

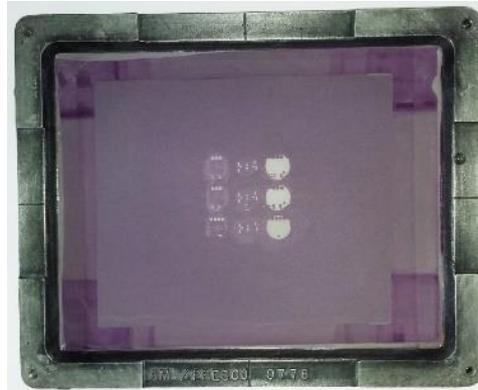


Fonte: Elaboração própria.

Em (A) observa-se o layout das vias condutoras de AgPd, em (B), o layout dos piezoresistores de RuO₂, ao centro os quatro resistores ativos e nas laterais os resistores de ajuste e em (C), o layout da camada polimérica para proteção contra umidade. Pode-se observar também a presença dos três pontos de controle de registro ou alinhamento de impressão nos três layouts, sendo esses muito importantes para o processo de impressão, garantindo o correto sincronismo dos três layouts. Na Figura 42, pode-se observar a tela já desenvolvida com os três layouts, em uma

mesma tela. Essa configuração não é usual, porém, como se trata de um protótipo, com reduzido número de peças, foi a opção adotada.

Figura 42 – Tela.

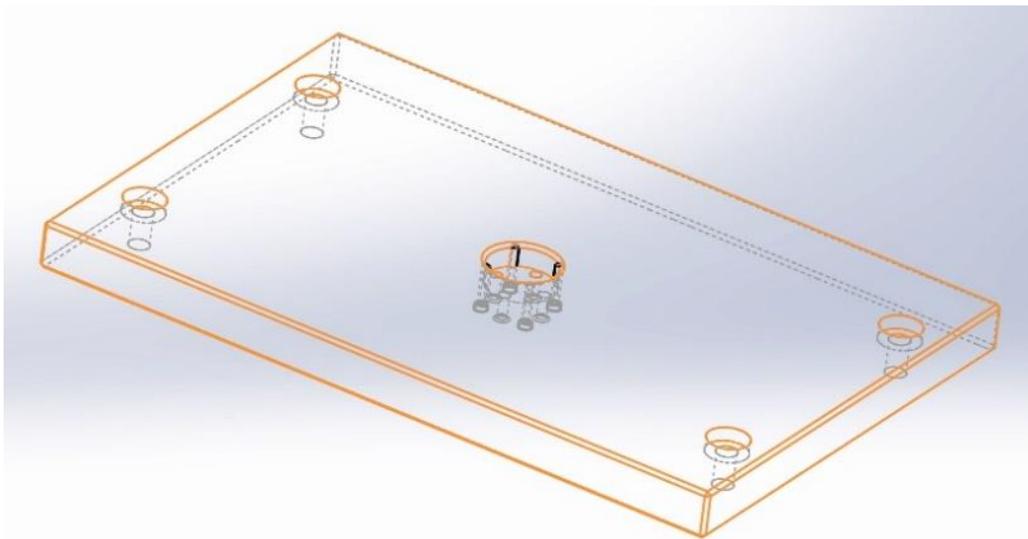


Fonte: Elaboração própria.

5.2.3 Dispositivo de fixação do substrato

Observa-se na Figura 43 o projeto em CAD do dispositivo de fixação do substrato na impressora, em que se podem notar os quatro furos de fixação, para alojamento dos parafusos, incluindo suas cabeças e ao centro, nota-se a presença de rebaixo para alojamento do substrato.

Figura 43 - Projeto em CAD do dispositivo de fixação do substrato na impressora.

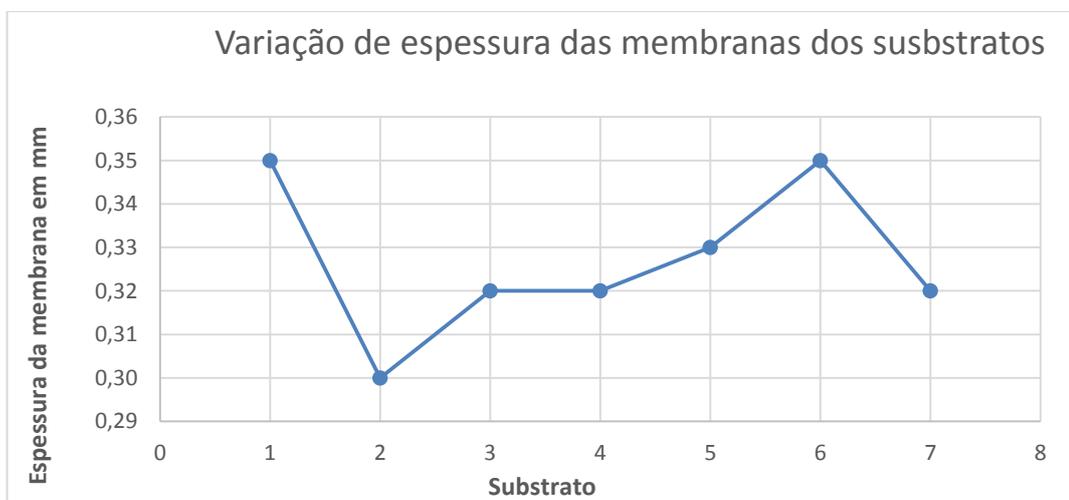


Fonte: Elaboração própria.

5.2.4 Variação da espessura das membranas dos substratos

No gráfico 3 pode-se observar a variação da espessura das 7 amostras de substrato utilizadas para o desenvolvimento desses protótipos. Observa-se uma variação entre a menor espessura e a maior de 0,05 mm, o que representa uma variação de 16,66% na espessura, que influenciará reduzindo o ganho quando a espessura for maior e aumentando o ganho quando menor. Exemplificando, se dois transdutores forem submetidos sob à mesma pressão, porém com espessura de membranas diferentes, o de menor espessura sofrerá uma maior deformação e, portanto, apresentará maior ganho, enquanto que o transdutor com maior espessura apresentará uma menor deformação consequentemente apresentando um menor ganho. Assim a espessura é uma variável que determina o ganho do transdutor. Portanto deve ser controlada no processo produtivo.

Gráfico 3 - Variação de espessura das amostras dos substratos utilizados para o desenvolvimento dos protótipos.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.5 Variação da espessura de camada em relação a resistência obtida de pasta resistiva de RuO₂

A grandeza relacionada a resistência elétrica é a resistividade, que é uma propriedade específica de cada substância e não de uma amostra particular da mesma. Halliday (1978, p. 138).

É definida por:

$$\rho = \frac{c}{A} \quad (\text{Equação 17})$$

Sendo:

A - Área do condutor

C – Comprimento do condutor

A variação da espessura da pasta piezoresistiva de RuO₂ determina a resistência final dos elementos sensores.

Como os substratos fornecidos pelo fabricante apresentaram variação de 16,66% na espessura da membrana, realizou-se uma simulação para verificar o quanto isso pode afetar a resistência final dos elementos sensores. Para esse cálculo utilizou-se a equação 17, obtendo-se o gráfico 5.

$$R = \rho_s \frac{c}{l} \quad (\text{Equação 18})$$

Sendo:

R – Resistencia ôhmica

ρ_s = Resistividade por quadrado

C = Comprimento

l = Largura

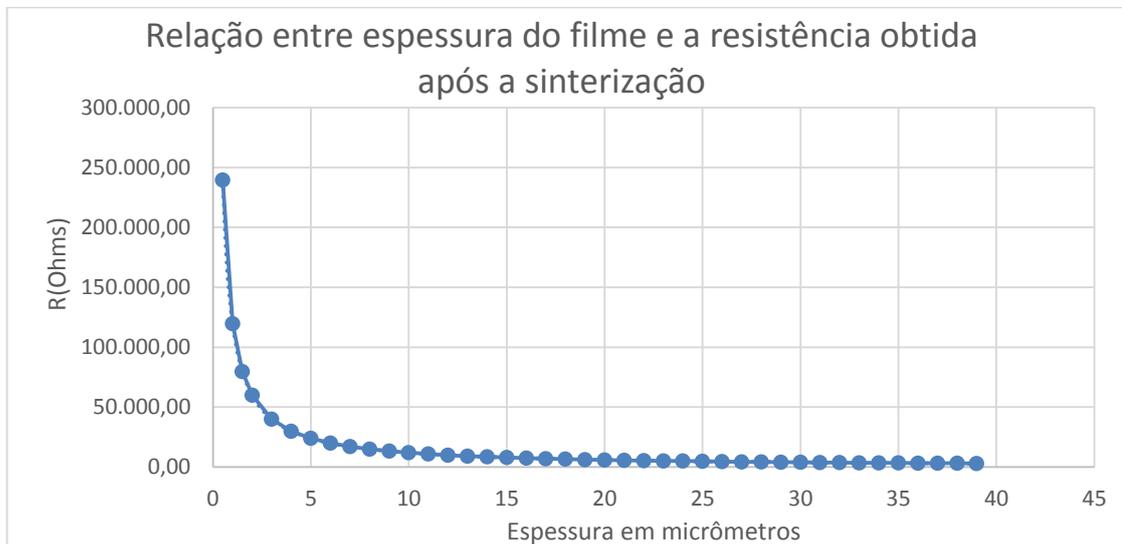
De acordo com Martino (2003, p.129), a resistência de folha ou resistividade por quadrado, é uma característica muito importante do processo, ela depende da resistividade intrínseca do material e da espessura ou profundidade da camada.

O perfil da curva do gráfico 4 mostra que pequenas variações na espessura da camada de pasta resistiva podem corresponder a um grande incremento da resistência ôhmica, porem a variação da espessura dos substratos não exerce nenhuma influência na espessura da impressão, pois, a impressão é realizada com um rodo sob pressão constante.

Pequenas variações de espessura no substrato, serão compensadas pelo sistema de avanço pneumático vertical do rodo, mantendo assim, a espessura da camada, que é definida pela espessura da tela emulsionada e, conseqüentemente, mantendo a resistência final do resistor.

Essa informação resultante é utilizada para realimentar 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.

Gráfico 4 – Relação entre espessura do filme e a resistência obtida após a sinterização.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.6 Curva de aferição da temperatura do secador

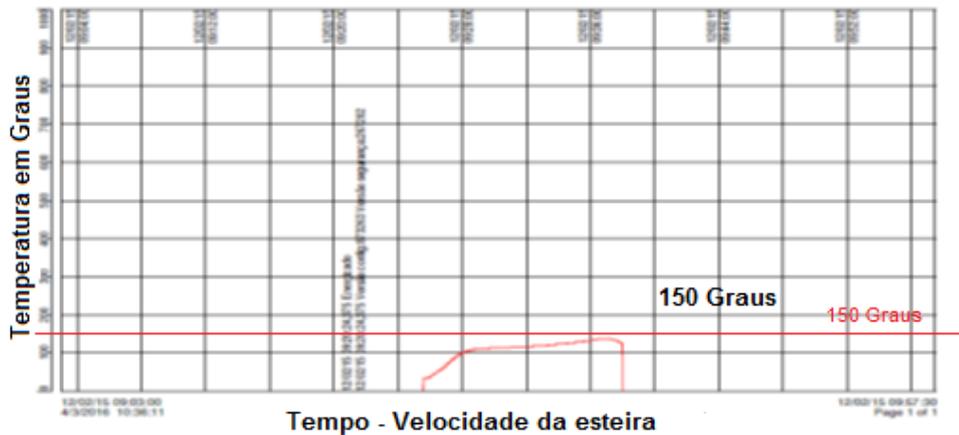
Na Figura 44, observa-se a curva obtida do secador após ajuste das 4 zonas de controle de temperatura.

Embora tenham sido ajustados os controladores das temperaturas para 150 °C, esse valor não é observado no gráfico a seguir, isso decorre, da diferença de temperatura do forno e a temperatura sobre o substrato, conforme abordado em 4.1.3.

Como o tempo de exposição é controlado por meio da velocidade da esteira, para cada quadro há um tempo de 10 minutos.

Assim, nota-se um incremento gradual de temperatura, atingindo um ponto de máximo em 30 minutos de exposição.

Figura 44 - Curva do secador.



Fonte: Elaboração própria.

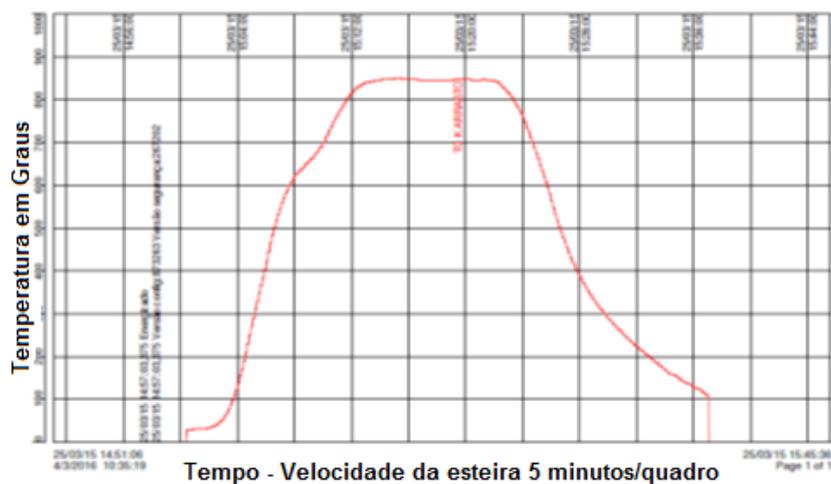
5.2.7 Curva de aferição da temperatura do forno de sinterização

Na Figura 45, observa-se a curva obtida do forno de sinterização após o ajuste das zonas das 7 zonas de controle de temperatura, obtido conforme descrito em 4.1.4.

Nota-se que o perfil de temperatura dos substratos está conforme especificado pelo fabricante da pasta, fase de aquecimento, burn out (queima dos solúveis) 300 °C a 450 °C, início da fusão da frita de vidro 650 °C a 700 °C.

Ao atingir 850°C há a fusão da frita de vidro e após um período de 12 a 15 minutos, inicia-se a fase do resfriamento e ao final chega-se à temperatura ambiente.

Figura 45 - Curva do forno



Fonte: Elaboração própria.

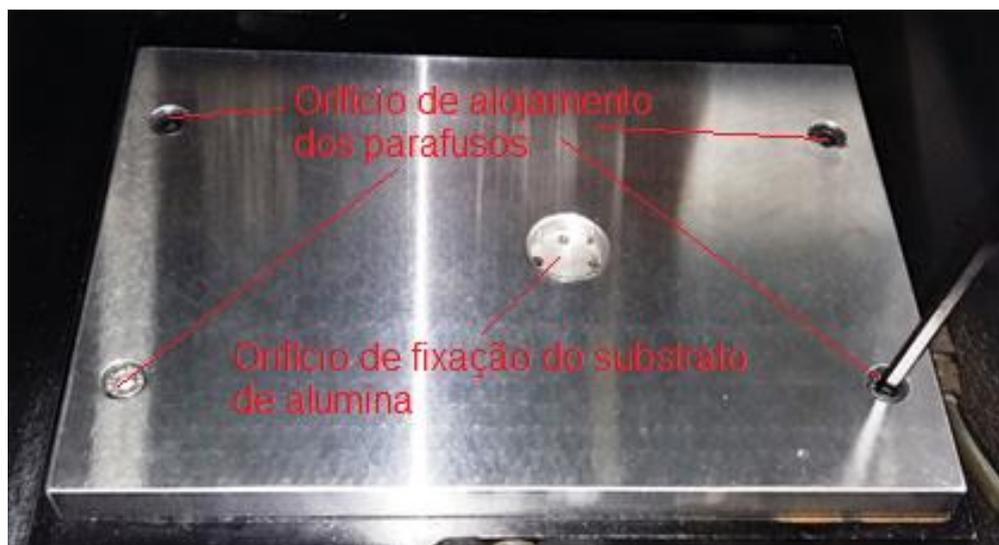
5.2.8 Dispositivo de fixação do substrato a impressora

O dispositivo a seguir, foi desenvolvido utilizando uma placa de aço 1045, tendo todo seu perímetro fresado, as superfícies superior e inferior foram retificadas, foram efetuados os 4 furos de fixação por meio de fresa de topo para alojamento da cabeça dos 4 parafusos e, finalmente, o rebaixo para alojamento e fixação do substrato.

Devido à presença dos 4 canais guias do substrato, o orifício de fixação, foi efetuado por eletro erosão de topo, facilitando sua construção.

Na Figura 46, observa-se o dispositivo desenvolvido para fixação do substrato na impressora.

Figura 46 - Dispositivo desenvolvido para fixação do substrato na impressora.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.9 Dispositivo de extração do substrato

Durante o processo de impressão, o substrato é fixado por meio de vácuo presente no dispositivo de fixação, para que o substrato não se mova durante a impressão. Porém, ao final do processo de impressão, o substrato precisa ser extraído e, por se tratar de um protótipo, foi desenvolvido um extrator a partir de uma pinça, que teve suas pontas desbastadas o suficiente para passar pelos canais guia do substrato, permitindo assim, a extração do substrato no dispositivo. Na Figura 47 observa-se o dispositivo desenvolvido com uma pinça para retirada do substrato do dispositivo de fixação.

Figura - 47 – Dispositivo de extração do substrato.

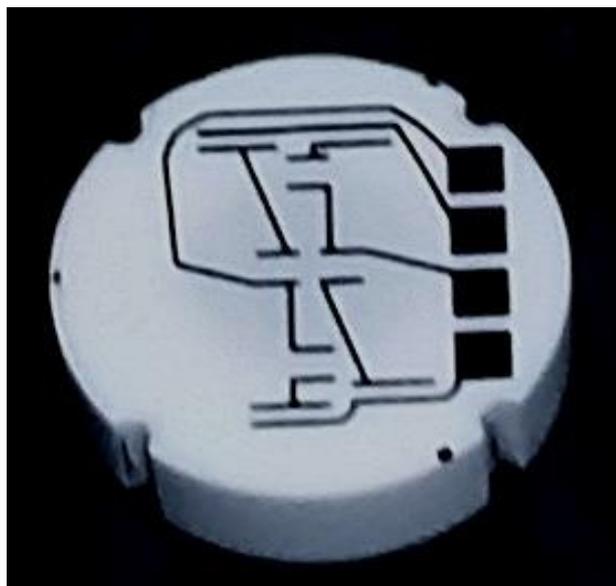


Fonte: Elaboração própria.

5.2.10 Substrato com pasta de AgPd sinterizada

Na Figura 48, observa-se o substrato com a camada de AgPd impressa e sinterizada. Nota-se os quatro terminais de saída do transdutor em AgPd, objeto deste projeto.

Figura 48 - Substrato com a camada de AgPd.



Fonte: Elaboração própria.

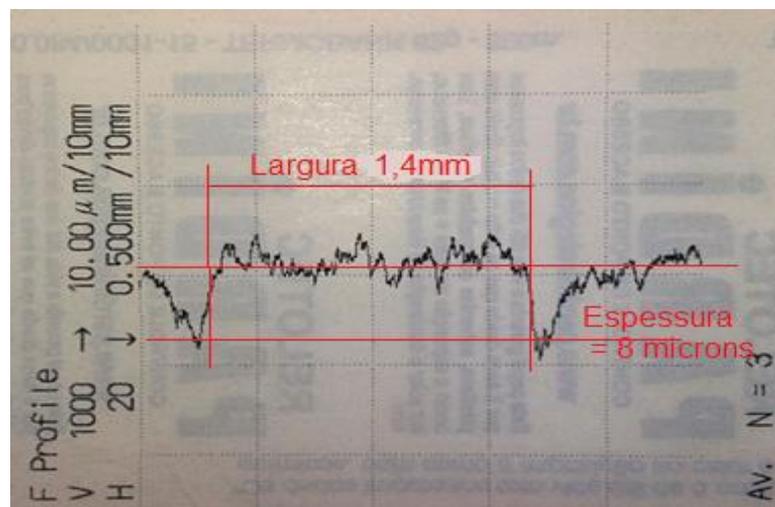
5.2.11 Controle dimensional da espessura de camada de AgPd

Na Figura 49, observa-se o perfil da camada de AgPd, medido nos terminais de solda do transdutor.

Pode se notar que o valor informado é de 8 micrômetros de espessura por 1,4 mm de largura, portanto a espessura da camada de AgPd medida, está menor que o valor informado como ideal pelo fabricante da pasta (Dupont) de 12 micrômetros.

Conforme já discutido em 5.1.5, esta variação na espessura de camada impacta no aumento da resistência ôhmica da pista condutora, porém, esta diferença não afetará o projeto proposto, pois as pistas são curtas, com baixa resistência, da ordem de miliohms, não apresentando significativa variação em relação à resistência ôhmica dos piezos resistores que apresentam resistividade da ordem de 10 000 Ω .

Figura 49 - Perfil da camada de AgPd nos terminais de solda.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.12 Substrato após impressão de RuO₂

Na Figura 50 observam-se os substratos com a camada piezo resistiva de RuO₂ já sinterizada, pronto para o controle dimensional de espessura de camada.

Nesse estágio, ainda se deve ter o cuidado para não tocar nas peças sem a devida proteção com luvas ou dedeiras especiais de silicone, evitando a contaminação

com gordura ou outras impurezas que possam comprometer a adesão da camada de proteção polimérica.

Figura 50 – Substratos com camada RuO₂.

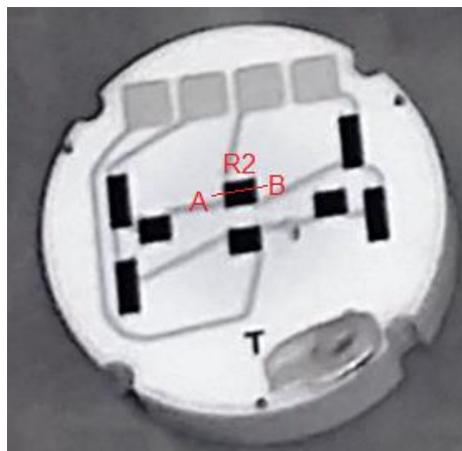


Fonte: Elaboração própria.

5.2.13 Controle dimensional da espessura de camada de RuO₂

Na Figura 51 pode-se observar o substrato com as camadas condutora e a piezoresistiva sinterizadas, prontas para o controle dimensional da espessura de camada. Nota-se na Figura 51, a identificação do local sobre o substrato, onde foi efetuada a medição da espessura, iniciando em A e deslocando-se até o ponto B.

Figura 51 - Substrato com as camadas condutoras e resistivas sinterizadas.



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 52, apresenta o perfil transversal da camada do piezo resistor central, R2.

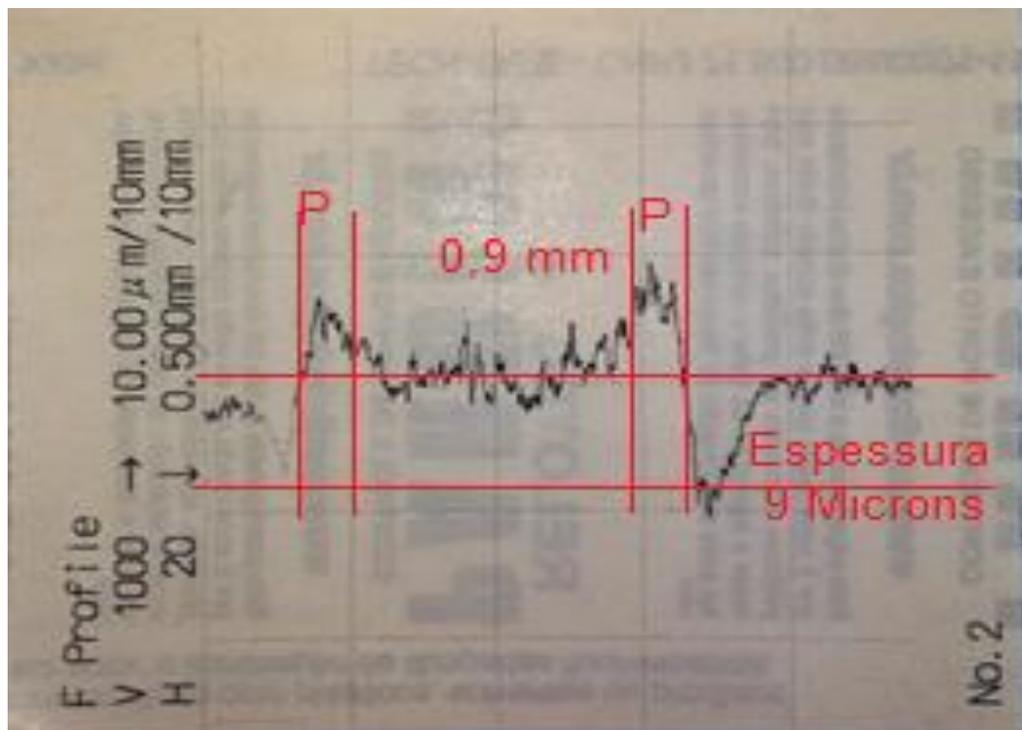
A espessura do perfil medido foi de 9 micrômetros, portanto, está abaixo dos 12 micrômetros definido pelo fabricante da pasta para se atingir a resistência pretendida.

Assim, conforme discutido no item 5.1.5, essa redução na espessura implica em um aumento da resistência ôhmica no piezoresistor.

Também se pode observar na Figura 52, que no início da leitura há uma elevação do valor medido, decorrente da soma da espessura da camada condutora e resistiva.

Então, observa-se uma redução do valor, região limitada pela cota de 0,9mm e então ao final a elevação em que temos novamente, a soma da camada resistiva e condutora.

Figura 52- Perfil transversal da camada do piezoresistor central.



Fonte: Elaboração Própria.

5.2.14 Controle dimensional dos piezoresistores

Na tabela 2, podem-se observar as variações entre as dimensões projetadas e as medidas obtidas dos piezoresistores, assim como a variação percentual, tendo como referência a Figura 37.

Nota-se uma variação dimensional significativa em R1 porém, R1 não é um resistor ativo, não afetando o resultado geral do produto.

Entre os resistores ativos, R2, R3, R6 e R7, a maior variação dimensional é encontrada em R3 de 9,3%.

Essa variação não deve ser analisada isoladamente, e sim em um contexto tridimensional, espessura, largura e comprimento.

No próximo tópico será abordada a constante dimensional (kd), comprimento sobre largura do piezoresistor.

Tabela 2 – Variação dimensional dos piezoresistores.

VARIÇÃO DIMENSIONAL					
R	Dim	Sp	S1	Δ Dim	Δ Dim %
R1	C1	0,5	0,57	0,07	14,00
	L1	2,5	2,46	-0,05	-1,80
R2	C2	1,0	1,05	0,05	5,10
	L2	1,2	1,17	-0,03	-2,33
R3	C3	1,0	1,09	0,09	9,30
	L3	1,2	1,16	-0,04	-3,00
R4	C4	0,5	0,51	0,01	1,40
	L4	2,5	2,46	-0,05	-1,80
R5	C5	0,5	0,48	-0,02	-3,80
	L5	2,5	2,44	-0,06	-2,24
R6	C6	1,0	1,05	0,05	5,00
	L6	1,2	1,17	-0,03	-2,33
R7	C7	1,0	1,04	0,04	4,40
	L7	1,2	1,17	-0,03	-2,50
R8	C8	0,5	0,51	0,01	2,40
	L8	2,5	2,47	-0,03	-1,16

Fonte: Elaboração própria.

Em que R corresponde a um resistor,
Dim as dimensões,

C o comprimento,
 L a largura,
 Sp o valor projetado,
 S1 os valores reais encontrados,
 Δ Dim a diferença S1 – Sp,
 Δ Dim % a variação percentual.

A tabela 3 apresenta a constante dimensional teórica (**Kdt**) e a real (**Kd-S1**), baseado no dimensional medido no protótipo testado.

Nessa tabela, Kdt é obtido pela relação teórica do comprimento dividido pela largura do resistor, Kd-S1 representa a relação real do comprimento dividido pela largura do resistor, Δ d corresponde à diferença Kd - S1 - Kdt, enquanto que Δ d % é a variação percentual.

Tabela 3 – Variação da constante dimensional projetada e a obtida.

VARIAÇÃO Kdt, Kd-S1				
R	Kdt	Kd-S1	Δ d	Δ d %
R1	0,20	0,23	0,03	16,09
R2	0,83	0,90	0,06	7,61
R3	0,83	0,94	0,11	12,68
R4	0,20	0,21	0,01	3,26
R5	0,20	0,20	0,00	-1,60
R6	0,83	0,90	0,06	7,51
R7	0,83	0,89	0,06	7,08
R8	0,20	0,21	0,01	3,60

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que entre os piezoresistores ativos, R2, R3, R6 e R7, houve uma variação maior em R3 de 12,68%, como já havia sido observado no item anterior 5.1.14. No item a seguir foi analisada a variação dimensional relacionada à resistência ôhmica. Na tabela 4 podem-se observar os valores dos piezoresistores projetados R_t , os valores piezoresistivos calculados baseados nas dimensões medidas e o valor real das resistências lidas nos próprios piezoresistores.

Tabela 4 – Valor Ôhmico projetado e o obtido.

VARIAÇÃO RESISTIVA Ω						
R	Rt	Rc	tc $\Delta R\%$	Rr	ΔR	$\Delta R\%$
R1	2100	2.437,88	16,1	4752,2	2314,3	94,9
R2	8750	9.415,96	7,6	16832,1	7416,1	78,8
R3	8750	9.859,54	12,7	17338,1	7478,5	75,9
R4	2100	2.168,43	3,3	4705,0	2536,5	117,0
R5	2100	2.066,49	-1,6	4414,6	2348,11	113,6
R6	8750	9.407,00	7,5	17297,4	7890,4	83,9
R7	8750	9.369,23	7,1	17202,3	7833,0	83,6
R8	2100	2.175,64	3,6	4647,1	2471,4	113,6

Fonte: Elaboração própria.

Em que:

Rt é o valor resistivo projetado,

Rc o valor resistivo calculado em relação as dimensões reais encontradas,

tc $\Delta R\%$ corresponde à variação percentual entre Rc e Rt.

ΔR equivale à diferença Rr – Rc, que caracteriza a diferença entre o valor resistivo lido Rr e o valor calculado Rc, baseado nas dimensões reais medidas.

$\Delta R\%$ 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.

Por meio do laser, promove a compensação desses desvios, permitindo que a ponte de Wheatstone permaneça em equilíbrio.

5.3 Dados do transdutor

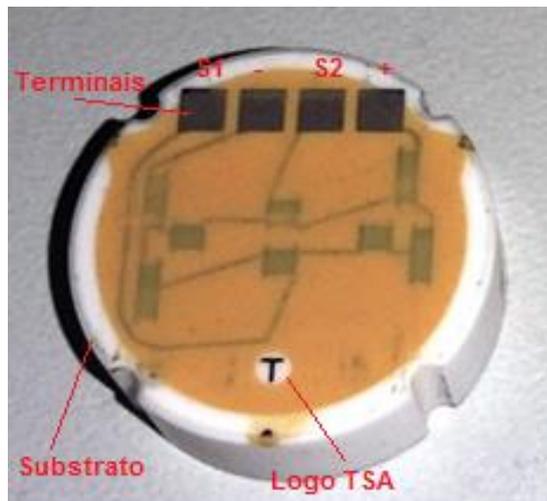
Na Figura 53 pode-se observar o produto finalizado, no substrato nota-se a presença de quatro ranhuras equidistantes em 90 Graus.

Essas ranhuras são as referências para o dispositivo de impressão, mantendo a mesma, sempre na mesma posição, garantindo o controle de registro de impressão, representado sobre o substrato com três pequenos triângulos equidistantes em 120 graus.

Observa-se também, os terminais de ligação do transdutor com o meio externo, identificados como +, -, S1 e S2, em que os terminais + e -, representam os terminais de ligação da alimentação do transdutor a 5 Volts e os terminais identificados em S1 e S2, são os terminais de saída do transdutor, onde será medida a tensão de saída.

Nesses terminais serão soldados os terminais de ligação com um amplificador para obtenção da tensão ou corrente, conforme especificado pelo cliente final.

Figura 53 - Produto finalizado.

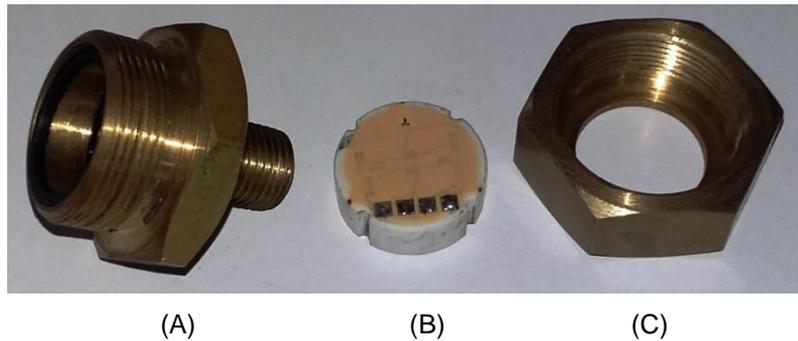


Fonte: Elaboração própria.

5.3.1 Dispositivo para caracterização

A Figura 54 apresenta o dispositivo desenvolvido para montagem do Transdutor, possibilitando a obtenção dos dados em diferentes condições de temperatura e pressão. Basicamente é composto por três peças, em (A) observa-se o receptáculo, em que o transdutor (B) é inserido e, com a tampa (C) é selado por meio da rosca e anel "O" no interior de (A), formando assim um conjunto estanque para o teste sob pressão.

Figura 54 – Dispositivo desenvolvido para montagem do Transdutor.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 55 abaixo, observa-se o dispositivo construído para efetuar o teste de durabilidade e térmico. Nesse dispositivo observa-se um corpo principal onde três transdutores estão fixados, sendo que, dois deles na cor beije, são os transdutores desenvolvidos, e em azul, o sensor de referência.

Figura 55 - Dispositivo construído para teste de durabilidade e térmico.



Fonte: Elaboração própria.

A presença do transdutor de referência em azul, tem como objetivo a comparação dos resultados com um transdutor já reconhecido no mercado, visto que foram submetidos às mesmas condições de teste de pressão (0 a 1MPa) temperatura (20 a 150 °C) e fadiga (10 Milhões de ciclos contínuos de 0 a 1MPa).

5.3.2 Bancada de teste de durabilidade e térmico

Na Figura 34 observa-se o dispositivo de teste, constituído de um regulador de pressão 0 a 12 bar, uma eletroválvula pneumática SMC 3vias x 2 posições, 24Vcc, para controle de liga desliga da pressão, um circuito eletrônico, constituído por um

NE555, configurado como oscilador astável, com tempo de 0,65 ligado e 0,35 desligado, com saída a rele para acionamento do solenoide da eletroválvula pneumática, fonte chaveada 85 à 250Vca, saída 24 Vcc, 500mA, dispositivo de fixação dos transdutores e sistema de aquisição de dados para leitura da tensão de saída dos transdutores no decorrer do teste de durabilidade.

5.3.3 Resposta Pressão por Tensão de saída

No gráfico 5 observa-se a curva de resposta obtida dos dois transdutores testados, em vermelho o transdutor de referência (Tr) e, em azul o transdutor desenvolvido (Td), em que as duas respostas são lineares como esperado.

Nota-se uma diferença de ganho entre os transdutores, havendo um ganho de 16,81 no transdutor de referência e um ganho de 11,79 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, processo de sinterização, como discutido anteriormente.

Apesar do protótipo apresentar um ganho menor em relação ao transdutor de referência, essa diferença pode ser minimizada, com um novo layout ajustando a posição dos piezoresistores R3 e R7 e, 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 que para o transdutor de referência seria preciso um ganho de 267,69, o que pode ser facilmente obtido com um amplificador para instrumentação de mercado.

Sendo: G_{td} = Ganho do transdutor desenvolvido;

$$G_{td} = 4500 \text{ mV}/11,79, \text{ mV};$$

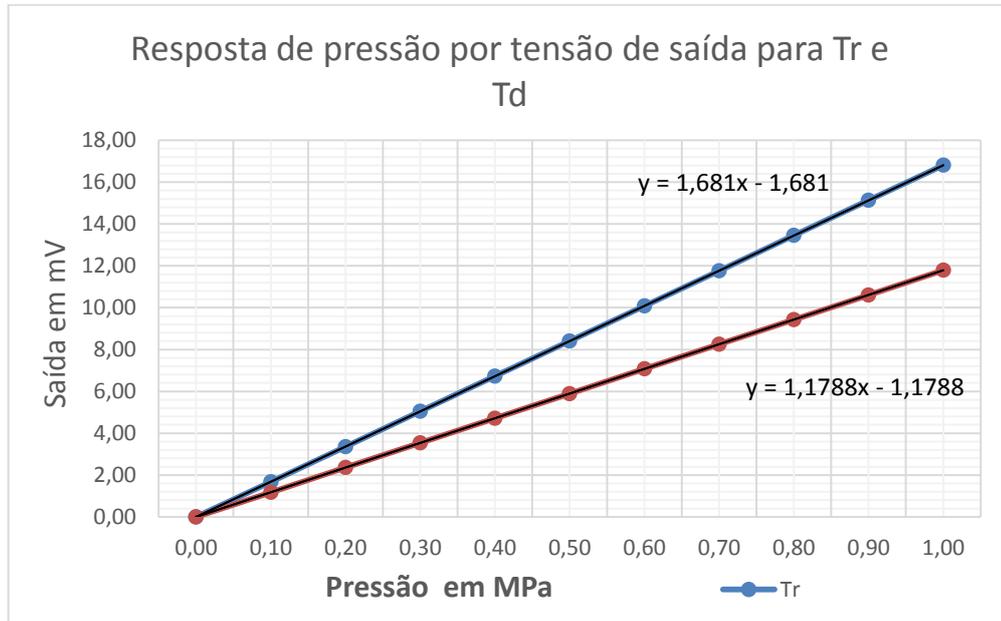
$$G_{td} = 381,68$$

Sendo: G_{tr} = Ganho do transdutor de referência;

$$G_{tr} = 4500 \text{ mV}/16,81 \text{ mV};$$

$$G_{tr} = 267,69$$

Gráfico 5 - Resposta do transdutor de referência (Tr) e transdutor desenvolvido (Td)



Fonte: Elaboração própria.

5.3.4 Resposta do transdutor a temperatura de 26,5 a 150°C.

Com base nos dados obtidos na tabela 5, observa-se que há linearidade da resposta de pressão por tensão de saída do transdutor, mesmo sob diferentes temperaturas. Conforme esperado, nota-se um deslocamento da tensão de offset proporcional à temperatura, conforme gráfico 6.

Tabela 5 – Resposta do transdutor a temperatura de 26,5 a 150°C.

P (Mpa)	Temperatura em °C									ΔmV
	26,5	40	60	80	100	110	130	140	150	
0,0	0,0	-0,5	-2,0	-3,0	-3,8	-4,4	-5,7	-6,1	-6,6	-6,6
0,1	1,2	0,7	-0,0	-2,0	-2,7	-3,3	-4,5	-4,9	-5,5	-6,7
0,2	2,4	1,9	0,8	-0,0	-1,5	-2,2	-3,4	-3,8	-4,4	-6,7
0,3	3,5	3,0	2,0	0,8	-0,4	-1,0	-2,2	-2,7	-3,3	-6,8
0,4	4,7	4,2	3,2	1,9	0,8	0,1	-1,1	-1,6	-2,1	-6,8
0,5	5,9	5,4	4,3	3,1	1,9	1,3	0,1	-0,4	-1,0	-6,9
0,6	7,1	6,6	5,5	4,2	3,0	2,4	1,2	0,7	0,1	-7,0
0,7	8,3	7,7	6,6	5,4	4,2	3,6	2,4	1,8	1,2	-7,0
0,8	9,4	8,9	7,8	6,5	5,3	4,7	3,5	2,9	2,3	-7,1
0,9	10,6	10,1	9,0	7,7	6,5	5,8	4,7	4,1	3,5	-7,1
1,0	11,8	11,2	10	8,8	7,6	7,0	5,8	5,2	4,6	-7,2
ΔV=	11,8	11,7	12,0	12,0	11,4	11,0	12,0	11,2	11,0	-0,6

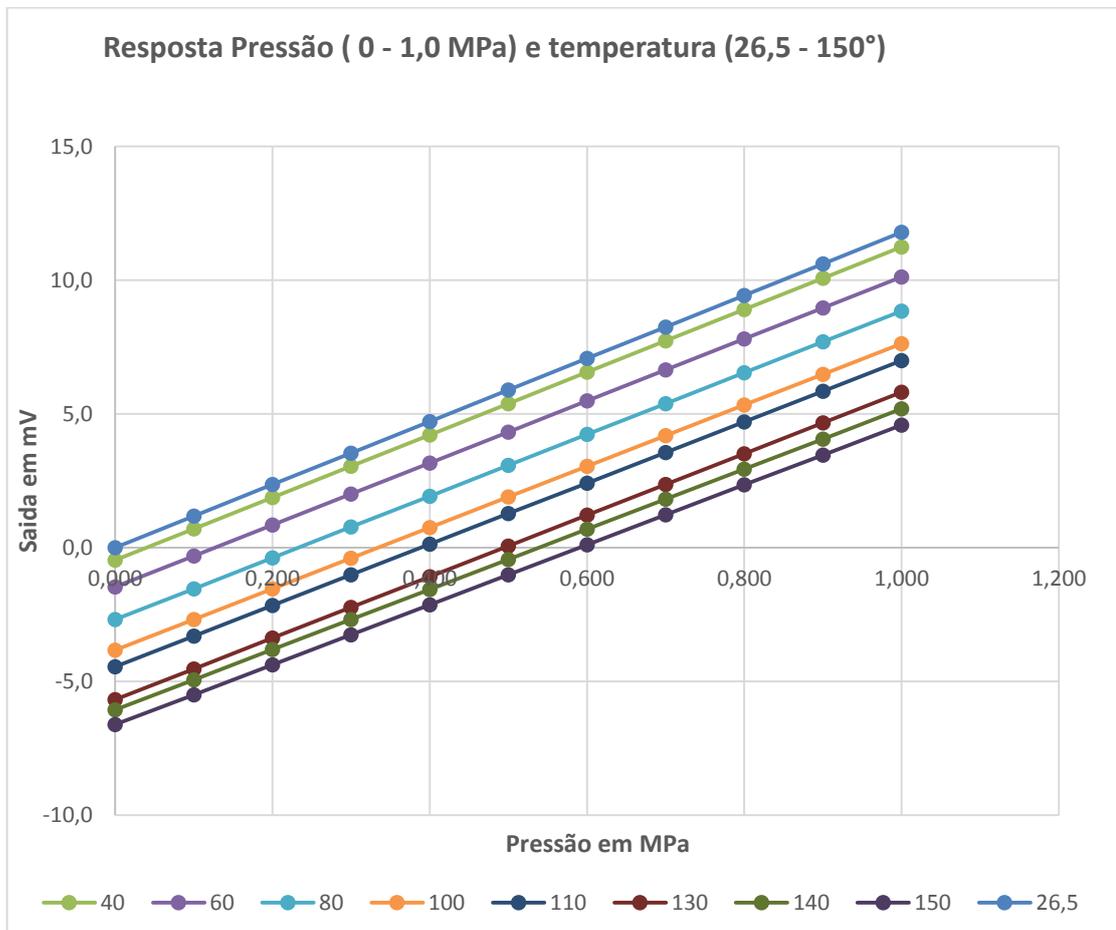
Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 5, analisando os dados obtidos à pressão de 0 MPa, de 26,5 °C à 150°C, nota-se que há um deslocamento da tensão de offset de -6,6 mV, sem que seja alterada a pressão sobre o transdutor, iniciando em zero volts em 26,5°C e ao atingir 150°C, -6,6 mV, tendo um gradiente negativo.

Essa característica é observada em toda a faixa de pressão, onde nota se uma variação de -6,6 mV à 7,2 mV e, observando o gráfico 6, nota-se que as curvas de resposta em diferentes temperaturas são paralelas e proporcionais à temperatura, indicando um comportamento linear.

Esse efeito será compensado quando for adicionado o condicionador de sinal, pela entrada de offset, em que deverá ser adicionado um NTC, com uma curva que atenda essa aplicação. O NTC é um resistor com coeficiente térmico resistivo negativo, ou seja, quanto aumenta a temperatura sua resistência diminui, este elemento sensor pode ser construído com a própria pasta de RuO₂, utilizada neste projeto.

Gráfico 6 - Resposta do transdutor à variação de temperatura.



Fonte: Elaboração própria

5.3.5 Condição de teste de durabilidade

O teste de durabilidade iniciou-se em 24 de junho do ano de 2015, tendo seu dispositivo ajustado conforme descrito a seguir:

Frequência de teste de 1Hz, tempo relativo de 0,65s desligado e 0,35 s ligado, com 86400 ciclos de teste por dia, a uma pressão de 1,0 MPa, tendo finalizado o teste em 28 do novembro de 2015 e atingido 10 022 400 ciclos.

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. Na Tabela 6 observa-se as condições de teste de durabilidade.

Tabela 6 - Condições de teste de durabilidade.

Início 24/06/2015	Horário	F	Tempo- relativo	Ciclos/Dia	Regime	Pressão	Término 28/10/2015
24/06/2015	15:10	1Hz	65%-35%	86400	24 horas	1,0MPa	No. de Ciclos 10.022.400

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 - Dados obtidos durante o teste de durabilidade.

Pressão Mpa	Número de ciclos						Média - Desvio	
	0,1M	0,2M	0,5M	1M	5M	10M	Média	s
0	-0,01	-0,15	0,06	-0,10	0,03	-0,05	-0,04	0,078
0,1	1,17	1,03	1,23	1,08	1,21	1,13	1,14	0,078
0,2	2,35	2,21	2,41	2,26	2,39	2,31	2,32	0,078
0,3	3,52	3,38	3,59	3,43	3,57	3,48	3,50	0,078
0,4	4,70	4,56	4,77	4,61	4,74	4,66	4,67	0,078
0,5	5,88	5,74	5,94	5,79	5,92	5,84	5,85	0,079
0,6	7,06	6,92	7,12	6,97	7,10	7,02	7,03	0,079
0,7	8,24	8,09	8,3	8,15	8,28	8,20	8,21	0,079
0,8	9,42	9,27	9,48	9,33	9,46	9,37	9,39	0,079
0,9	10,59	10,45	10,65	10,5	10,64	10,55	10,56	0,079
1,0	11,77	11,63	11,83	11,68	11,82	11,73	11,74	0,079

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 7, foi utilizado as funções MÉDIA e DESVPAD.A (s) do Software Excel para determinar a média e o desvio padrão da média dos valores obtidos. O desvio padrão é a medida do grau de dispersão em relação à média dos valores. Nota-se que esse valor é constante para toda a faixa de pressão, independentemente do número de ciclos de durabilidade, assim o erro tende a ser maior para baixa pressão

e menor em pressões maiores. Na pressão de operação desta aplicação 0,7MPa, há um desvio da média de $\pm 0,078$ que representa um erro de $\pm 0,96\%$ da tensão de saída do transdutor, atendendo à aplicação como sensor de pressão de óleo automotiva.

6 CONCLUSÃO

A modelagem matemática utilizada para a definição do layout dos sensores de RuO_2 foi importante no desenvolvimento do transdutor, uma vez que essa modelagem permitiu posicionar exatamente os elementos sensores sobre a placa de alumina. Isso agilizou todo o processo de desenvolvimento do produto final.

Utilizando-se o software CAD projetou-se o layout do transdutor definindo todas as posições dos elementos sensores ativos e de ajuste. Esse layout foi transferido para uma tela de silkscreen.

A pasta de AgPd, demonstrou ser uma boa alternativa à pasta de Au na produção de transdutores de pressão, visto que, além de apresentar as mesmas características, tais como fácil manipulação e a mesma resolução que a pasta de ouro, o AgPd tem 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.

A pasta de AgPd, mesmo após ser submetida a um intenso teste de fadiga de 1 Hz, 10 milhões de ciclos, não apresentou nenhum indicio 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 RuO_2 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.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para aplicação no mercado automotivo, embora tenha obtido um resultado promissor no teste de resposta a variação de temperatura de até 150°C, ainda deverá ser realizado o teste de durabilidade, para avaliação da resistência à fadiga sobre condição de temperatura extrema de 150°C, necessário para aplicações automotivas.

REFERÊNCIAS

- AGNEW, Jeremy. **Thick Film Technology, Fundamentals and Applications in microelectronics**. New Jersey, Hayden Books Company, 1978.
- CALLISTER, Willian D. **Materials Science and Engineering an Introduction**. John Wiley & Sons, Inc., 8 edition, MA, USA, 2009.
- DOEBELIN, O. Ernest. **Measurement Systems: Application and Design**. New York, McGRAW-HILL, 1976.
- GLOBAL Pressure Sensors Market to Reach US\$9.36 Billion in 2020: Transparency Market Research. 2015. Disponível em: <
<http://www.businesswire.com/news/home/20150210005629/en/Global-Pressure-Sensors-Market-Reach-US9.36-Billion>>. Acesso em: 04 agosto. 2015.
- HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, **Física II**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978.
- HARPER, Charles A. **Handbook of thick film hybrid microelectronics**. São Paulo, McGROW-HILL, 1974.
- JONES, D. Roydn. **Hybrid Circuit Design and Manufacture**. New York, Marcel Dekker, 1986.
- KIM, Dongsun; HWANG, Seongjin. **Effect of the thermal properties of frits on the electrical properties of screen-printed silicon solar cells**. Incheon, Journal of Korean Physical Society v. 55, p. 1046, 2009.
- KOSLOFF, Albert M. A. **Screen Printing Techniques**. Ohio, The Signs of the Times, 1981.
- MALY, W. **Atlas of IC Technologies**. New York, The Benjamin Cummings, 1987.
- MARTINO, J. Antonio. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2004.
- MORTON, L. T. **Thick Film Microelectronics. Fabrication, Design, and Applications**. New York, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, 1971.
- PRUDENZIATI, M. **HANDBOOK OF SENSOR AND ACTUATORS 1. Thick Film Sensors**. Amsterdam, ELSEVIER, 1994.
- TAYLOR, R. F., SCHULTZ, J. S. **Handbook of Chemical and Biological Sensors**. New York, IOP Publishing, 1996.

TSENG, Yen-Chang. **Manufacturing process analysis of Ag/Pd thick film conductor circuits.** Pennsylvania, Herigh University Science Master Thesis, 1995.

TIMOSHENKO, S. WOINOWSKY, Krieger. **Theory of Plates and Shells.** New York, McGRAW-HILL, 1987.

WATSON, Robert B. Influence of grid geometry on the output of strain-gage-based diaphragm pressure transducers. In: OPTICAL METHODS IN COMPOSITES; PROCEEDINGS OF THE SEM FALL CONFERENCE ON EXPERIMENTAL MECHSNICS, Nov. 2-5, 1986(Keystone). Bethel, CT, Society for Experimental Mechanics, 1986, p. 68-77.