

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

RICARDO DOS SANTOS PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE PRESSÃO PARA
APLICAÇÃO INDUSTRIAL

SÃO LEOPOLDO

2020

Ricardo dos Santos Pereira

**Desenvolvimento de Sensor de Pressão para Aplicação
Industrial**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cima

São Leopoldo

2020

Ricardo dos Santos Pereira

Desenvolvimento de Sensor de Pressão para Aplicação Industrial

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Aprovado em 24 de Março de 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira –
Unisinos
Avaliador

Prof. Dr. Henri Ivanov Boudinov – UFRGS
Avaliador Externo

Prof. Dr. Carlos Alberto Cima (Orientador)

Visto e permitida a impressão
São Leopoldo

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o esforço, empenho e dedicação necessários para completar essa jornada ao longo de dois anos. É por esse motivo que não posso deixar de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus pais por todo apoio, que sempre fizeram o esforço necessário para me proporcionar a melhor educação possível.

Agradeço à minha namorada Ana Paula, que sempre me apoiou e me incentivou a realizar este trabalho e também teve a compreensão e paciência durante esse período.

Agradeço ao meu orientador, Carlos Alberto Cima, que sempre demonstrou disposição e engajamento, colaborando com ideias, experiências e ensinamentos importantes para o projeto.

Agradeço aos professores do programa de pós-graduação, em especial ao Celso Peter e Willyan Hasenkamp, que contribuíram e motivaram a realização do projeto.

Agradeço ao IttChip e à Unisinos pela oportunidade de realizar o mestrado e que, juntamente com todos os seus funcionários, proporcionaram recursos e um extraordinário ambiente para desenvolvimento do trabalho. Sem dúvida, as experiências e o convívio com as pessoas presentes no instituto me fizeram crescer não só profissionalmente, mas também de forma pessoal.

RESUMO

O presente trabalho apresenta as tecnologias de sensores piezoresistivos empregados na medição de pressão. Os sensores de pressão são utilizados em uma vasta gama de aplicações, dentre as quais a área industrial possui uma importante parcela do mercado. O trabalho aborda a história dos sensores de pressão e também o conhecimento necessário para realizar o projeto de um sensor de pressão piezoresistivo para uso industrial. Uma importante análise a ser realizada é a de deformação mecânica do elemento elástico do sensor. São elencadas as informações necessárias para realizar tal projeto, juntamente com os detalhes e considerações que devem ser observados durante o seu desenvolvimento. Também é apresentado o princípio de funcionamento dos sensores piezoresistivos, que é um elemento fundamental no entendimento do sensor proposto. O elemento piezoresistor de deformação utilizado no desenvolvimento do projeto possui um destaque, por ser um piezoresistor em silício, cujo projeto e manufatura foi totalmente desenvolvido nacionalmente. O trabalho descreve as etapas e a metodologia utilizada no projeto, construção e escolhas dos materiais utilizados no sensor de pressão. O projeto do sensor de pressão foi testado e validado através de simulação no *software* COMSOL. Após a construção de protótipos do sensor de pressão, eles foram caracterizados. Foram projetados, fabricados e testados dois diferentes processos de conexão elétrica que podem ser empregados para realizar a conexão elétrica dos elementos piezoresistores: solda de fios e adesivos condutivos. Os sensores de pressão fabricados por meio da solda de fios mostraram melhor desempenho e menor dependência com relação à variação de temperatura de operação. Também foi proposto e implementado um método de compensação térmica da resposta do sensor, no qual obteve-se uma redução significativa no erro do sensor. O sensor sem compensação térmica possui um erro 5,5 vezes superior ao sensor que possui o método de compensação térmica proposto.

Palavras-chaves: Sensor de Pressão. Piezoresistor. Análise de Deformação.

ABSTRACT

This work presents the piezoresistive sensor technologies used in pressure measurement. Pressure sensors are used in a wide range of applications, among which the industrial area has an important market share. The work covers the history of pressure sensors and also the knowledge necessary to carry out the design of a piezoresistive pressure sensor for industrial use. The analysis of the mechanical deformation of the elastic element of the sensor is a very important part of its design. The information and details needed to design the pressure sensor are listed. The work presents some design considerations that must be observed during its development. The operating principle of piezoresistive sensors is also presented, which is a fundamental element for understanding the proposed sensor. The deformation piezoresistor element used in the development of the project is highlighted. It is a silicon piezoresistor, whose design and manufacture has been fully developed nationally. The work describes the methodology used in the design, construction and how the materials used in the pressure sensor were chosen. The design of the pressure sensor was tested and validated through simulation in the COMSOL software. After the construction of prototypes of the pressure sensor, they were characterized. Two different electrical connection processes for the piezoresistor elements were designed, manufactured and tested: wire bonding and conductive adhesives. Pressure sensors manufactured by wire bonding presents better performance and less dependence on operating temperature variation. A method for the sensor thermal compensation was proposed and implemented. A significant reduction in sensor error was thus obtained. The sensor without thermal compensation has an error 5.5 times greater than the sensor that has the proposed thermal compensation method.

Key-words: Pressure Sensor. Piezoresistor. Displacement Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão de mercado de sensores de pressão piezoresistivos, de acordo com sua aplicação final	21
Figura 2 – Evolução dos sensores de pressão MEMS	23
Figura 3 – Formato típico de um sensor de deformação piezoresistivo uniaxial.	24
Figura 4 – Deformação de um fio sob tração.	25
Figura 5 – Curva tensão-deformação para materiais dúcteis.	26
Figura 6 – Resistividade do silício em função da temperatura para diferentes concentrações de dopantes com Fósforo (linha contínua) e Boro (linha pontilhada)	33
Figura 7 – Valor do coeficiente de piezoresistência para silício tipo-n em função da concentração de dopantes e da temperatura	34
Figura 8 – Circuito da Ponte de Wheatstone.	36
Figura 9 – Configurações de ponte de Wheatstone. (1) 1/4 de ponte (2) meia ponte (3) ponte completa	38
Figura 10 – Dependência da resistência da ponte e da sensibilidade do sensor com a temperatura	39
Figura 11 – Circuito da Ponte de Wheatstone com resistor de compensação.	40
Figura 12 – Curva típica de histerese	43
Figura 13 – Seção transversal da membrana contendo as forças envolvidas	46
Figura 14 – Etapas de transdução de um sensor de pressão piezoresistivo	47
Figura 15 – Média de distribuição das tensões sobre a área ativa do sensor piezoresistivo.	48
Figura 16 – Estrutura do sensor proposto por Ham et al. (2015)	51
Figura 17 – Estrutura da membrana do sensor proposto por Ham et al. (2015)	52
Figura 18 – Descrição das camadas do sensor proposto por Stoetzler et al. (2007)	53
Figura 19 – Descrição das etapas de fabricação de um sensor de pressão MEMS típico	54
Figura 20 – Proposta de membrana desenvolvida por Tran, Zhang e Zhu (2018)	55
Figura 21 – Propostas de conexão elétrica dos piezoresistores	57
Figura 22 – Distorção da camada de adesivo	58
Figura 23 – Sensor piezoresistivo a ser utilizado no trabalho	62
Figura 24 – Experimento para verificação da variação da resistência para diferentes deformações	63
Figura 25 – Variação da resistência do piezoresistor para diferentes forças de deformação	64
Figura 26 – Variação da resistência em função da temperatura	64
Figura 27 – Fluxograma da metodologia proposta para o desenvolvimento do sensor de pressão	65
Figura 28 – Lâmina de deformação contendo os elementos piezoresistores fixados e conectados	70

Figura 29 – Arranjo elaborado para teste dos adesivos de fixação	71
Figura 30 – Membrana de deformação após o seu processo de fabricação	72
Figura 31 – Fluxograma das etapas de montagem do sensor de pressão	73
Figura 32 – Membrana contendo os elementos piezoresistivos de deformação já conecta- dos eletricamente à placa de circuito interno	74
Figura 33 – <i>Layout</i> da placa flexível	75
Figura 34 – Terminal do piezoresistor contendo <i>stud bump</i>	76
Figura 35 – Placa flexível para conexão dos piezoresistores e placa flexível já fixada à membrana de deformação	76
Figura 36 – Componentes que constituem o sensor	77
Figura 37 – Arranjo e instrumentos utilizados no processo de medição e teste do transdutor	78
Figura 38 – Tela do programa em LabView para aquisição das medições	79
Figura 39 – Equipamentos e estrutura montada para realizar os testes das amostras de sensor de pressão	79
Figura 40 – Processo para medição da resposta do sensor de pressão	80
Figura 41 – Esquema de variáveis para compensação térmica	81
Figura 42 – Membrana construída no <i>software</i> COMSOL	83
Figura 43 – Tensão equivalente de <i>von Mises</i> (N/m^2) na superfície da membrana	84
Figura 44 – Corte da tensão equivalente de <i>von Mises</i> (N/m^2) na superfície da membrana	85
Figura 45 – Corte da deformação mecânica na superfície da membrana	86
Figura 46 – Corte da deformação do diafragma em diferentes temperaturas na superfície da membrana	86
Figura 47 – Corte da tensão equivalente de <i>von Mises</i> do diafragma em diferentes tempe- raturas na superfície da membrana	87
Figura 48 – Comparação dos resultados simulados e práticos do piezoresistor, quando submetidos a diferentes forças de deformação	88
Figura 49 – Comparação dos resultados simulados e práticos do piezoresistor, quando submetidos a diferentes temperaturas	89
Figura 50 – Tensão de deformação ao longo da membrana	90
Figura 51 – Primeiro Tensor de Piola-Kirchoff	91
Figura 52 – Posições estudadas dos sensores semicondutores sobre a membrana	91
Figura 53 – Resposta do sensor para cada uma das posições propostas.	92
Figura 54 – Não-linearidade da resposta do sensor para cada uma das posições propostas.	93
Figura 55 – Sinal de saída do sensor para diferentes pressões e diferentes temperaturas. .	94
Figura 56 – Deformação causada pela dilatação térmica.	95
Figura 57 – Condutividade dos piezoresistores durante dilatação térmica.	96
Figura 58 – Condutividade dos piezoresistores durante dilatação térmica, quando deslo- cados do centro.	96

Figura 59 – Resposta do sensor para diferentes pressões e temperaturas após ajuste na posição dos piezoresistores.	97
Figura 60 – Resposta do sensor para diferentes pressões para a disposição original e a alterada em função da variação de <i>offset</i>	98
Figura 61 – Resposta do sensor com um piezoresistor com dopagem 2 % inferior aos demais	99
Figura 62 – Temperatura ao longo da superfície da membrana e dos piezoresistores.	100
Figura 63 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos	101
Figura 64 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos após <i>burn in</i>	102
Figura 65 – Comparativo da resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos antes e após <i>burn in</i>	103
Figura 66 – Medida de resistência dos piezoresistores durante o teste de <i>creep</i> com diferentes adesivos	104
Figura 67 – Afastamento dos piezoresistores centrais em protótipo	105
Figura 68 – Sinal de <i>offset</i> do sensor de pressão para diferentes temperaturas para o sensor sem e com afastamento dos piezoresistores centrais.	106
Figura 69 – Tensão da ponte durante mudança de temperatura de 0 para 25 °C	107
Figura 70 – Contato entre piezoresistor e placa flexível sem <i>stud bump</i> (zoom 10X)	108
Figura 71 – Contato entre piezoresistor e placa flexível sem <i>stud bump</i> (zoom 50X)	108
Figura 72 – Contato entre piezoresistor e placa flexível com <i>stud bump</i> (zoom 10X)	109
Figura 73 – Contato entre piezoresistor e placa flexível com <i>stud bump</i> (zoom 50X)	110
Figura 74 – Tensão de <i>offset</i> de cada sensor	111
Figura 75 – Tensão de <i>offset</i> para as duas configurações de sensor	112
Figura 76 – Tensão da ponte em cada sensor	113
Figura 77 – Tensão de alimentação da ponte em função da temperatura de trabalho para cada configurações de sensor	114
Figura 78 – Tensão de saída do sensor com solda de fios em função da pressão, para diferentes temperaturas	115
Figura 79 – Tensão de saída do sensor com adesivo condutivo em função da pressão, para diferentes temperaturas	115
Figura 80 – Sensibilidade do sensor de pressão para diferentes temperaturas	116
Figura 81 – Histerese dos sensores de pressão em diferentes temperaturas	117
Figura 82 – Não linearidade dos sensores de pressão em diferentes temperaturas	117
Figura 83 – Equação de primeira ordem que caracteriza a resposta do sensor sem compensação de temperatura.	119
Figura 84 – Erro de medição para cada temperatura entre a medida de referência e resultante da equação que não possui compensação térmica	120

Figura 85 – Tensão de alimentação da ponte para as diferentes temperaturas testadas . . .	120
Figura 86 – Temperatura de trabalho do sensor definida pela tensão da ponte	121
Figura 87 – Dados de medição de pressão e temperatura do sensor	122
Figura 88 – Dados de medição de pressão e temperatura do sensor	123
Figura 89 – Erro entre a medida de referência e o plano de resposta do sensor de pressão com compensação térmica	124
Figura 90 – Resposta do sensor Motorola MPX100	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das atividades a serem desenvolvidas	66
Tabela 2 – Modelos para compensação térmica	82
Tabela 3 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos	101
Tabela 4 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos após <i>burn in</i>	102
Tabela 5 – <i>Creeping</i> dos adesivos analisados	104
Tabela 6 – Análise dos resultados de cada modelo avaliado	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACA	<i>Anisotropic Conductive Adhesive</i>
ICA	<i>Isotropic Conductive Adhesive</i>
LPCVD	<i>Low Pressure Chemical Vapor Deposition</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
MTF	<i>Metal Thin Film</i>
NL	Não Linearidade
TCGF	<i>Temperature Coefficient of Gage Factor</i>
TC0	<i>Temperature Coefficient of Offset</i>
TCR	<i>Temperature Coefficient of Resistance</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força
l	Comprimento
d	Diâmetro
ε	Deformação
σ	Tensão
E	Módulo de Young
ν	Coefficiente de Poisson
ε_L	Deformação Lateral
R	Resistência Elétrica
V	Tensão Elétrica
A	Área
ρ	Resistividade
Π_L	Coefficiente de Piezoresistividade Longitudinal
T	Temperatura
GF	Fator Gage
S_a	Sensibilidade do Sensor na Direção Axial
S_t	Sensibilidade do Sensor na Direção Transversal
S_{Cis}	Sensibilidade do Sensor ao Cisalhamento
ε_a	Deformação na Direção Axial
ε_t	Deformação na Direção Transversal
γ_{at}	Deformação de Cisalhamento nas Direções a e t
q	Pressão
h	Espessura do Diafragma
a	Raio do Diafragma

φ	Inclinação da Deformação da Membrana
w	Deslocamento da Membrana
Pil	Coefficiente de Piezoresistividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Sensores de pressão	20
2.2	Sensores de Pressão Piezoresistivos	21
2.3	Sensores de Deformação Piezoresistivos	23
2.3.1	Deformação Mecânica	25
2.3.2	Efeito Piezoresistivo	27
2.3.3	Fator <i>Gage</i>	29
2.3.4	Influência da Temperatura	30
2.3.5	Fator de Sensibilidade Transversal	35
2.4	Ponte de Wheatstone	35
2.4.1	Avaliação dos sinais de medida	41
2.5	Deformação de Membranas Finas	44
2.6	Considerações de Projeto	46
2.7	Trabalhos Correlacionados	50
3	MATERIAIS, FERRAMENTAS E MÉTODOS	56
3.1	Proposta de pesquisa	56
3.1.1	Fixação dos Sensores de Deformação	57
3.1.2	Conexão Elétrica	60
3.1.2.1	<i>Adesivos Condutivos</i>	60
3.2	Sensor Piezoresistivo de Deformação	61
3.3	Metodologia	65
3.3.1	Projeto Mecânico da Membrana de Deformação	66
3.3.2	Simulação com <i>Software</i> COMSOL	67
3.3.3	Procedimentos e Análise Experimental	68
3.3.3.1	<i>Processo de fixação dos piezoresistores</i>	68
3.3.3.2	<i>Avaliação dos Adesivos de Fixação</i>	69
3.3.4	Montagem dos Protótipos	72
3.3.4.1	<i>Protótipo com Solda de Fios</i>	73
3.3.4.2	<i>Protótipo com Adesivo Condutivo</i>	74

3.3.5	Testes e Ensaios	77
3.3.5.1	<i>Teste de Pressão Estática</i>	77
3.3.6	Compensação Térmica	80
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	83
4.1	Resultados da Simulação	83
4.1.1	Análise de Deformação Mecânica da Membrana	83
4.1.2	Análise de Simulação do Sensor Piezoresistivo de Deformação	87
4.1.3	Análise de Posicionamento dos Sensores	89
4.1.4	Simulação do Sensor em Ponte de Wheatstone	93
4.2	Resultados Práticos Intermediários	100
4.2.1	Avaliação dos Adesivos de Fixação	100
4.2.2	Teste de <i>Creeping</i>	103
4.2.3	Avaliação Térmica	105
4.2.4	Análise da Conexão elétrica	107
4.3	Resultados dos Testes e Ensaios	110
4.3.1	Teste de Pressão Estática	110
4.3.1.1	<i>Compensação Térmica</i>	118
4.3.2	Comparação do Comportamento Térmico com Sensores Comerciais	124
5	CONCLUSÃO	127
5.1	Trabalhos futuros	128
	REFERÊNCIAS	130

1 INTRODUÇÃO

A revolução industrial do início do século XIX trouxe o desenvolvimento de novos instrumentos e técnicas de medidas elétricas e grandezas físicas para satisfazer os processos produtivos empregados pelas indústrias da época. Assim, houve um rápido crescimento das tecnologias aplicadas ao ramo industrial. Conseqüentemente, já no século XX, o avanço e o progresso da eletrônica e dos computadores possibilitou o crescimento de uma grande variedade de instrumentos de medidas e técnicas de medição. Esse foi um fator preponderante para que os sensores tivessem um papel importante na modernização das indústrias e que até os dias de hoje continuem influenciando os avanços tecnológicos.

Atualmente, a utilização de medidores vem sendo amplamente difundida no dia-a-dia da sociedade. Os avanços da tecnologia permitiram que os mais diversos sensores existentes no mercado pudessem estar ao alcance de grande parte da população. Na maioria dos casos essa relação ocorre devido a novos dispositivos que incorporam funcionalidades que só se tornaram possíveis pela presença de sensores em sua construção.

Um dos setores que demandam um grande número e variedade de sensores é o setor industrial. Essa demanda ocorre, pois eles são dispositivos essenciais para o controle de processos industriais. Esse controle, por sua vez, vem exigindo características de estabilidade e confiabilidade cada vez mais restritos, o que, conseqüentemente, demanda sensores cada vez mais precisos e confiáveis. Portanto, há uma busca contínua por novos sensores e métodos de medição, que demanda, não só instrumentos mais confiáveis e precisos, mas também menores custos produtivos.

Em aplicações industriais, a medição de pressão é uma das variáveis mais utilizadas na indústria para o controle de processos. A sua vasta utilização deve-se ao fato de ser relativamente fácil medi-la e também por ser possível, através da pressão, inferir outras variáveis de processo, tais como: nível, volume, vazão e densidade. Devido a sua grande gama de aplicações, os sensores de pressão são submetidos às mais variadas condições e ambientes de trabalho, sendo que, mesmo assim, devem ter desempenho e confiabilidade compatíveis com o processo em que estão inseridos.

1.1 Justificativa

Atualmente, vêm sendo amplamente difundidos e utilizados os mais diversos tipos de sensores em múltiplas aplicações, como, por exemplo, nas áreas médica, industrial, automobilística e aeroespacial. Como o próprio significado que a palavra traz, os sensores são dispositivos que respondem a um estímulo físico e transmitem um impulso mensurável correspondente. Tendo presente o seu potencial de aplicações, essa é uma área de estudos que é de interesse de muitos

pesquisadores. Um dos sensores mais utilizados atualmente é o sensor de pressão, podendo ser ele construído tendo como base vários princípios de medição, tais como capacitivo, piezoelétrico, piezoresistivo e ótico. Um dos motivos que fazem do sensor de pressão um dos mais conhecidos e utilizados é a grande quantidade de grandezas físicas que podem ser medidas por ele direta e indiretamente.

De acordo com o relatório da Grand View Research (2018), foi estimado que o mercado global de sensores de pressão representou um valor de U\$8 bilhões em 2017 e que poderá atingir um valor U\$11,8 bilhões no ano de 2025. O relatório também retrata que essa demanda por sensores deverá ter um crescimento substancial em função de regulamentações governamentais e da crescente utilização de sensores de pressão nas áreas médica e automotiva, de forma que os principais desafios tecnológicos são a redução do tamanho e do custo dos sensores. De todos os sensores de pressão comercializados no mundo no ano de 2017, 25,9% são piezoresistivos, constituindo a maior parcela de todo o mercado. (RESEARCH, 2018).

Apesar dos sensores de pressão destinados à aplicação industrial não serem tão representativos quanto os sensores de pressão para as áreas médica e automotiva, ela é uma área estratégica e de destaque. Segundo Research (2018), 44,8% dos sensores de pressão comercializados em 2017 foram os sensores de pressão absoluta, dentre os quais a aplicação industrial foi a que impulsionou a demanda por esses sensores. Logo, pode-se salientar a relevância de pesquisas que contribuam com o contínuo avanço tecnológico dos sensores de pressão. Ao encontro disso, explorar o processo produtivo de sensores de pressão e buscar novas alternativas para a sua construção são extremamente pertinentes. Tendo em vista o contexto e as limitações tecnológicas das empresas atuantes nesse setor produtivo no Brasil, implementar alternativas e soluções para o desenvolvimento da produção de sensores de pressão permite impulsionar a fabricação de sensores no mercado brasileiro e contribuir com a posição do país nessa área no cenário mundial. Ao encontro dessa perspectiva, o trabalho utiliza sensores de deformação piezoresistivos fabricados em lâminas de silício, cujo projeto e fabricação ocorreu totalmente no Brasil, por meio de parceria entre o instituto Itt-Chip e a empresa CEITEC-SA.

1.2 Objetivos

Com base na motivação e o contexto apresentado, este trabalho tem o seguinte objetivo geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de sensor de pressão piezoresistivo para aplicação industrial.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o projeto mecânico da membrana de deformação;

-
- Estudar e desenvolver a forma de fixação do sensor piezoresistivo à membrana de deformação;
 - Avaliar as tecnologias de encapsulamento que se baseiam na solda de fios (*wire bonding*) e adesivos condutivos;
 - Propor a conexão elétrica dos sensores piezoresistivos;
 - Desenvolver um protótipo do sensor;
 - Avaliar o desempenho do sensor;
 - Propor um método para compensação térmica do sensor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os sensores de pressão são utilizados em uma vasta gama de aplicações industriais, no controle e monitoramento de processos. Eles são utilizados não apenas na medição direta de pressão, mas também em medições indiretas de outras grandezas físicas, como vazão de um fluido, nível de líquidos e velocidade de ar em túneis de vento. Deste modo, o conhecimento relacionado à tecnologia de medição de pressão e os avanços relacionados a ela são fundamentais para a evolução dos processos de medição dos mais variados tipos de grandezas físicas.

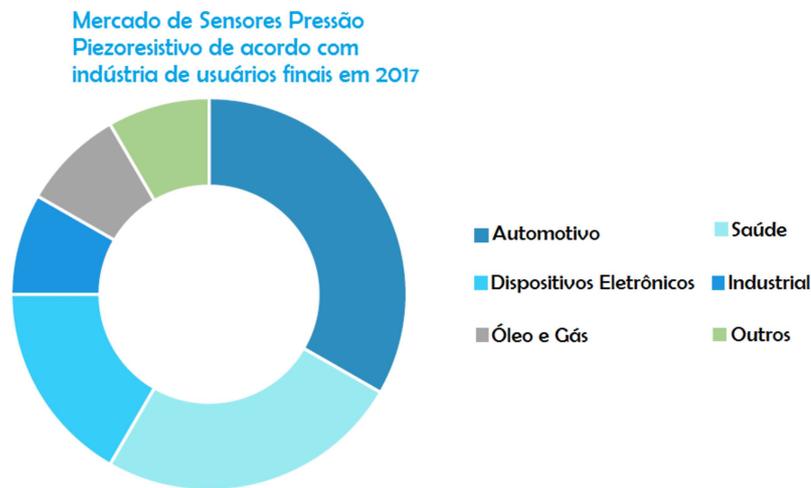
2.1 Sensores de pressão

A medição de pressão é um ponto de destaque na ciência há muitos anos. Um dos primeiros casos que se tem registro da utilização de instrumentos para realização de medidas de pressão ocorreu em 1643 pelo físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647). Torricelli desenvolveu um dispositivo conhecido por barômetro de mercúrio, instrumento pelo qual é possível avaliar a pressão atmosférica, ou seja, o peso do ar sobre a superfície da terra. (CASSIOLATO, 2008). O dispositivo foi construído preenchendo um tubo de um metro de comprimento com mercúrio, selando um dos lados e colocando-o verticalmente em um recipiente contendo mercúrio. Invariavelmente, a coluna de mercúrio desce até a marca de 760 milímetros. Torricelli atribuiu esse fenômeno a uma força vinda da superfície terrestre, a pressão atmosférica.

Os sensores de pressão podem ser classificados de acordo com o princípio de conversão mecânica da pressão aplicada, que geralmente ocorre por meio do deslocamento de um diafragma, em um sinal elétrico proporcional. Segundo Cassiolato (2008), o método mais utilizado para a conversão do deslocamento do diafragma em um sinal mensurável é através da captura da deformação elástica induzida sobre a superfície do diafragma. No entanto, existem muitos métodos que podem ser empregados para realizar a medição de pressão. Dentre as mais relevantes destacam-se os seguintes: Capacitância Variável, Piezoresistivo, Potenciométrico, Piezoelétrico, Relutância variável, Ressonante e ótico.

Segundo Markets e Research (2018), os sensores de pressão piezoresistivos vêm sendo muito bem aceitos no mercado em função do seu baixo custo se comparado com as demais tecnologias. Atualmente, a maior parte dos sensores de pressão piezoresistivos é destinada às áreas automotiva e da saúde. A área industrial também possui uma parcela relevante de mercado, visto que a grande maioria dos processos industriais envolve medições de pressão, já que a pressão é uma grandeza básica para a medição e controle de vazão, nível e densidade. A figura 1 apresenta a divisão de mercado de sensores de pressão piezoresistivos, de acordo com sua aplicação final.

Figura 1 – Divisão de mercado de sensores de pressão piezoresistivos, de acordo com sua aplicação final



Fonte: Markets e Research (2018)

Segundo Markets e Research (2018), o mercado mundial de sensores de pressão piezoresistivos em 2017 foi de U\$446,6 milhões e tem como previsão atingir U\$711,8 milhões até 2023. Este crescimento se dará principalmente devido ao seu crescente uso nas áreas automobilísticas, de saúde e também pela expansão da tecnologia de internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*).

Como o presente trabalho tem por objetivo estudar o uso de dispositivos piezoresistivos para realizar a medição de pressão, mais especificamente, sensores piezoresistivos com base em semicondutor de silício, não serão abordadas as demais tecnologias de medição citadas.

2.2 Sensores de Pressão Piezoresistivos

Segundo Omega Engineering Inc. (1998) o primeiro sensor de pressão a utilizar o efeito da piezoresistividade como princípio de medição foi desenvolvido no final dos anos de 1930. Esse instrumento consistia de um fio metálico fixado em uma estrutura que sofria uma tensão proporcional à pressão nele aplicada. No entanto, esse dispositivo era instável e não mantinha a sua calibração. A partir desse primeiro dispositivo, o sensor de pressão piezoresistivo evoluiu, primeiramente, aos sensores que utilizavam elementos piezoresistivos fixados diretamente a um diafragma, que funcionava como elemento elástico para deformação. Já os sensores mais recentes utilizam estruturas eletromecânicas fabricadas em silício. (Åsmund Sandvand, 2017). Segundo Barlian et al. (2009), os sensores de pressão piezoresistivos são um dos dispositivos eletromecânicos mais desenvolvidos e reportados nos estudos atuais.

Após o descobrimento do efeito piezoresistivo em materiais semicondutores por C.S.Smith

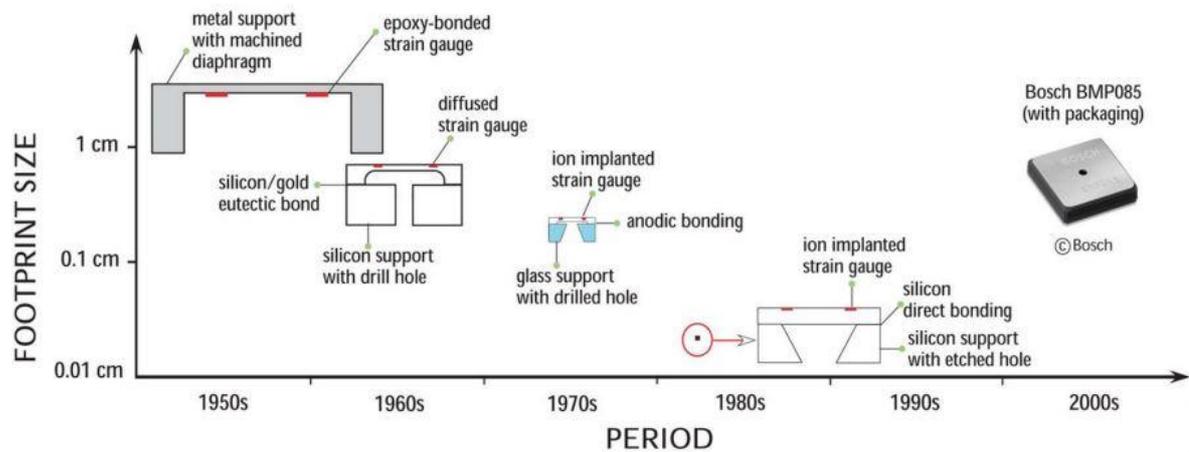
em 1954, sensores de pressão piezoresistivos em silício foram amplamente produzidos, principalmente após a década de 1970. (Kulite Semiconductor, 2009). Barlian et al. (2009) relata que Kulite-Bytrex e Microsystems introduziram comercialmente os sensores de pressão em diafragma de metal e piezoresistores em silício no final da década de 1950. Esse tipo de sensor era fabricado fixando os piezoresistores sobre a membrana metálica através de adesivo epóxi. Na época, os sensores fabricados com essa tecnologia eram considerados de alto custo e baixa escala de produção e destinados principalmente para aplicações aeroespaciais e biomédicas.

Tufte, Chapman e Long (1962) apresentaram o primeiro sensor de pressão com elementos piezoresistores integrados em um diafragma fabricado de silício. Essa técnica consistia basicamente em difundir um elemento dopante sobre a membrana de silício criando os piezoresistores. O grande benefício desse processo é que ele elimina o uso de adesivos epóxi para fixar os piezoresistores na membrana. Além disso, o processo substitui o diafragma de metal pelo de silício cristalino, que traz ganhos significativos no desempenho do sensor.

A técnica de microusinagem em silício passou a ser empregada em dispositivos eletromecânicos trazendo benefícios para a indústria de circuitos integrados, passando a capturar grande parte do mercado de sensores. Esses dispositivos, conhecidos como MEMS (do inglês MicroElectroMechanical Systems), são objetos de pesquisas em diversas áreas, com uma grande gama de aplicações, tais como, impressão por jato de tinta, acelerômetros para navegação e biossensores. Na área industrial, essa tecnologia de dispositivos também está em crescente expansão, impulsionadas pela aplicação automotiva. Pfann e Thurston (1961) foram os primeiros a trabalharem com MEMS, desenvolvendo um sensor de pressão piezoresistivos. O sensor foi projetado utilizando quatro elementos piezoresistivos difundidos sobre o silício, formando uma ponte de Wheatstone.

Desde os anos de 1980, diversas melhorias nas tecnologias de fabricação de sensores de pressão baseados em MEMS foram implantadas. Avanços nas áreas de corrosão, fotolitografia, difusão e deposição de filmes finos contribuíram para a redução do tamanho dos sensores e aumento da sensibilidade e desempenho. A figura 2 mostra a evolução dos sensores de pressão baseados na tecnologia de MEMS. Atualmente, o projeto e o processo de manufatura dos sensores de pressão que utilizam a tecnologia de MEMS atingiram um alto grau de sofisticação. Barlian et al. (2009). Um exemplo é o projeto de sensor de pressão piezoresistivo desenvolvido pela BOSCH, que utiliza silício poroso em sua membrana.

Figura 2 – Evolução dos sensores de pressão MEMS



Fonte: Barlian et al. (2009)

Em 1971, Leasure, Woodruff e Gravel (1971) publicou um estudo referente a uma técnica de fixação de sensores semicondutores piezoresistivos de deformação que utilizava um material composto de vidro para a construção de transdutores de pressão. Pode-se notar que, desde o início da implementação de sensores piezoresistivos semicondutores, a fixação do sensor ao diafragma sempre foi uma preocupação. Até então utilizavam-se adesivos com base em epóxi. No entanto, em aplicações nas quais os sensores necessitavam trabalhar em temperaturas elevadas, ou então em níveis de ultra-alto vácuo, esses adesivos apresentavam problemas, como por exemplo, degaseificar quando em vácuo elevado. Segundo o estudo, a utilização de um material contendo vidro com ponto de fusão em baixa temperatura tornou possível minimizar o efeito de degaseificar o adesivo. Além disso, as propriedades mecânicas da fixação do sensor apresentaram um desempenho melhor que os adesivos com base epóxi da época. Também é possível destacar que a faixa de temperatura de trabalho é maior do que os adesivos epóxi.

2.3 Sensores de Deformação Piezoresistivos

Os sensores piezoresistivos são construídos com base em um material cuja resistência elétrica sofre alterações de acordo com a deformação por ele sofrida. Segundo Hoffmann (2012), o termo deformação é utilizado para descrever um alongamento de um determinado material, podendo ele ser tanto positivo, no caso de uma tensão, quanto negativo, no caso de uma compressão. De forma que esse alongamento pode ser causado por dois fatores. O primeiro deles ocorre em função de uma força submetida ao material que o deforma, já a segunda se deve ao efeito da temperatura sobre o material.

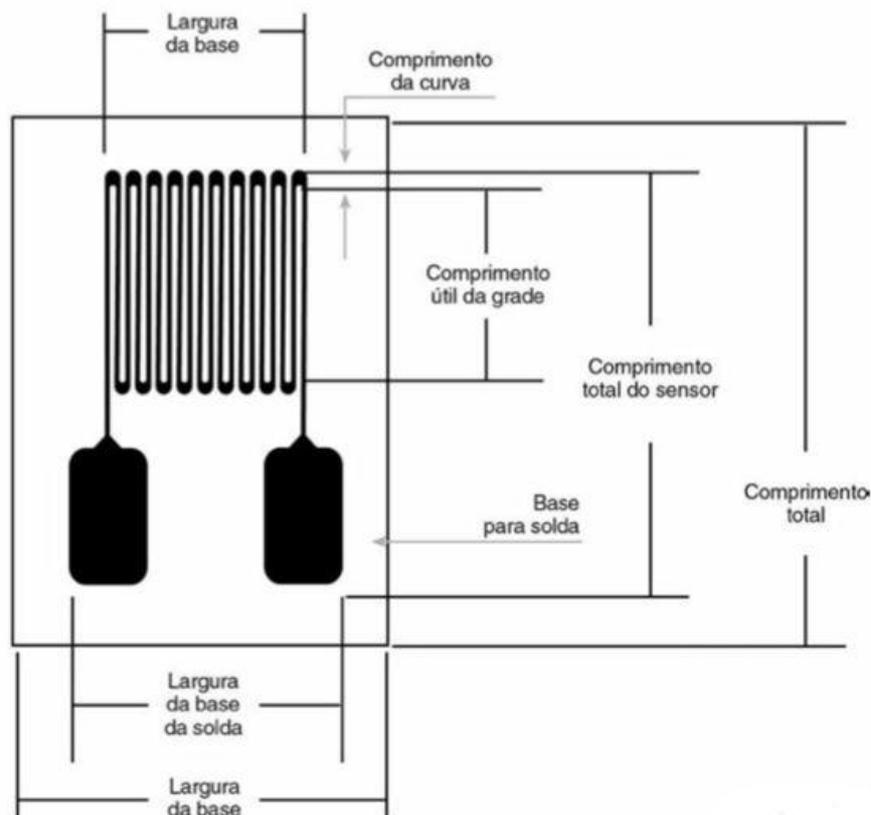
Na grande maioria das aplicações em que esses sensores são empregados, eles são colados sobre uma membrana que por sua vez sofrerá um *stress* proporcional à grandeza que se deseja medir. O sensor piezoresistivo, por sua vez, sofrerá uma mudança na sua resistência

em função da deformação que ele sofre. Essa característica faz dos sensores piezoresistivos um componente extremamente útil nas áreas de análise de *stress*, medição de grandezas físicas, teste e instrumentação industrial. (BECKWITH; MARANGONI; LIENHARD, 1995)

Segundo Balbinot e Brusamarello (2000), o primeiro sensor piezoresistivo utilizado em medição de deformação, área conhecida também por extensometria, foi desenvolvido por Carlson em 1931. O sensor foi construído utilizando fio metálico esticado entre dois pontos. Quando a distância entre os dois pontos é alterada, ocorre uma variação na resistência do fio proporcional à variação da distância entre os dois pontos. Atualmente os sensores que utilizam fios metálicos se tornaram obsoletos, em função do crescente uso de sensores do tipo folha e semicondutores.

O extensômetro elétrico do tipo folha é formado por dois elementos: a base e a grade. A base do extensor é uma fina lâmina de epóxi ou poliamida, em que as funções básicas são suportar mecanicamente a grade, possibilitar a fixação do extensômetro à superfície elástica e isolar eletricamente a grade da superfície onde o extensômetro é fixado. Geralmente, a grade é formada por uma liga metálica que serve como elemento piezoresistivo. A figura 3 mostra o formato típico de um sensor de deformação piezoresistivo do tipo folha para medição de deformação uniaxial.

Figura 3 – Formato típico de um sensor de deformação piezoresistivo uniaxial.



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2000)

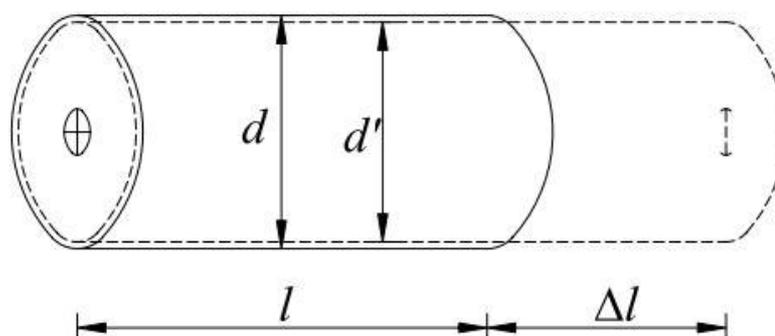
Kulite Semiconductor (2009) destaca que a descoberta do efeito da piezoresistência no silício foi realizada por C. S. Smith em 1954. Já os primeiros sensores piezoresistivos utilizados na medição de deformação ocorreu no início da década de 1970 em aplicações para a indústria automobilística. Desde então, os sensores de pressão baseados em sensores piezoresistivos em silício são objetos de estudo. Segundo Balbinot e Brusamarello (2000), os piezoresistores semicondutores são mais baratos de serem produzidos e possuem dimensão menor que os sensores do tipo folha. O autor destaca que as principais vantagens desse tipo de sensor são a alta sensibilidade e o valor de resistência elevado, além do tamanho reduzido. Por outro lado, esses sensores são muito sensíveis à variação de temperatura e apresentam forte tendência ao *drift*¹.

Balbinot e Brusamarello (2000) citam que os sensores piezoresistivos produzidos em silício possuem uma sensibilidade de 25 a 50 vezes superior aos sensores do tipo folha. Essa alta sensibilidade permite que seja utilizada uma tensão de excitação inferior, o que possibilita também que a estrutura mecânica à qual o sensor está aplicado trabalhe em uma região mais afastada do ponto de deformação plástica. Segundo o autor, a tecnologia de sensores piezoresistivos em silício pode ser facilmente encontrada em sensores de pressão onde o diafragma é construído no próprio silício.

2.3.1 Deformação Mecânica

Comumente, os materiais e estruturas possuem a propriedade de se alongarem quando tracionados e de se encolherem ao serem comprimidos. Supondo que um material seja tracionado por uma força F , enquanto que o comprimento original do material seja l , o alongamento resultante é dado por Δl , conforme é ilustrado pela figura 4, que apresenta a deformação resultante de um fio sob tração.

Figura 4 – Deformação de um fio sob tração.



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004)

A deformação resultante, representada por ϵ , é expressa pela equação 1. O termo deformação, segundo Hoffmann (2012), é um termo técnico genérico que se refere ao processo

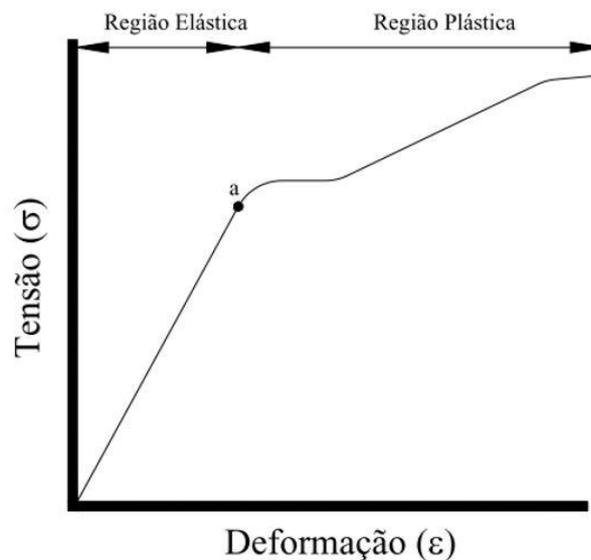
¹ Degradação gradual do sensor, que provoca um *offset* da medida em relação à calibração original.

de alongamento de um material, que pode ser tanto positivo, no caso de uma tensão, quanto negativo, no caso de uma compressão.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Nas análises de deformação de materiais, geralmente se utiliza uma relação entre a deformação sofrida pelo material e a tensão à qual ele está sendo submetido. Essa relação pode ser representada através de uma curva denominada de curva tensão-deformação. Os diagramas de tensão-deformação são obtidos através de ensaio de tração ou compressão em que é aplicada uma força crescente a um corpo de prova e medido o seu alongamento. A figura 5 apresenta a curva de deformação típica de materiais dúcteis², como é o caso da grande maioria dos metais.

Figura 5 – Curva tensão-deformação para materiais dúcteis.



Fonte:Andolfato, Camacho e Brito (2004)

Ao verificar a figura 5, nota-se que existe uma região em que a tensão é proporcional à deformação. Essa região fica compreendida entre a origem do gráfico e o ponto *a*, onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta região é conhecida como região elástica, à qual se aplicam as leis de Hook. Essa lei estabelece uma constante de proporcionalidade entre tensão(σ), que é definida pela razão entre a força aplicada e a área da seção do material, e a deformação (ε), que é conhecida como módulo de elasticidade longitudinal, ou módulo de Young (E), em uma única direção. A equação 2 define como as variáveis se relacionam.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

² Materiais dúcteis sofrem deformação sob tensão cisalhante. Os materiais dúcteis possibilitam determinar com facilidade a deformação plástica, podendo sofrer importante deformação sem se quebrar.

No entanto, a deformação não ocorre única e exclusivamente no mesmo eixo no qual está sendo aplicada a tração ou compressão. Segundo Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995), quando um material é submetido a um *stress* uniaxial em sua região elástica, ocorre uma deformação lateral que é determinado pelo coeficiente de Poisson (ν). Observando a figura 4, verifica-se que, além da deformação axial, existe uma deformação radial que faz com que o diâmetro do fio (d) diminua. A constante de Poisson é encontrada através da equação 3, onde (ϵ_L) é a deformação lateral.

$$\nu = \frac{-\epsilon_L}{\epsilon} \quad (3)$$

2.3.2 Efeito Piezoresistivo

Uma das consequências da deformação mecânica sofrida pelo material é a variação em sua resistência elétrica. Segundo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2000), esse efeito foi observado por Kelvin em 1856 durante experimentos utilizando fios de cobre e ferro. Além disso, um dos fatos observados por Kelvin foi que a variação relativa da resistência elétrica sobre a variação relativa da deformação é uma constante. Como mostra a equação 4, sendo K constante, R_0 a resistência inicial, l_0 o comprimento inicial, ΔR e Δl a variação da resistência e comprimento respectivamente, e ϵ a deformação relativa.

$$\frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\epsilon} = K \quad (4)$$

Posteriormente o parâmetro K tornou-se conhecido como o fator *gage* de um piezoresistor. O fator *gage* é um termo utilizado para definir a proporção da mudança de resistência de um piezoresistor em função da deformação que é aplicada a ele. Quanto maior for o fator *gage*, maior é a variação de sua resistência para uma dada deformação. Isso impacta diretamente nos níveis de sinais de medição e, conseqüentemente, na sua resolução. Esse mesmo parâmetro pode ser chamado de sensibilidade do piezoresistor de deformação. Em metais, esse fator K costuma ser próximo a dois. Já em materiais semicondutores, costuma-se encontrar valores superiores a dez vezes o fator *gage* de metais.

Quando o material sofre uma deformação mecânica ocorrerá também uma variação em sua resistência elétrica que, por sua vez, é proporcional à força que originou a deformação. Os sensores piezoresistivos baseiam-se nessa propriedade, em que toda a deformação sofrida por um material provoca uma variação em sua resistência elétrica. Portanto, ao medir e monitorar a resistência elétrica de um determinado material, é possível verificar se ele está sendo submetido a uma deformação e, além disso, verificar a intensidade dessa deformação.

O valor da resistência elétrica (R) de um determinado material é dado pela equação 5, onde l é o comprimento do material, A é a área de seção transversal do material e ρ é a

resistividade do material.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

Como descrito na seção anterior, quando o material é deformado, além da variação longitudinal, ocorre a variação da sua área transversal. Isto, por sua vez, afeta a resistividade do material. Outros efeitos também afetam a variação da resistência do material, como a variação da resistividade elétrica devido à mudança volumétrica. Segundo Johari (2003), a equação 6 ilustra os efeitos que contribuem para a variação da resistência.

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (6)$$

Dessa forma, segundo Balbinot e Brusamarello (2000), é possível determinar a variação de resistência elétrica de um material devido a uma determinada deformação mecânica através da equação 7, onde $\Delta\rho$ é a variação da resistividade elétrica do material devido à mudança volumétrica que a deformação provoca.

$$\frac{\Delta R}{R\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho}{\rho\varepsilon} \quad (7)$$

Os sensores piezoresistivos construídos em semicondutor de silício possuem como base o efeito da piezoresistência, que nada mais é do que a variação de sua resistência elétrica em função da deformação à qual ele é submetido. Esse efeito pode ser observado em todos os materiais, no entanto, em alguns essa característica é mais predominante do que em outros. Além disso, essa variação em sua resistência ocorre sob deformações estáticas e dinâmicas. (Kulite Semiconductor, 2009).

Apesar de os piezoresistores semicondutores apresentarem uma alta sensibilidade, se comparados com os demais tipos piezoresistores, eles não são muito utilizados na análise experimental de deformação. Os principais motivos são a característica de não linearidade que eles apresentam e o custo mais elevado em relação aos demais. Esse tipo de piezoresistor é muito utilizado na fabricação de transdutores para a medição de outras grandezas físicas. Devido à sua alta sensibilidade, eles são ótimas alternativas para a medição de pequenas deformações. (HOFFMANN, 2012). Segundo Shaby, Premi e Martin (2015), o silício possui excelentes propriedades estruturais, com um módulo de Young de $E = 190 \text{ kN/mm}^2$, que é muito próximo do aço, porém com uma densidade inferior, semelhante ao alumínio, de forma que o seu coeficiente de expansão térmica é aproximadamente oito vezes inferior ao do aço.

Ao longo do tempo, diferentes sistemas de medição usando semicondutores foram utilizados, iniciando com os piezoresistores fixados em diafragmas metálicos, e progredindo até diafragmas construídos no próprio silício. Segundo Tellez (2014), os diafragmas de silício monocristalino apresentam ótimas propriedades mecânicas, como força, flexibilidade, repetitividade, e

não possuem histerese mecânica. No entanto, os coeficientes de temperatura (TCR, do inglês *Temperature Coefficient of Resistance*) são altos. Já no caso de piezoresistores com base em materiais policristalinos, as propriedades mecânicas não são tão boas como no monocristalino, pois o *stress* interno afeta a linearidade e diminui a sensibilidade, mas controlando o processo de fabricação é possível diminuir e controlar o TCR.

Nos projetos de sensores piezoresistivo atuais há uma grande variação no que diz respeito ao seu *design* e aplicação. De acordo com Campbell (2012), a descoberta da piezoresistência no silício foi experimental, justamente em testes na tentativa de desenvolver sensores de pressão. A explicação teórica para o efeito da piezoresistividade no silício tem como base a descrição da mecânica quântica do efeito da deformação do cristal na condutividade dos elétrons e das lacunas. Para uma aplicação prática, Campbell (2012) destaca que o efeito da piezoresistência no silício é extremamente dependente de alguns parâmetros, como:

- O tipo de dopagem e a sua concentração;
- A temperatura;
- A direção do fluxo de corrente;
- O tipo e a direção da força.

Campbell (2012) ainda destaca que o parâmetro mais importante na fabricação do sensor piezoresistivo de silício é o tipo de dopagem e a sua concentração.

Quando o piezoresistor sofre uma deformação, ocorre uma mudança no número de portadores e na sua mobilidade média. No entanto a magnitude dessa deformação dependerá das características específicas do semicondutor. Para os casos de uma simples tensão e compressão, a mudança relativa de sua resistividade é dada por:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \prod_L \sigma = \prod_L \varepsilon E \quad (8)$$

Onde \prod_L é o coeficiente de piezoresistividade longitudinal, σ é a tensão, ε é a deformação e o E é o módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young. Para o silício, $E = 190 \text{ kN/mm}^2$. (Kulite Semiconductor, 2009).

2.3.3 Fator *Gage*

O fator *gage* é um termo utilizado para definir a proporção da mudança de resistência de um piezoresistor em função da deformação que é aplicada a ele. Quanto maior for o fator *gage*, maior é a variação de sua resistência para uma dada deformação. Isso impacta diretamente nos

níveis de sinais de medição do sensor e, conseqüentemente, na sua resolução. Segundo Kulite Semiconductor (2009), o fator *gage* de um piezoresistor é definido pela equação 9:

$$GF = \frac{\Delta R}{R\varepsilon} = \prod_L \sigma = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (9)$$

Onde ν é a constante de Poisson, ε é a deformação, ΔR é a variação de resistência produzida pela deformação e R é a resistência do piezoresistor sem deformação. Os primeiros dois termos representam a mudança da resistência em função da variação da dimensão do piezoresistor. Já o último termo representa a mudança da resistividade em função da deformação.

2.3.4 Influência da Temperatura

De acordo com Wilson (1988), os efeitos da temperatura sobre o fator *gage* podem causar diversas implicações. Quando um piezoresistor é utilizado em medições de deformação, qualquer mudança em sua resistência é interpretada como o resultado de uma deformação mecânica. Dessa forma, quando ocorre uma variação de temperatura, haverá uma mudança na resistência do piezoresistor em função da deformação que a variação de temperatura ocasionou no material. Wilson (1988) relata que na grande maioria das vezes esse efeito da temperatura é negligenciado nas medições de pressão dinâmicas. No entanto, nas medições de pressão estática os efeitos da temperatura representam um grande potencial de fonte de erro e exigem alguma forma de compensação.

Um importante parâmetro relacionado ao funcionamento e resposta de um piezoresistor é a sua temperatura de trabalho. De acordo com Balbinot e Brusamarello (2000), a variação da temperatura pode afetar a resposta do piezoresistor de quatro formas distintas:

- Variação do fator *gage* do piezoresistor. Segundo Kulite Semiconductor (2009), o coeficiente de temperatura do fator *gage* (TCGF, do inglês, *Temperature Coefficient of Gage Factor*) descreve a mudança do fator *gage* em função da temperatura. Esse coeficiente é dado em $\%/100^\circ\text{C}$. ΔGF é a variação do fator *gage* provocado pela variação de temperatura. A equação 10 define a relação entre o fator *gage* e a temperatura.

$$\frac{\Delta GF}{GF} = TCGF \cdot \Delta T \quad (10)$$

- Alongamento ou contração do próprio piezoresistor. A variação de temperatura do elemento piezoresistor faz com que ele sofra uma alteração em sua dimensão, ocasionando a variação em sua resistência. A variação em sua dimensão longitudinal é descrita pela equação 11, onde α é o coeficiente térmico de expansão do material piezoresistor e l_p é o comprimento do piezoresistor.

$$\frac{\Delta l_p}{l_p} = \alpha \Delta T \quad (11)$$

- Alongamento ou contração do material ao qual o piezoresistor foi aplicado. Assim como o piezoresistor, o material em que ele se encontra aplicado também sofrerá uma alteração dimensional em função da temperatura. A alteração da dimensão longitudinal em função da temperatura é determinada pela equação 12, onde β é o coeficiente térmico de expansão do material do substrato em que o piezoresistor está aplicado e l_s é o comprimento do substrato.

$$\frac{\Delta l_s}{l_s} = \beta \Delta T \quad (12)$$

- Variação da resistividade do material piezoresistivo. A variação da resistência do material piezoresistivo é determinada pela equação 13, onde γ é o coeficiente de temperatura da resistividade do material piezoresistivo.

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T \quad (13)$$

Conforme Balbinot e Brusamarello (2000), o principal componente que determina as condições de operação do piezoresistor é o material de que ele é composto. Segundo o autor, com exceção do efeito do fator *gage* do piezoresistor, os outros efeitos podem ser relacionados, de forma que a variação da resistência em função da variação da temperatura é dado pela equação 14.

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha) K \Delta T + \gamma \Delta T \quad (14)$$

Observando a equação, uma expansão térmica entre o elemento piezoresistor e o material que ele está aplicado de mesma intensidade, ou seja, β e α possuem valores iguais, faz com que o primeiro termo da equação seja zerado. Como resultado, o efeito da temperatura irá manifestar-se somente em função do coeficiente de temperatura da resistividade do material piezoresistivo. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2000). É comum que durante o projeto de sensores piezoresistivos seja realizada a seleção de materiais e ligas com o objetivo de compensar os efeitos térmicos observados. Essa característica é conhecida como autocompensação de temperatura.

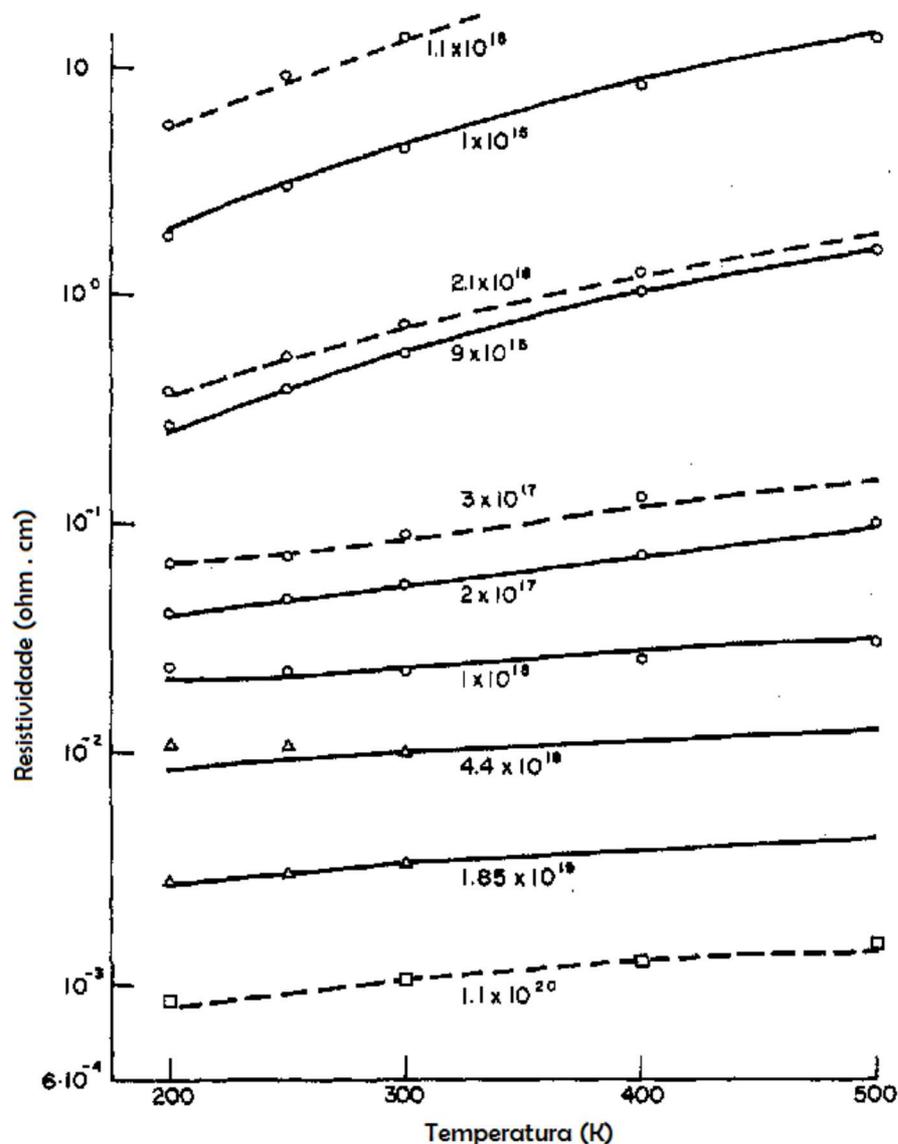
A umidade do ambiente em que o piezoresistor é utilizado também pode ser uma causa de instabilidade da medição. A umidade pode alterar a resistência de isolamento entre o piezoresistor e o objeto em que ele está aplicado, podendo também modificar as propriedades do adesivo utilizado para fixar o piezoresistor. A umidade, em casos extremos, também pode danificar o piezoresistor, em função do efeito da corrosão. Segundo Kenkyujo (2017), após o elemento piezoresistivo ser aplicado sobre uma membrana, a variação da sua resistência para um mesmo módulo de aumento e redução de tensão pode ser diferente. Essa diferença se deve a histerese do fator *gage*, que ocorre em função de fatores como o material da membrana, o adesivo utilizado, a temperatura de trabalho e umidade.

O valor de corrente a ser aplicado sobre o piezoresistor deve ser determinado de forma a ser levado em consideração o calor gerado por ele próprio. O calor gerado pelo efeito Joule não pode ser tão alto a ponto de afetar o desempenho do piezoresistor. Segundo Kulite Semiconductor (2009), um alto valor de calor dissipado pelo piezoresistor exige tempo suficiente para estabilização térmica do conjunto em que ele está aplicado. Uma forma de compensar esse efeito é utilizando piezoresistores com coeficientes de temperatura baixos. Em função de ser necessário considerar todas essas variáveis, torna-se complexo estabelecer o valor de máxima corrente que pode ser aplicado ao piezoresistor. Kulite Semiconductor (2009) destaca que, de uma maneira geral, piezoresistores com boa adesão a componentes de boa dissipação térmica podem ser submetidos a uma dissipação de 20 a 50 mW sem comprometer a medição.

Outra alternativa é a redução do nível de excitação do piezoresistor, que força a diminuição do efeito de dissipação do calor. No entanto, a intensidade do sinal de saída é proporcional à intensidade de excitação utilizada na medição. Outro fator que possui ligação direta com a relação entre o nível de excitação e a dissipação de calor é o valor de resistência do piezoresistor. Valores de resistência elevados permitem a utilização de níveis de excitação maiores com dissipação de calor baixa.

Para o caso de piezoresistores fabricados em silício, o coeficiente de expansão térmica linear possui um valor baixo comparado ao da grande maioria dos materiais. Dessa forma, a diferença de expansão entre o piezoresistor e a membrana à qual ele está aderido pode provocar um estado de compressão do piezoresistor. Isso se deve ao fato de que, geralmente, a cura do adesivo utilizado para fixar o piezoresistor à membrana ocorre em temperaturas elevadas. No entanto, Sg e Connection (2008) destacam que os piezoresistores produzidos em silício possuem uma influência da temperatura em sua resistência superior aos demais sensores piezoresistivos. Outro fator determinante para a influência da temperatura na resistência do piezoresistor é a dopagem que o material apresenta. A figura 6 apresenta a resistividade do silício dopado com Boro e Fósforo e sua dependência com a temperatura e a concentração de dopantes. A resistividade aumenta com a elevação da temperatura para um dado valor de concentração de dopantes.

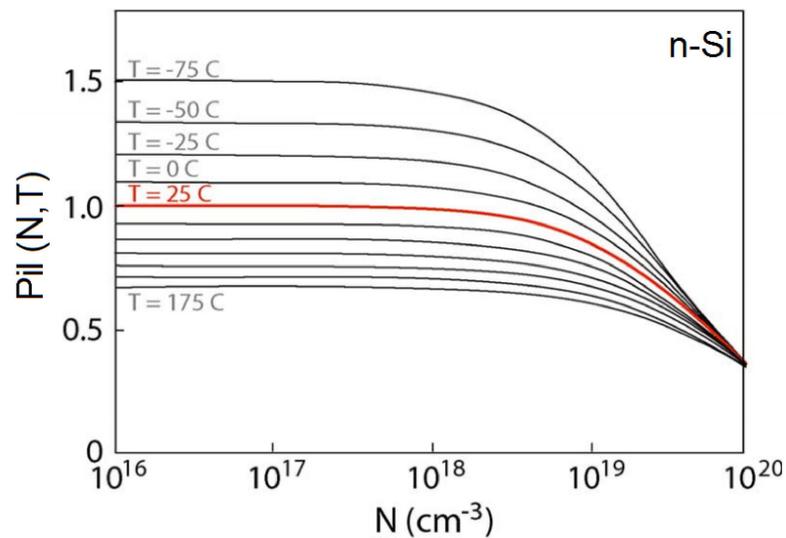
Figura 6 – Resistividade do silício em função da temperatura para diferentes concentrações de dopantes com Fósforo (linha contínua) e Boro (linha pontilhada)



Fonte: Arora, Hauser e Roulston (1982)

No entanto, a influência da temperatura sobre as propriedades físicas do piezoresistor de silício não se restringem somente à sua resistividade. A intensidade de sua própria propriedade piezoresistiva também é afetada pela temperatura à qual ele é submetido. De acordo com os estudos realizados por Richter et al. (2008) e Barlian et al. (2009), de forma genérica, a elevação da temperatura do piezoresistor faz com que a intensidade do fenômeno piezoresistivo sofra uma redução. Essa variação também está relacionada com a densidade de dopantes que o silício possui. O gráfico da figura 7 apresenta o valor do coeficiente de piezoresistência (Π_{11}) para silício tipo-n em função da concentração de dopantes e da temperatura de trabalho.

Figura 7 – Valor do coeficiente de piezoresistência para silício tipo-n em função da concentração de dopantes e da temperatura



Fonte: Barlian et al. (2009)

Kulite Semiconductor (2009) aborda também um efeito chamado de *drift* térmico. Esse efeito é causado principalmente pelas mudanças na microestrutura do sensor piezoresistivo. Essa mudança pode estar associada ao processo de alívio do *stress* do sensor ou então à influência térmica do sensor e do seu adesivo. Esse efeito depende não somente da temperatura, mas também do tempo de vida do dispositivo. Esse *drift* térmico pode afetar a estabilidade da medição do sistema ao qual o sensor está aplicado.

Segundo VISHAY (2010), outro ponto que deve ser levado em consideração é a presença de regiões localizadas onde há temperaturas diferentes do restante da região de medição do piezoresistor. Um fator que pode gerar essa diferença é a presença de vazios, do inglês *void*, durante o processo de cura do adesivo utilizado na fixação do piezoresistor ou então discontinuidades da membrana. Imperfeições no piezoresistor podem provocar o desenvolvimento de pontos quentes, que podem afetar o seu desempenho. Portanto, somente piezoresistores de excelente qualidade podem ser utilizados em aplicações com alto nível de excitação.

Quando os demais fatores são constantes, a capacidade de dissipação de calor de um piezoresistor está relacionada com a área ativa do piezoresistor, sendo que o seu encapsulamento não é relevante para a sua dissipação térmica. Porém, sempre é indicado um encapsulamento para o sensor em situações onde o piezoresistor permanece exposto a ambientes que possam comprometer a sua integridade. De acordo com VISHAY (2010), os piezoresistores totalmente encapsulados apresentam cerca de 10 a 15 % maior capacidade de dissipação de calor, se comparados com um piezoresistor de mesma área, porém sem encapsulamento.

2.3.5 Fator de Sensibilidade Transversal

Nas aplicações utilizando sensores piezoresistivos para medição da deformação de estruturas mecânicas, dificilmente a deformação ocorre de forma unidirecional. Outros fatores atuam na resposta do sensor piezoresistivo, como por exemplo, a deformação transversal. Conforme Balbinot e Brusamarello (2000), pode ser realizada uma boa aproximação quando se considera um sensor piezoresistivo colado sobre um corpo e submetido a um esforço de tração ou compressão. A variação de sua resistência pode ser definida pela equação 15, em que S_a é a sensibilidade do sensor piezoresistivo para a deformação na direção axial, ε_a é a deformação na direção axial do sensor, S_t é a sensibilidade do sensor para a deformação na direção transversal, ε_t é a deformação na direção transversal do sensor, S_{cis} é a sensibilidade do sensor para a deformação de cisalhamento, γ_{at} é a deformação de cisalhamento associada às direções a e t .

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon_a + S_t \varepsilon_t + S_{cis} \gamma_{at} \quad (15)$$

Segundo Balbinot e Brusamarello (2000), a sensibilidade do sensor piezoresistivo para a deformação na direção do cisalhamento pode ser desprezada. Porém a sensibilidade do sensor à deformação transversal é significativa. Geralmente os fabricantes de sensores piezoresistivos definem um fator de sensibilidade transversal que a relaciona a sensibilidade na direção axial do sensor. Essa relação é expressa pela equação 16.

$$K_t = \frac{S_t}{S_a} \quad (16)$$

Essa relação é feita, pois quando ocorre uma deformação axial, naturalmente ocorre uma deformação na direção transversal, que por sua vez está relacionada à constante de Poisson (ν) do material piezoresistivo em que o sensor foi construído. Dessa forma é obtida a equação 17. Balbinot e Brusamarello (2000) citam que os efeitos da sensibilidade transversal devem sempre ser levados em consideração na análise de deformação dos sensores piezoresistivos de deformação. Caso o erro ocasionado pela sensibilidade transversal seja muito pequeno, ele pode ser desconsiderado, caso contrário devem-se efetuar as devidas correções.

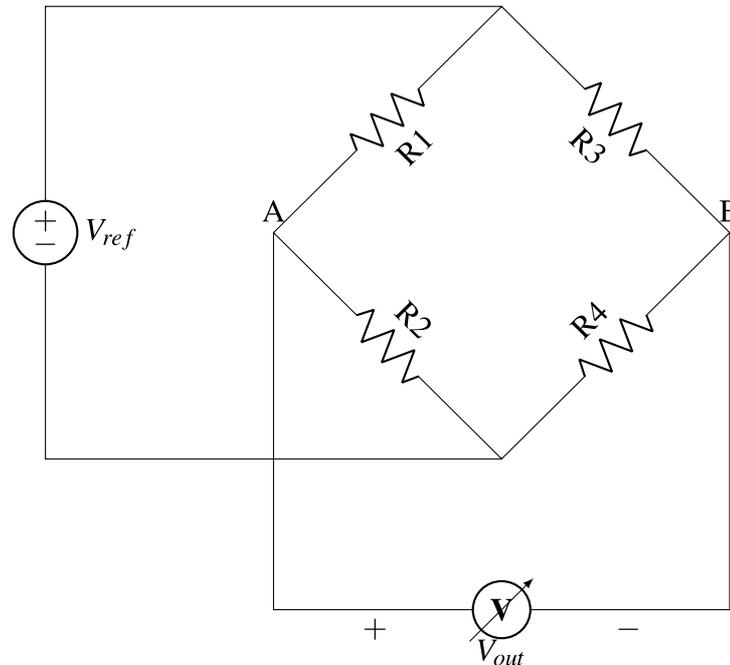
$$\frac{\Delta R}{R} = S_a (\varepsilon_a + K_t \varepsilon_t) = S_a \varepsilon_a (1 - \nu K_t) \quad (17)$$

2.4 Ponte de Wheatstone

De acordo com Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995), de todos métodos empregados nos sistemas de medição que utilizam transdutores passivos, a ponte de Wheatstone é o sistema mais conhecido e utilizado atualmente. A ponte de Wheatstone foi desenvolvida por S. H. Christie em 1833 e é sem dúvida a que possui maior destaque em sistemas de medição. A ponte de Wheatstone é composta por quatro impedâncias, uma fonte de alimentação e um medidor de

tensão. As aplicações da ponte permitem que ela seja composta por um ou mais transdutores ativos. Tipicamente, são utilizados como transdutores resistivos: termistores e *strain gages* resistivos. A figura 8 traz o circuito de uma ponte de Wheatstone.

Figura 8 – Circuito da Ponte de Wheatstone.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O sinal de saída da ponte de Wheatstone (V_{out}) é representado pela equação 18, onde V_{ref} é a tensão de excitação.

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_{ref} \quad (18)$$

Caso qualquer um dos piezoresistores seja submetido a uma deformação, haverá uma variação na sua resistência dada por dR_i , onde $i = 1, 2, 3$ e 4 . Logo, haverá um desbalanceamento da ponte, gerando uma diferença de potencial em sua saída, conforme indicado pela equação 19.

$$dV_{out} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial V_{out}}{\partial R_i} dR_i \quad (19)$$

Avaliando as derivadas parciais da equação 19, juntamente com a equação 18 e assumindo que todas as resistências sejam iguais, obtém-se a equação descrita por 20

$$\delta V_{out} = \left(\frac{\delta R_1}{R_1} - \frac{\delta R_2}{R_2} + \frac{\delta R_3}{R_3} - \frac{\delta R_4}{R_4} \right) V_{ref} \quad (20)$$

Simplificando em termos da equação 9, tem-se a equação 21:

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{ref}} = \frac{1}{4} (\varepsilon_1 GF_1 - \varepsilon_2 GF_2 + \varepsilon_3 GF_3 - \varepsilon_4 GF_4) \quad (21)$$

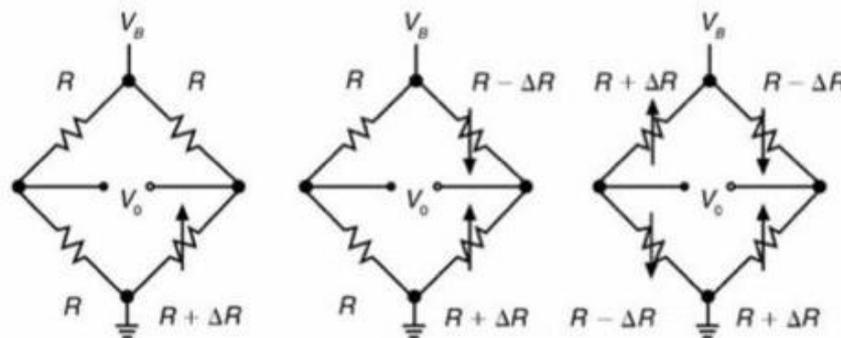
Analisando a equação, nota-se que todos os elementos da ponte afetam diretamente o sinal de saída. De acordo com FRADEN (2014), uma ponte de Wheatstone é considerada balanceada quando a condição representada pela equação 22 é satisfeita. Quando a ponte está em equilíbrio, o seu nível de tensão de saída é zero. Verifica-se também que não há a necessidade de que todas as resistências possuam o mesmo valor para que a ponte seja considerada balanceada, mas sim que a condição seja respeitada. Verifica-se também que essa condição é estabelecida independentemente da tensão de excitação da ponte.

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (22)$$

Muitas vezes, segundo FRADEN (2014), as pontes de Wheatstone são implementadas utilizando somente um sensor ativo, ou seja, somente uma das quatro resistências que compõem a ponte é sensível à variação da resistência. A essa configuração, comumente se dá o nome de 1/4 de ponte de Wheatstone. Essa é a configuração mais simples de ser construída, porém ela possui a desvantagem de que, mesmo que o sensor ativo seja linear, a saída da ponte é não linear, pois a corrente que percorre o sensor depende de sua resistência. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2000). Existem outras duas configurações na qual a ponte de Wheatstone pode ser implementada. Uma delas é a 1/2 ponte e a outra é a de ponte completa.

A configuração de 1/2 ponte requer que duas das impedâncias sejam ativas. Isso faz com que a sensibilidade da ponte seja maior se comparada com a de 1/4 de ponte. Quando a configuração de 1/2 é construída de forma que os sensores ativos trabalhem de forma oposta, ou seja, quando uma das resistências sofre uma variação positiva a outra sofre uma variação negativa, porém de mesma intensidade, observa-se que a saída do sinal da ponte passa a ter a característica de linearidade em função da variação da resistência. Já no caso da configuração de ponte completa, todas as quatro resistências que compõem a ponte são ativas. Nesse caso a sensibilidade é maior e a saída apresenta característica linear. Balbinot e Brusamarello (2000) citam que a ponte completa e a configuração mais escolhida na maioria das aplicação de medição de peso e pressão. A figura 9 mostra as configurações comuns para ponte de Wheatstone.

Figura 9 – Configurações de ponte de Wheatstone. (1) 1/4 de ponte (2) meia ponte (3) ponte completa



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2000)

Segundo Campbell (2012), a forma mais comum de implementação de sensores de pressão baseado em piezoresistores é através de um arranjo de diversos resistores, que formam uma ponte de Wheatstone. A utilização da ponte de Wheatstone é muito popular, pois ela permite que a variação da resistência seja medida através do nível de tensão de saída da ponte, o que traz uma vantagem prática para realizar a medida, pois a medição de tensão é mais simples de ser incorporada do que a medição de resistência. Além disso, a ponte de Wheatstone, na configuração de ponte completa, apresenta uma importante característica que é o cancelamento do efeito da variação de temperatura sobre a resistência dos piezoresistores. Isso ocorre na condição em que todos eles possuam o mesmo valor de resistência. Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995) destaca que os circuitos em ponte permitem grande precisão na medição de resistência.

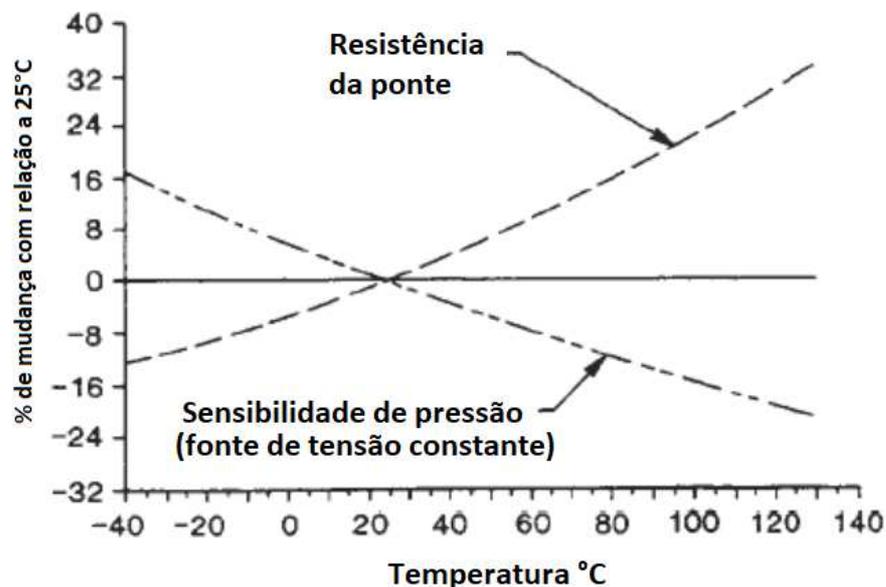
Um fator relevante para o desempenho do piezoresistor, mesmo estando ele conectado à uma ponte de Wheatstone, é o seu nível de excitação. Segundo VISHAY (2010), para garantir que a excitação aplicada à ponte de Wheatstone não seja excessiva, faz-se necessário realizar testes de desempenho na máxima temperatura de trabalho do sensor. No entanto, esse procedimento pode ser simplificado por um processo que se baseia no aumento gradual do nível de excitação dos piezoresistores da ponte de Wheatstone sem eles estarem submetidos à deformação, ou seja, uma condição sem carga, até que seja observada uma instabilidade na medição do sinal de saída da ponte. Ao observar essa reação, o nível de excitação deve ser reduzido até que a medição volte ao valor de zero e permaneça estável. VISHAY (2010) cita que, para a maioria das aplicações de análise de *stress* experimental, esse máximo valor de excitação pode ser utilizado de forma segura, sem degradar o desempenho do sensor. A realização desse procedimento na máxima temperatura de operação do sensor aumenta a probabilidade de que a máxima excitação da ponte tenha sido encontrada.

Em medição de pressão por elementos piezoresistivos, geralmente os piezoresistores são colocados sobre uma membrana, compondo o que é chamado de célula de medição. A ligação

dos piezoresistores é feita por uma ponte de Wheatstone, incorporando o cancelamento do efeito da variação de temperatura sobre a resistência dos piezoresistores. No entanto, a medição de deformação resultante nessa célula de medição não é imune à variação de temperatura. De acordo com Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995), a sensibilidade da ponte de Wheatstone é afetada pela temperatura por razões como: a variação do módulo de Young e a alteração de dimensão do sensor. Segundo o autor, a variação do módulo de Young se manifesta em maior intensidade, podendo afetar em torno de 6,6 % a medição a cada 100 °C. Sendo que o efeito da variação da dimensão pode afetar aproximadamente 0,4 % da medida a cada 100 °C.

A sensibilidade de um sensor é definida por meio da variação relativa do sinal de saída pela variação da pressão aplicada para uma dada alimentação. Por sua vez, a sua sensibilidade varia com a temperatura de trabalho, visto que está diretamente relacionada com o coeficiente piezoresistivo e seu coeficiente térmico. Levando isso em consideração, tomando como referência a resposta de um sensor, alimentado com uma fonte de tensão constante, para a temperatura de 25 °C, pode-se verificar qual o percentual de mudança em seu funcionamento à medida que a temperatura é alterada. A figura 10 apresenta a dependência da resistência da ponte e da sensibilidade do sensor com a temperatura.

Figura 10 – Dependência da resistência da ponte e da sensibilidade do sensor com a temperatura



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2000)

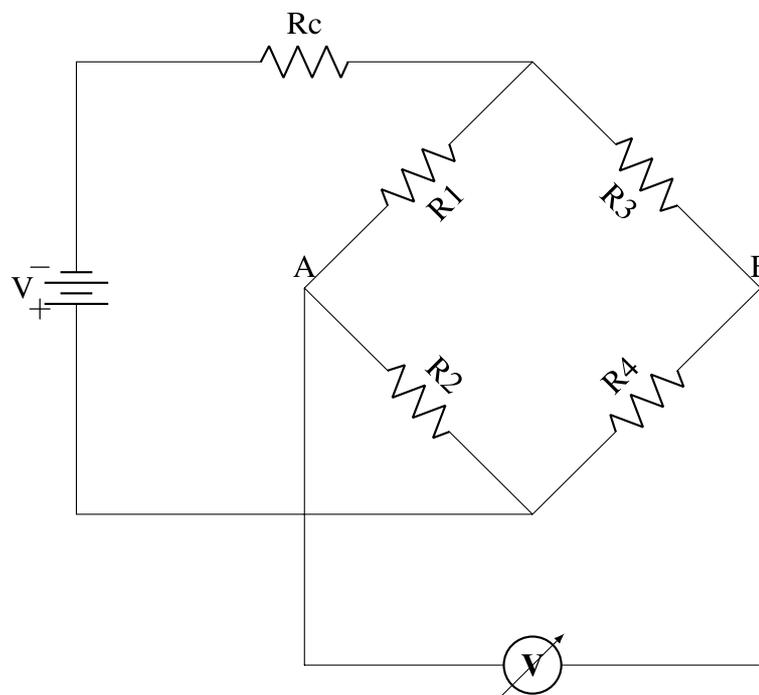
Observando a figura 10, constata-se que a sensibilidade para uma mesma pressão aplicada ao sensor é reduzida com o aumento da temperatura. Ou seja, o sinal de saída do sensor é reduzido com o aumento da temperatura, mesmo ele sendo submetido à mesma pressão de trabalho. Observa-se também que a resistência da ponte sofre um aumento com a elevação da temperatura. Quando o sensor é alimentado por uma fonte de tensão constante, a taxa de variação

da sensibilidade pelo efeito térmico é dependente da variação do coeficiente piezoresistivo com a temperatura e da variação resultante de deformação com a temperatura. Uma alternativa para diminuir o efeito da sensibilidade com a temperatura é aumentar a concentração de dopantes, porém isso diminui significativamente a sensibilidade do piezoresistor.

Alimentando-o por uma fonte de corrente constante, a variação da sensibilidade em função da temperatura não depende somente da variação do coeficiente piezoresistivo com a temperatura e da variação resultante de deformação com a temperatura, mas também do coeficiente térmico da resistência dos piezoresistores. Apesar de haver mais termos quando se utiliza uma fonte de corrente, ela é mais adequada, visto que a variação de sensibilidade em função da temperatura e do coeficiente de temperatura da resistência possuem sinais opostos, havendo uma compensação entre os dois efeitos.

Obviamente, quando se deseja obter sensores com alta precisão, faz-se necessário implementar uma compensação para o efeito que a variação da temperatura gera na medição. A medida que a temperatura aumenta, o módulo de Young da célula de medição de pressão diminui, tornando-a mais elástica. Consequentemente, a deformação sofrida pela célula será maior para uma mesma tensão. Uma maneira de compensar esse efeito na sensibilidade da célula é através do uso de um resistor de compensação em série com a ponte de Wheatstone, como mostra a figura 11

Figura 11 – Circuito da Ponte de Wheatstone com resistor de compensação.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Segundo FRADEN (2014), essa é a compensação de temperatura mais popular em pontes

de Wheatstone. Conforme o autor, esse resistor deve possuir uma resistência fixa com baixa sensibilidade à temperatura. Nesse caso o resistor deve ser dimensionado de forma que obtenha-se a relação da equação 23, onde R_c é a resistência de compensação e R é o valor nominal dos resistores da ponte, sendo as quatro resistências iguais.

$$\frac{1}{R_c} \frac{\delta R}{\delta T} = 0 \quad (23)$$

A figura 11 mostra a compensação de temperatura quando a excitação da ponte é realizada através de uma fonte de tensão. Quando ela é alimentada por uma fonte de corrente o resistor de compensação deve ser conectado em paralelo com a ponte de Wheatstone. Nesse caso a resistência de entrada da ponte irá reduzir e compensar seu coeficiente térmico.

No entanto, a inserção dessa resistência de compensação ao circuito afeta diretamente a intensidade do sinal de saída do sensor. Quando a ponte é alimentada por uma fonte de tensão constante, a resistência provocará uma redução do sinal de saída de aproximadamente 87%. A utilização de uma fonte de corrente constante provoca uma perda de sinal de 13%.

De maneira geral, a utilização dos sensores de deformação piezoresistivos necessitam de algum tipo de compensação e calibração. Dificilmente todos os piezoresistores estarão perfeitamente equilibrados e também sofrem grande influência da temperatura.

A mudança na temperatura de trabalho do sensor afeta três parâmetros: tensão de *Offset*, sensibilidade e a resistência da ponte de Wheatstone. Uma das características afetadas pela temperatura é a tensão de *Offset*. A tensão de *Offset* é a tensão de saída do sensor quando não é aplicado sobre ele algum tipo de pressão. A principal causa disto ocorrer é a diferença de valores de resistência de cada piezoresistor. Outra possível causa é a existência de deformações ou *stress* provocados pelo encapsulamento do sensor e também pela incompatibilidade dos coeficientes de expansão térmicas do sensor e da membrana onde são fixados. O comportamento do *offset* em função da temperatura é determinado pelo Coeficiente Térmico de *Offset* (TCO, do inglês *Temperature Coefficient of Offset*). Esse valor é extraído variando-se a temperatura do sensor e medindo a tensão de *offset* para cada temperatura. A razão entre as duas variáveis corresponde ao TCO do sensor.

2.4.1 Avaliação dos sinais de medida

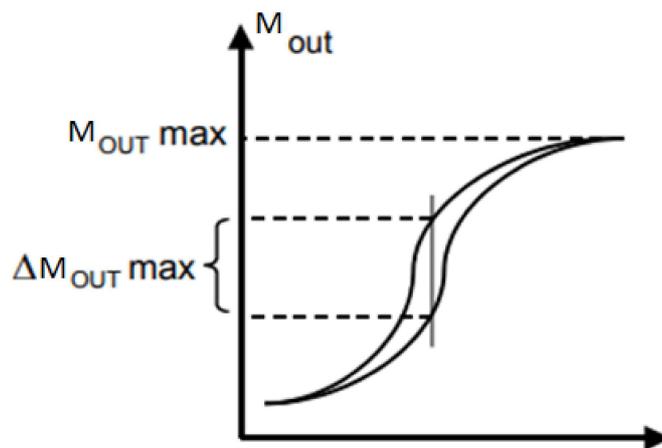
As características do sensor devem estar dentro de parâmetros industriais, para que possam ser utilizados em sistemas de controle e automação de processos. Além disso, há uma demanda para que eles sejam compactos, confiáveis, de baixo custo e de alta reprodutibilidade para a produção em massa. A caracterização do sensor ocorre estabelecendo uma relação entre o sinal de entrada do sensor e o seu sinal de saída, levando em consideração as grandezas físicas que afetam o seu funcionamento. Essa caracterização é realizada a partir de alguns conceitos básicos:

- *Sensibilidade*. Quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida. (JCGM, 2012).
- *Incerteza de medição*. Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma grandeza que se deseja medir, com base nas informações utilizadas. (JCGM, 2012).
- *Não-linearidade*. Máximo desvio da saída do sensor com relação à curva de transferência. É aplicada apenas a sensores cuja função de transferência possa ser aproximada por um polinômio de primeira ordem. Pode ser determinada de diferentes maneiras, dependendo de como se relacionem a função de transferência linear e os dados coletados. A não-linearidade (NL) da resposta de um sensor pode ser determinado pela Equação 24, onde P_{max} é a máxima pressão de trabalho do sensor, P_i é a pressão em determinado ponto de operação e $V_{out}(P_i)$ é o sinal de saída do sensor quando submetido a uma pressão P_i . (SINGH; NAYAK; NAGACHENCHIAH, 2007).

$$NL(\%) = 100 \left(\frac{V_{out}(P_i) - \frac{V_{out}(P_{max})}{P_{max}} P_i}{V_{out}(P_{max})} \right) \quad (24)$$

- *Offset*. Desvio do sinal de saída do sensor quando a entrada é zero.
- *Histerese*. Desvio máximo do valor da saída do sensor quando a medida é feita em um ponto específico de excitação e com a aproximação a esse ponto realizada em sentidos opostos, ou seja, com a grandeza física em medição aumentando e posteriormente diminuindo. A histerese é calculada como a razão da máxima diferença entre as curvas de saída sobre o máximo valor de saída. Certos tipos de histerese podem causar um tipo similar de incerteza. A indicação de um instrumento de medida pode diferir por um valor fixo e conhecido caso as leituras sucessivas sejam crescentes ou decrescentes. Dessa forma, é importante tomar nota da direção das sucessivas leituras e fazer as correções apropriadas. Entretanto, a direção da histerese não é sempre observável. Pode haver oscilações ocultas do instrumento, de modo que a indicação dependa da direção pela qual o ponto de equilíbrio é alcançado. A figura 12 apresenta uma curva de histerese típica. A equação 25 demonstra como é determinada a histerese máxima do sensor, em que M é a grandeza que está sendo medida.

Figura 12 – Curva típica de histerese



Fonte: Garcia (2006)

$$\text{Histerese máxima} = \frac{\Delta M_{outmax}}{M_{outmax}} \quad (25)$$

- *Resolução*. Menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente (JCGM, 2012).
- *Span*. É definido como a variação do sinal de saída do sensor do início da escala de medição até o seu fim de escala. (JCGM, 2012).

Não é possível determinar os valores exatos das contribuições ao erro de um resultado de uma medição (JCGM, 2008). No entanto, as incertezas associadas aos efeitos aleatórios e sistemáticos que contribuem para o erro podem ser avaliadas. Mesmo que as incertezas avaliadas sejam pequenas, ainda assim não há garantia de que o erro no resultado da medição seja pequeno. Isto ocorre devido ao fato de que um efeito sistemático pode ter passado despercebido por não ter sido reconhecido como tal. Assim, a incerteza de um resultado de uma medição não é necessariamente uma indicação de o quanto o resultado da medição está próximo do valor que se deseja medir, mas uma estimativa de o quanto se está próximo do melhor valor consistente com o conhecimento atualmente disponível. Geralmente, essa incerteza de medição é avaliada utilizando-se um modelo matemático da medição e a lei de propagação da incerteza. Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza, que varia aleatoriamente e para qual um certo número (n) de observações independentes q_k são obtidas sob as mesmas condições de medição é a média aritmética \bar{q} . Essas observações individuais independentes diferem em valor, dependendo de variações aleatórias nas grandezas de influência ou de efeitos aleatórios. A estimativa do desvio padrão da distribuição de probabilidade das observações é denominada de desvio padrão experimental $S(q_k)$. Esse parâmetro caracteriza a

variabilidade dos valores observados, ou mais especificamente, sua dispersão em torno de sua média. A equação 26 determina o cálculo do desvio padrão experimental.

$$S(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (26)$$

A esse método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações dá-se o nome de avaliação de incerteza do Tipo A. Já o método de avaliação de incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações é chamada de avaliação de incerteza do Tipo B. Assim, uma incerteza Tipo A é obtida a partir de uma função de densidade de probabilidade derivada de uma distribuição de frequência observada (JCGM, 2008). Uma incerteza do Tipo B, por sua vez, é obtida de uma suposta função densidade de probabilidade, baseada no grau de credibilidade de que um evento possa ocorrer. A incerteza do Tipo B está comumente associada a instrumentos de medição, dados fornecidos em certificados de calibração e incertezas atribuídas aos dados de referência fornecidos por fabricantes, que descrevem os equipamentos envolvidos nas medidas. A combinação das incertezas padrão é denominada de incerteza padrão combinada e ela é determinada pela raiz quadrada positiva do somatório das incertezas Tipo A e Tipo B.

2.5 Deformação de Membranas Finas

Os sensores de pressão de diafragma funcionam através da mudança de resistividade do elemento piezoresistivo que está fixado sobre a membrana diafragma, quando esta sofre uma flexão em função da pressão aplicada. Quando se deseja aumentar a sensibilidade do sensor, diminui-se a espessura do diafragma com o objetivo de maximizar a flexão sobre o diafragma. Por outro lado, um diafragma com espessura fina e sujeito a altas pressões pode sofrer com efeitos não lineares indesejados. Sendo assim, é importante caracterizar a relação entre a espessura do diafragma, a deflexão sofrida e sua linearidade, a fim de estabelecer um projeto de sensor de pressão eficaz. (LIN; CHU; LU, 1999).

De acordo com Lin, Chu e Lu (1999), é possível realizar a análise da deformação do diafragma através de simulação numérica ou também através de soluções analíticas, sendo essas mais preferíveis no *design* do diafragma do sensor. Comumente se utilizam diafragmas quadrados ou redondos, em função de sua construção simples. Na mecânica clássica soluções analíticas podem ser aplicadas para determinar a relação entre pressão e deflexão em lâminas de material isotrópico, homogêneo e linearmente elástico. (SHABY, 2006). A análise de sensibilidade dos dispositivos é baseada na teoria de deflexão de pequenas lâminas. Segundo Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959), um diafragma pode ser considerado fino se o comprimento da membrana tem uma dimensão maior do que vinte vezes a sua espessura. Além disso, a teoria de deflexão em pequenas membranas assume que a sua máxima deflexão seja inferior a 20% de sua espessura.

O formato da deformação da membrana depende do momento de torção, que atua principalmente nas bordas da membrana. Para o caso de um diafragma circular com as bordas fixas, que sofre pequenas deflexões e com carga uniformemente distribuída ao longo de toda a sua superfície, a deformação do diafragma será igualmente distribuída em todos os pontos equidistantes ao centro da membrana. Dessa forma, Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959) determina que a tensão radial (σ_r) e circunferencial (σ_θ) da membrana em função da pressão que é aplicada sobre ela pode ser descrita pelas equações 27 e 28.

$$\sigma_r = \frac{-3Pa^2(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left(1 - \frac{3r^2}{a^2}\right) \quad (27)$$

$$\sigma_\theta = \frac{-3Pa^2(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad (28)$$

Onde P é a pressão aplicada sobre a membrana, E é o módulo de Young e ν é a constante de Poisson. A espessura do diafragma é representado por h e o raio é a . As variáveis r e θ representam as direções radial e circunferencial, respectivamente.

Outra informação importante é o deslocamento sofrido pelo diafragma ao longo do eixo Z . A equação 29 determina a deformação do diafragma para cada posição.

$$w = \frac{12Pa^4(1-\nu^2)}{64Eh^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (29)$$

Sendo que a máxima deformação que o diafragma sofre ocorre exatamente no centro de sua circunferência. Dessa forma, simplificando a equação 29, o deslocamento máximo referente à deformação da membrana é representada pela equação 30.

$$w_{max} = \frac{12Pa^4(1-\nu^2)}{64Eh^2} \quad (30)$$

Para esse caso de estudo em específico, como as bordas estão fixas, a inclinação de deflexão da superfície, na direção radial deve ser zero para os casos em que $r = 0$ e $r = a$. (TIMOSHENKO; WOINOWSKY-KRIEGER, 1959). A inclinação de deformação (φ) é determinada pela equação 31.

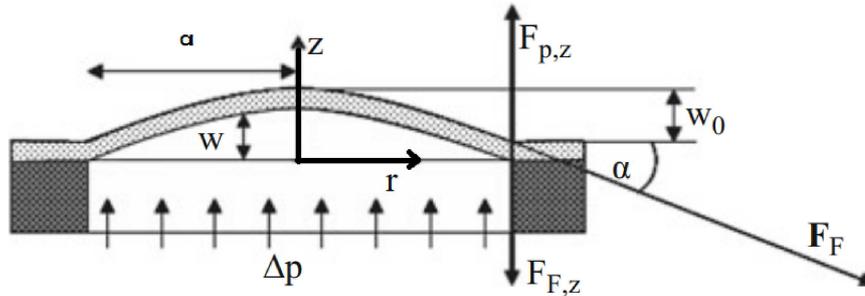
$$\varphi = \frac{Pr}{16D}(a^2 - r^2) \quad (31)$$

Em uma membrana submetida a um diferencial de pressão constante (ΔP), pode ser determinada a relação entre a deformação da membrana e a pressão aplicada, através do equilíbrio de forças nas bordas da membrana. O valor absoluto da força que atua sobre a membrana (F_P) é o produto da diferença de pressão e da sua área. Essa força gerada pela pressão é contrabalaneada pela força lateral (F_F), que fixa a membrana na sua estrutura lateral. Como pode ser verificado na

figura 13, as componentes verticais das forças F_P e F_F , permanecem em equilíbrio. A equação 32 estabelece essa relação de equilíbrio entre ambas forças.

$$F_{P,z} = \Delta P \pi a^2 = -F_{F,z} = -2\sigma h \pi a \sin(\alpha) \quad (32)$$

Figura 13 – Seção transversal da membrana contendo as forças envolvidas



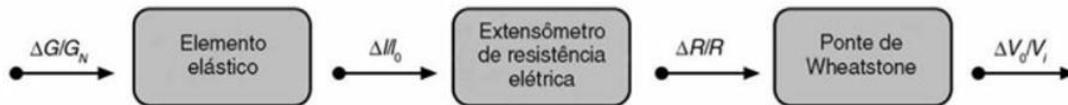
Fonte: Schomburg (2011)

2.6 Considerações de Projeto

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2000), o projeto de um sensor de pressão pode ser dividido em duas etapas: mecânica e elétrica. Segundo os autores, para realizar o projeto mecânico é possível utilizar um método analítico, em que se utilizam equações deduzidas da área de resistência dos materiais, ou então um método numérico, muito utilizado em casos em que a geometria é complexa. No projeto mecânico, primeiramente deve-se definir a forma geométrica da membrana que sofre a deformação, levando em consideração a grandeza que se deseja medir.

Esse sistema mecânico recebe os elementos sensores piezoresistivos, que são alocados em pontos estratégicos de forma a produzir um campo de deformação proporcional à grandeza física que se deseja medir, que é transmitido ao sensor piezoresistivo. Segundo Balbinot e Brusamarello (2000), o projeto de um sensor de pressão piezoresistivo apresenta etapas distintas desde o seu estímulo até a sua resposta. O estímulo mecânico ($\Delta G/G_M$) provoca deformações relativas no elemento elástico ($\Delta l/l_0$), que por sua vez, provoca variações relativas da resistência inicial dos elementos piezoresistores ($\Delta R/R$), que estão colados na superfície do elemento elástico. As variações das resistências produzem um desbalanço na saída da ponte de Wheatstone ($\Delta V_0/V_i$). Essas etapas podem ser visualizadas na figura 14.

Figura 14 – Etapas de transdução de um sensor de pressão piezoresistivo



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2000)

Segundo Meti, Balavald e Sheeparmatti (2016), durante o projeto de um sensor de pressão alguns critérios e cuidados devem ser tomados para garantir a integridade e funcionalidade do sensor. De acordo com Hoffmann (2012), dificilmente o projeto atende integralmente os requisitos desejados. Dessa forma é fundamental que ocorra um estudo preliminar antes do início das medições experimentais para prevenir erros e chegar a bons resultados. Faz-se necessário analisar a proposta de problema e os requisitos do sistema em estudo. Sendo assim, o autor destaca que dois requisitos devem ser preenchidos:

- O problema de medição deve possuir um objetivo bem definido e com os detalhes do processo e suas condições de contorno conhecidos;
- As características do piezoresistor devem ser conhecidas.

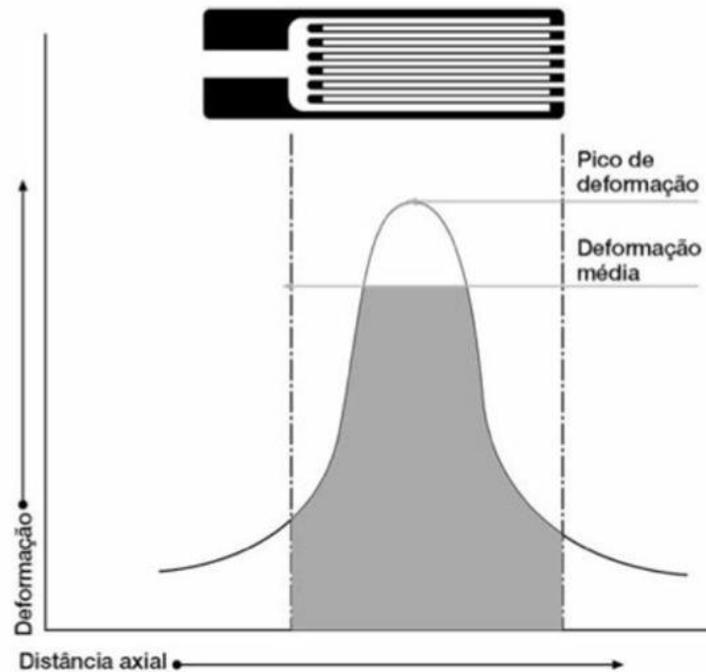
Tanto quanto possível, o conhecimento do ambiente de trabalho a que o sensor está submetido e todas as condições que podem afetar a medição são informações importantes para o sucesso do projeto. Muitas vezes, todos os efeitos e interferências não se manifestam simultaneamente no funcionamento do sensor. Portanto, devem ser tratadas todas as interferências e efeitos efetivamente relacionadas às condições de trabalho da aplicação, podendo ser relevadas as demais influências.(HOFFMANN, 2012).

Segundo Hoffmann (2012), um dos primeiros critérios que deve ser observado é o espaço disponível no objeto de medição para a alocação dos piezoresistores, de forma que os elementos piezoresistivos devam possuir um tamanho adequado para a sua aplicação. O autor ainda relata a importância de enfatizar que é equivocado o entendimento de que a sensibilidade de um piezoresistor é dependente do seu tamanho. A sua sensibilidade é proporcional ao seu alongamento relativo e não ao alongamento absoluto. Desse modo, o alongamento absoluto não possui efeito sobre a sensibilidade do sensor.

Por outro lado, o comprimento da área ativa de medição do sensor piezoresistivo é um parâmetro muito importante para o seu desempenho. De acordo com Balbinot e Brusamarello (2000), muitas vezes as medidas de deformação mecânicas são executadas em um ponto crítico das estruturas ou partes mecânicas. Sabe-se, porém, que existe uma distribuição de tensões em torno de um ponto máximo. Contudo, quando um elemento piezoresistivo é aplicado em uma região, o seu sinal de saída corresponde à integração ou à média da distribuição desses pontos

sobre a região de medição ativa. Isso faz com que a medição resulte sempre em um valor inferior ao pico máximo de deformação. De forma que quanto maior for a área ativa de medição do sensor, menor será sua resposta em relação ao máximo valor de deformação. A figura 15 mostra a média de distribuição das tensões sobre a área ativa do sensor piezoresistivo.

Figura 15 – Média de distribuição das tensões sobre a área ativa do sensor piezoresistivo.



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2000)

De acordo com Smith (1972), um potencial problema que pode surgir, principalmente durante o processo de fabricação do sensor de pressão é o desalinhamento dos piezoresistores. O posicionamento equivocado dos elementos sensores pode causar um erro de medição, assim como afetar a sensibilidade do sensor.

Outro ponto que deve ser avaliado é o limite de escoamento da membrana em que os sensores piezoresistivos estão posicionados. O limite de escoamento, segundo Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959), é caracterizado como sendo o ponto em que a deformação sofrida pelo material deixa de ser elástica e passa a ser plástica. Quando ocorre uma deformação que não excede o limite de escoamento do material, ele retorna ao seu tamanho original após ser removida a tensão aplicada. No momento em que é ultrapassado o limite de escoamento, o material da membrana passa a sofrer uma deformação plástica, deformando-a permanentemente e de forma irreversível. (METI; BALAVALD; SHEEPARMATTI, 2016).

A existência de uma deformação plástica na membrana que compõe o sensor de pressão faz com que a sua medição fique comprometida, visto que o elemento piezoresistor permanece constantemente sob uma deformação que não possui mais relação com a deformação sofrida

pela membrana. Portanto, a máxima pressão de operação (P_b) a que o sensor deve ser submetido não pode exceder o limite de escoamento do material que compõe a membrana. Para determinar a máxima pressão que a membrana pode suportar sem ultrapassar o seu limite de escoamento deve-se levar em consideração inúmeros fatores, como o formato da membrana, o seu material, a espessura, limite de escoamento do material e rugosidade da superfície. (METI; BALAVALD; SHEEPARMATTI, 2016). Segundo Meti, Balavald e Sheeparmatti (2016), a máxima pressão que uma membrana circular fabricada de material dúctil pode ser submetida é definida por 33, onde F_{Max} é o limite de escoamento do material da membrana, A é a área do diafragma e h é a espessura do diafragma.

$$P_b = \frac{3,4F_{Max}h^2}{A(1 - \nu^2)} \quad (33)$$

Além do limite de escoamento da membrana, a deformação provocada por ela não pode ser maior do que o limite de deformação que o elemento piezoresistor suporta. Uma deformação maior do que o tolerável pelo elemento piezoresistor pode ocasionar fraturas no seu corpo que comprometem a medição do sensor de forma permanente. (METI; BALAVALD; SHEEPARMATTI, 2016). Nota-se então, que existe um limite de deformação tanto para o material da membrana quanto para o elemento piezoresistor. Eles podem apresentar valores distintos e ambos devem ser respeitados.

Hoffmann (2012) relata ainda outro efeito existente em piezoresistores utilizados na medição de deformações mecânicas. Esse efeito é denominado de *creep* e é caracterizado por uma mudança na resistência do piezoresistor que ocorre com a passagem do tempo, mesmo ele sendo submetido a uma deformação constante. Os parâmetros que determinam as características de *creep* em um piezoresistor são inúmeros e complicados, necessitando levar em consideração a área de medição ativa do piezoresistor, o seu material, o tipo de adesivo, espessura do adesivo, temperatura e umidade. (HOFFMANN, 2012) destaca que o nível de *creep* só pode ser determinado pela combinação de piezoresistor e adesivo, e nunca levando em consideração somente o piezoresistor.

De acordo com Hoffmann (2012), a grande maioria das publicações tratam o efeito de *creep* como sendo um parâmetro prejudicial ao seu funcionamento. No entanto, medições precisas exigem um determinado nível de *creep* presente em seu funcionamento. Essa explicação está relacionada ao fato de que quando é aplicado uma tensão constante sobre um material dúctil, a sua deformação é descrita pela Lei de Hooke. Como resultado, o material sofre uma deformação elástica espontânea que é seguida por uma deformação adicional dependente do tempo. Essa deformação adicional causa um erro de medição dependente do tempo, que pode ser relevante em aplicações de alta precisão. Essa deformação adicional e o efeito *creep* sobre o piezoresistor possuem comportamentos muito semelhantes, porém com orientação oposta. Enquanto essa deformação adicional possui uma variação positiva na deformação resultante, o *creep* possui um sinal negativo. Portanto, é possível fazer com que a intensidade dos dois

fenômenos coincidam, eliminando o efeito de ambos sobre a medição final. (HOFFMANN, 2012) relata que atualmente o nível *creep* obtido na grande maioria das aplicações é muito baixo, sendo muitas vezes aumentado de forma proposital para realizar a compensação da deformação adicional do material elástico.

De acordo com Meti, Balavald e Sheeparmatti (2016), outra importante consideração que deve ser observada durante o projeto de sensores de pressão piezoresistivos é a dimensão do diafragma. É extremamente importante escolher com muito cuidado a espessura e o tamanho do diafragma de forma a obter uma boa resposta em sua saída. O autor relata que sensores de pressão com diafragmas mais finos possuem melhor sensibilidade. No entanto, de acordo com o estudo de Lin, Chu e Lu (1999), quanto mais fina for a membrana, maior é o erro de linearidade que as suas medições apresentam. Os resultados apresentados pelo autor demonstram que uma membrana mais fina apresenta o efeito da histerese de forma mais intensa, comprometendo a linearidade da deformação da membrana. Já os diafragmas mais espessos possuem a vantagem de apresentarem maior linearidade, mas, por outro lado, exigem uma pressão maior para excitá-los a ponto de sensibilizar os piezoresistores que estão fixados a ele.

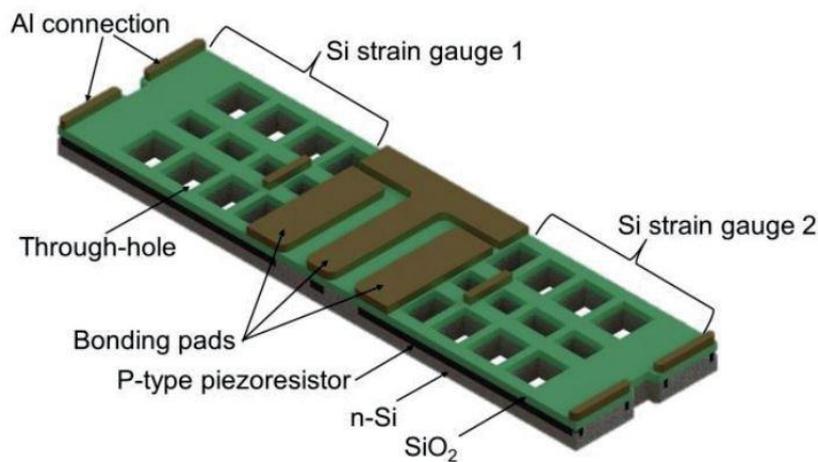
2.7 Trabalhos Correlacionados

Zhang et al. (2012) relata a proposta de um sensor de pressão utilizando sensores piezoresistivos fabricados em silício que são fixados sobre uma membrana de aço inoxidável. A fixação dos sensores é realizada através de um material contendo vidro com baixo ponto de fusão. A conexão dos terminais dos sensores piezoresistivos é realizada através do processo de solda com fios de ouro, que possibilita a ligação elétrica à placa de aquisição de medidas. Ao avaliar a fixação do sensor utilizando o material contendo vidro, o autor conclui que o efeito de desgaseificar foi minimizado e também foram obtidos resultados de erro por histerese e repetibilidade inferiores que a maioria dos adesivos com base epóxi.

No trabalho de Ham et al. (2015) é apresentado uma proposta de projeto, fabricação e encapsulamento de um sensor de alta pressão utilizando elementos piezoresistivos de silício fixados em uma membrana metálica. Essa proposta de trabalho assemelha-se ao estudo de Zhang et al. (2012). Ambos trabalhos apresentam um *design* do elemento piezoresistivo que possui furos no seu corpo, foram criados com o objetivo de minimizar o deslocamento da sua posição durante a cura do material adesivo. O material utilizado para realizar a fixação do sensor na membrana metálica tem como base vidro com ponto de fusão em baixa temperatura. Segundo Ham et al. (2015), uma das principais desvantagens da utilização desse tipo de material adesivo é justamente o desalinhamento dos elementos sensores durante o seu processo de cura. Em função da sua viscosidade durante o processo de cura, os sensores acabam sendo deslocados ou rotacionados. O objetivo desses furos ao longo do corpo do piezoresistor é justamente minimizar esse deslocamento. A posição e alinhamento dos sensores é uma condição muito importante, pois afeta diretamente a sensibilidade do sensor e o rendimento do processo produtivo.

O *design* do sensor proposto por Ham et al. (2015) incorpora uma meia ponte de Wheatstone em uma mesma peça. Essa peça possui dois sensores piezoresistivos fabricado em silício conectados em série, contendo diversos furos em seu corpo. A figura 16 apresenta a estrutura do sensor desenvolvido, podendo ser observados os furos ao longo do seu corpo.

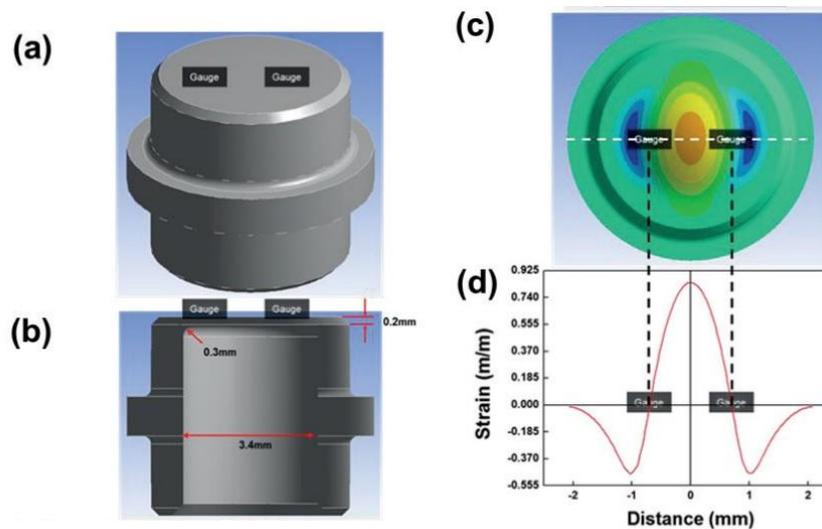
Figura 16 – Estrutura do sensor proposto por Ham et al. (2015)



Fonte: (HAM et al., 2015)

O sensor apresentado na figura 16 foi desenvolvido para ser fixado em uma estrutura de metal que sofre deformação de acordo com a pressão que é aplicada a ela. Para isso foi realizado o projeto de um diafragma construído de aço inoxidável com uma geometria projetada para otimizar o seu desempenho. A estrutura metálica pode ser visualizada na figura 17. Na mesma figura é possível verificar a deformação radial da membrana, em que se pode observar que ela ocorre em maior intensidade no centro do diafragma, onde possui a característica de haver um esforço de tração. Em seguida começa a decrescer rapidamente à medida que o raio aumenta. Existe um ponto onde a deformação é zero e logo ela passa a aumentar, porém com um esforço de compressão. A máxima deformação por compressão ocorre próximo da borda do diafragma.

Figura 17 – Estrutura da membrana do sensor proposto por Ham et al. (2015)



Fonte: Ham et al. (2015)

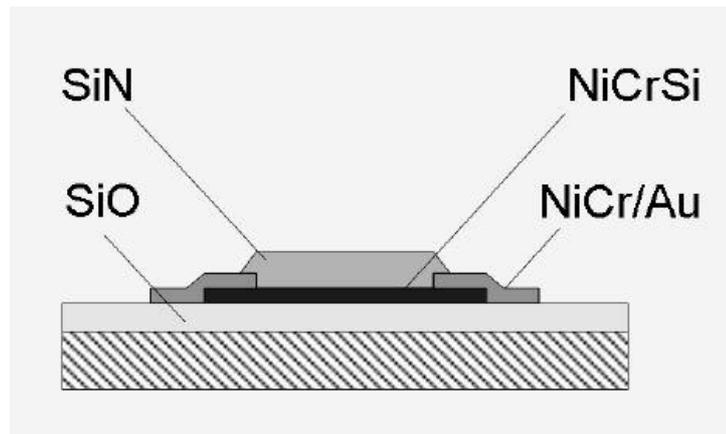
Segundo Ham et al. (2015), normalmente o posicionamento dos sensores piezoresistivos ocorre nos pontos de máxima deformação de tensão e compressão. Esses pontos são importantes, pois é possível obter a máxima sensibilidade da célula de medição ao posicionar os sensores nesses locais. No entanto, como o sensor projetado é composto por uma meia ponte de Wheatstone em uma mesma peça e uma parte dela deve sofrer um esforço de compressão e a outra de tensão, o sensor deve ser posicionado no ponto de inflexão da membrana. Este é o ponto em que metade do sensor sofre compressão e a outra metade sofre tensão.

Apesar de o sensor proposto por Ham et al. (2015) utilizar uma menor quantidade de dispositivos para serem fixados sobre a membrana, os sensores são posicionados em um local em que a deformação da membrana é de menor intensidade. Isso diminui a sensibilidade do sensor e não aproveita os locais onde ocorrem as maiores deformações. Na caracterização e teste do sensor, Ham et al. (2015) relata que o sinal de saída do sensor em função da pressão aplicada na estrutura metálica comportou-se de forma linear. A resposta do sensor não sofreu variação significativa quando o teste foi submetido a diferentes temperaturas de trabalho, além disso apresentou baixa não linearidade.

Em estudo apresentado por Stoetzler et al. (2007), é apresentado um projeto de sensor para alta pressão baseado na tecnologia de filmes finos sobre metal (MTF, do inglês *Metal Thin Film*). A proposta de sensor tem como aplicação a área automotiva, porém o autor relata que ela pode ser utilizada para outras aplicações. Segundo o autor, o principal desafio dos sensores de pressão para aplicações automotivas é atingir um baixo custo, alto volume de produção e ao mesmo tempo um produto de alta qualidade. Na face superior do sensor é realizado um processo de limpeza e polimento, que prepara a superfície para as próximas etapas de deposição. Primeiramente é realizada a deposição de uma camada isolante de óxido de silício sobre a

superfície de metal do sensor. Em seguida quatro elementos piezoresistivos de NiCr(Si) são depositados, formando uma ponte de Wheatstone. A próxima etapa consiste na deposição de uma camada de Au/NiCr, que tem o objetivo de ser o contato elétrico para a etapa de solda de fios. Por fim, uma camada de nitreto de silício (SiN) é aplicada para proteger o sensor contra corrosão e umidade. A figura 18 mostra o sensor e as camadas utilizadas para construí-lo.

Figura 18 – Descrição das camadas do sensor proposto por Stoetzler et al. (2007)

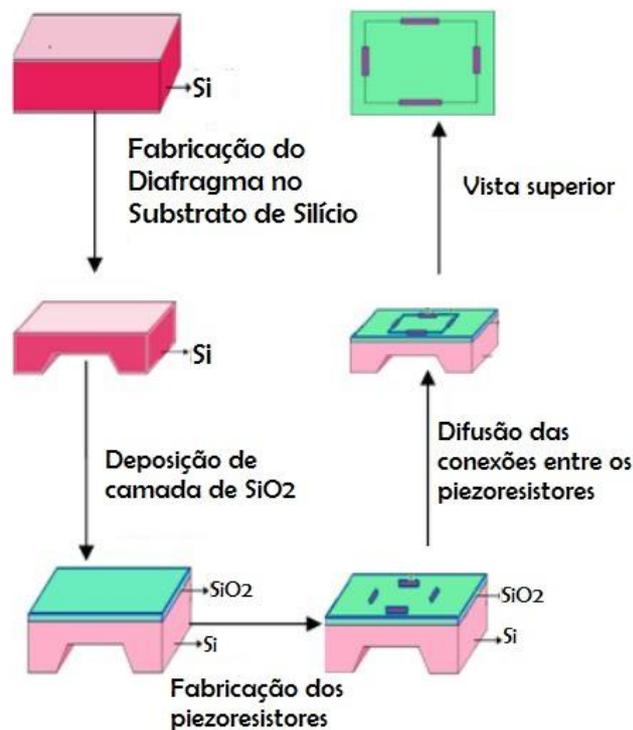


Fonte: Stoetzler et al. (2007)

A técnica de construção do sensor de pressão por MTF reduz alguns efeitos presentes na técnica de fixação dos elementos piezoresistivos através de adesivos, tais como *creeping*, histerese e imperfeições no processo de adesão. Segundo o autor, uma das vantagens da utilização de MFT utilizando NiCr(Si) como elemento piezoresistor é a linearidade do sensor e a baixa influência da temperatura.

Segundo Meti, Balavald e Sheeparmatti (2016), atualmente muitos dos sensores de pressão disponíveis no mercado utilizam o conceito de MEMS, baseado no mecanismo de transdutor piezoresistivo. Segundo o autor, o projeto típico de fabricação de um MEMS sensor de pressão piezoresistivo é feito utilizando uma lâmina de silício com orientação cristalina $\langle 100 \rangle$, em que é construída uma membrana através do processo de corrosão anisotrópica por KOH. Em seguida é depositada uma camada isolante de dióxido de silício sobre a face superior da lâmina de silício, que passou anteriormente pelo processo de corrosão por KOH. A próxima etapa consiste em aplicar os sensores piezoresistivos, construídos normalmente de polisilício, sobre os locais determinados da membrana. Para realizar a ligação elétrica entre os quatro sensores piezoresistivos dispostos na membrana, é realizada a difusão de silício p-, de forma a confeccionar uma ponte de Wheatstone sobre a membrana. (METI; BALAVALD; SHEEPARMATTI, 2016). A figura 19 descreve as etapas de fabricação de um MEMS para aplicação de medição de pressão.

Figura 19 – Descrição das etapas de fabricação de um sensor de pressão MEMS típico

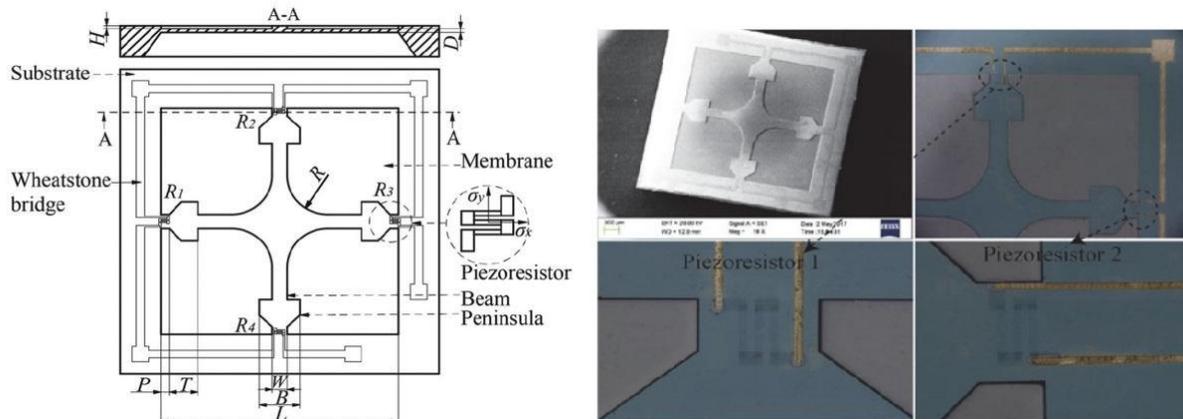


Fonte: Meti, Balavald e Sheepparmatti (2016)

Muitos avanços na tecnologia de medição de pressão ocorreram em função desses novos dispositivos, tornando os sensores de pressão cada vez mais sofisticados. Atualmente, os projetos de sensores de pressão piezoresistivos variam muito entre si, mas uma grande parcela vem empregando o uso do próprio silício como elemento elástico. Além do mais, até mesmo os projetos das membranas estão se tornando mais sofisticados, incorporando novas estruturas e formatos que possuem o objetivo de aumentar a sensibilidade e diminuir as não-linearidades.

Um exemplo da evolução dos projetos de membranas destinadas a sensores de pressão MEMS produzidos em silício pode ser verificado no trabalho apresentado por Tran, Zhang e Zhu (2018). O autor apresenta uma metodologia de projeto e fabricação de um sensor de baixa pressão piezoresistivo contendo uma membrana denominada de CBMP (*cross-beam membrane and peninsula*). O projeto de sensor prioriza o aumento da sensibilidade do dispositivo, que ao comparar com os projetos de diafragmas tradicionais, mostra um significativo aumento de sensibilidade em conjunto com a redução do erro de não-linearidade. A figura 20 apresenta o projeto de membrana apresentado pelo autor. A membrana possui um formato quadrado com 2,9 mm em cada lateral e uma espessura de 18 μm . A faixa de medição de pressão do sensor é de 0 a 5 kPa.

Figura 20 – Proposta de membrana desenvolvida por Tran, Zhang e Zhu (2018)



Fonte: Tran, Zhang e Zhu (2018)

Os resultados dos testes do sensor desenvolvido por Tran, Zhang e Zhu (2018) demonstraram que o sensor obteve uma sensibilidade máxima de $25,7 \text{ mV/kPa}$ e um erro de não-linearidade de $-0,28 \%FSS$. Ao comparar esses resultados com outros projetos com aplicação semelhante e formato de membrana diferente, é possível verificar que o projeto apresentado por Tran, Zhang e Zhu (2018) obteve resultados consideravelmente superiores.

3 MATERIAIS, FERRAMENTAS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os métodos, materiais, ferramentas e procedimentos empregados para perfazer os objetivos propostos desse estudo. É descrita a metodologia adotada em todas as etapas de elaboração do teste de conceito do sensor de pressão piezoresistivo.

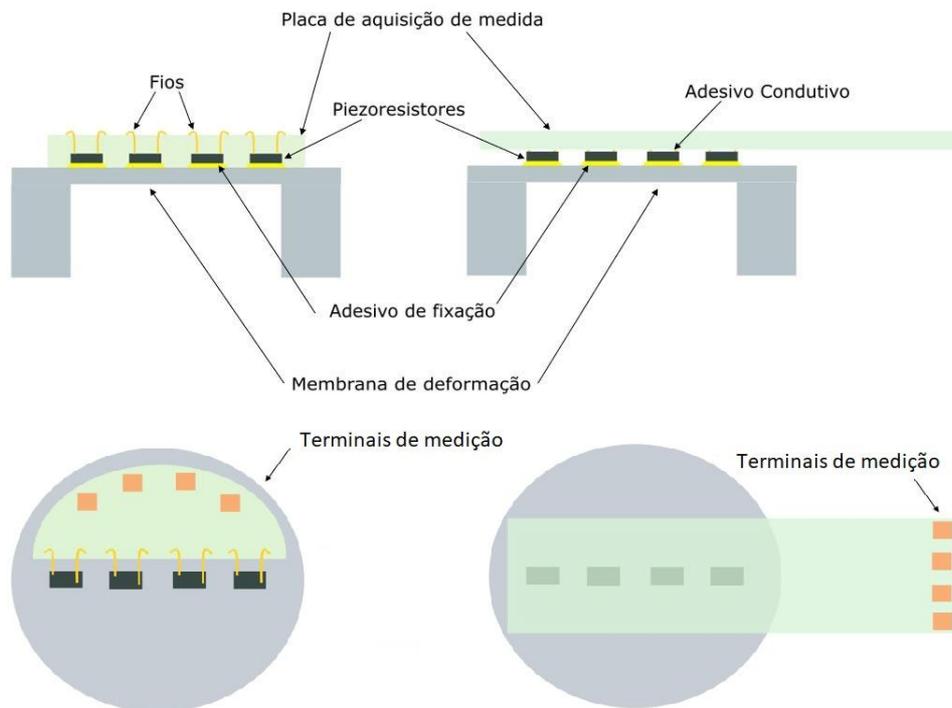
3.1 Proposta de pesquisa

De acordo com os assuntos abordados nas seções anteriores, os sensores de pressão já são e vão continuar sendo uma área de constantes pesquisas. Não só nas aplicações difundidas e conhecidas atualmente, como na área industrial, mas também em novas finalidades e aplicações. Conseqüentemente, é válido e fundamental explorar, aprimorar e até mesmo contribuir para o desenvolvimento dessa área tecnológica.

A proposta de sensor de pressão que será desenvolvida e implementada durante a realização do projeto tem como base o fenômeno da piezoresistividade como princípio de medição. Ou seja, o sensor em estudo consiste em um sensor de pressão piezoresistivo. O sensor, por sua vez possui dois componentes principais: a estrutura mecânica suscetível à deformação mecânica (proporcional à pressão aplicada ao sensor) e os elementos piezoresistivos que transformam a deformação mecânica da membrana em um sinal elétrico mensurável.

Um projeto e análise da membrana de deformação deve ser desenvolvido com objetivo de avaliar o comportamento da membrana quando submetida em diferentes faixas de pressão. Esse estudo também proporcionará o melhor posicionamento dos elementos piezoresistivos sobre a membrana, buscando obter a sua melhor relação de deformação. Essa membrana de deformação deve ser construída de metal e os piezoresistores são fixados de forma precisa sobre ela através de adesivo. O adesivos a serem utilizados para a fixação dos piezoresistores serão objetos de estudo, de forma que os piezoresistores obtenham o melhor desempenho, transferindo a máxima deformação da membrana a eles. No que diz respeito ao método de conexão elétrica que será empregado nos piezoresistores, serão estudadas duas diferentes formas de conexão elétrica. A primeira delas utiliza a tecnologia de solda de fios de ouro para conectar os terminais de contato do dispositivo aos terminais da placa de aquisição dos dados do sensor. O segundo método a ser empregado utiliza a tecnologia de adesivos condutivos para realizar a conexão elétrica dos terminais dos elementos piezoresistivos à placa flexível de aquisição de dados. De acordo com a avaliação do desempenho do sensor, será verificada a necessidade da implementação de *Stup Bump* nos terminais dos piezoresistores, de forma a garantir um bom contato elétrico. A figura 21 ilustra os dois métodos de conexão elétrica que serão abordados durante o desenvolvimento do trabalho. Além das características elétricas de cada um dos métodos, será avaliado o processo produtivo de cada um deles e suas implicações.

Figura 21 – Propostas de conexão elétrica dos piezoresistores



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.1 Fixação dos Sensores de Deformação

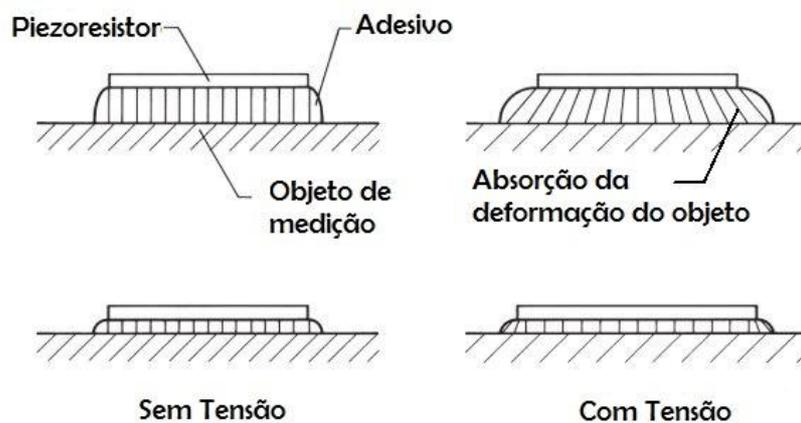
De acordo com Hoffmann (2012), os materiais utilizados na fixação de piezoresistores em aplicação de medição de deformação possuem a função de transferir a deformação sofrida pelo material em análise ao piezoresistor, com as menores perdas possíveis. A utilização de adesivos é o método mais utilizado atualmente, mas também podem ser utilizados solda e materiais cerâmicos para realizar a fixação. Segundo o autor, as principais vantagens do uso de adesivos são:

- Possibilita a fixação entre materiais diferentes;
- Dependendo do adesivo pode ser curado em temperaturas baixas;
- Possuem baixa absorção de umidade.

A força que deforma o piezoresistor é transferida do objeto que está sofrendo a deformação através de uma fina camada de adesivo. Em função da característica de elasticidade que os adesivos possuem, pode ocorrer uma distorção dessa camada, que é maior nas bordas e menor no centro do piezoresistor. Quando se utiliza adesivos flexíveis com camadas espessas, ocorre uma grande distorção, o que afeta a transferência da deformação ao piezoresistor, fazendo com que o

piezoresistor sofra uma deformação inferior à deformação sofrida pelo objeto. (HOFFMANN, 2012). A figura 22, mostra a aplicação de adesivo para dois piezoresistores, em que no primeiro caso foi utilizada uma camada espessa de adesivo e no segundo uma camada fina. As linhas verticais no adesivo representam a direção dos planos transversais do estado sem tensão. Quando o objeto sofre uma deformação, ao se utilizar uma camada espessa de adesivo, observa-se que as linhas passam a inclinar-se progressivamente em direção às bordas. Isso indica que o adesivo não está transferindo totalmente a deformação sofrida pelo objeto, o que é algo indesejado.

Figura 22 – Distorção da camada de adesivo



Fonte: Hoffmann (2012)

Quando se utilizam adesivos que apresentam uma dureza maior após a cura, juntamente com aplicação de uma fina camada, a distorção provocada pelo adesivo é muito menor, como pode ser observado pela figura 22. A adesão entre os componentes depende da capacidade de adesão do adesivo em cada uma das superfícies. Hoffmann (2012) relata que a adesão resultante da quantidade de adesivo que adere aos poros da superfície do material não é muito relevante. É possível aumentar consideravelmente essa adesão em função de uma rugosidade moderada da superfície, o que resulta em uma maior área de contato.

Quanto ao processo de aplicação, os adesivos utilizados na fixação de piezoresistores podem ser classificados de duas formas, adesivos de cura a frio e adesivos de cura a quente. Os adesivos de cura a frio são de fácil aplicação e, como o próprio nome já diz, a cura ocorre em temperatura ambiente. Esses adesivos podem ser compostos por um único material, que é o caso dos adesivos de cura por supressão de ar, por exemplo. Existem também os adesivos compostos por dois materiais que devem ser misturados antes de serem aplicados. Esses adesivos são chamados de adesivos rápidos em função de curto tempo de reação. Adesivos de cura a quente só podem ser utilizados quando o objeto e/ou piezoresistor podem ser submetidos à temperatura de cura do adesivo. Esse tipo de adesivo possibilita uma gama maior de aplicação e uma maior faixa de temperatura de trabalho se comparado com os adesivos de cura a frio.

Muitas vezes é mencionada a utilização de adesivos para fixação dos piezoresistores que possuem a características de serem bons condutores térmicos, com o objetivo de garantirem uma boa dissipação térmica no dispositivo. No entanto, nem sempre isso é um procedimento correto já que esses adesivos incorporam na sua composição elementos de preenchimento de alta condutividade, como óxido de alumínio e metais em forma de pó. Isso produz um adesivo com alta viscosidade, resultando em uma espessura de cola alta entre o piezoresistor e o objeto a que ele fica aderido, o que prejudica o desempenho e a sensibilidade à deformação do sensor. Sendo assim, é muito mais vantajoso utilizar adesivos que produzem uma fina camada e que não geram a presença de bolhas. A espessura de cola ideal nas aplicações que utilizam piezoresistores é de 2,5 μm a 7,5 μm .(VISHAY, 2010)

Para o desenvolvimento do projeto, a fixação dos sensores piezoresistivos de deformação será realizada por meio de adesivo. No entanto existem diferentes tipos de adesivos que podem ser empregados na fixação dos piezoresistores. Nesse trabalho serão avaliadas três diferentes famílias de adesivos:

- Adesivo com base epóxi;
- Adesivo com base fenólica;
- Adesivo com base de cianoacrilato.

Todas as três famílias de adesivos são implementadas em protótipo, visando encontrar a composição que resulta no melhor desempenho do sensor, tendo em vista os materiais que compõem o diafragma e o elemento piezoresistivo. Os adesivos utilizados durante os testes e nas montagens dos protótipos são descritos a seguir.

- *Adesivo DELO DA587*: O adesivo Delo DA 587 é uma resina com base epóxi livre de solvente e com cura a quente. Essa é uma resina muito utilizada para *die attach* em aplicações que utilizam a tecnologia de *smart card*. Ela possui a característica de ter um baixo tempo de cura em temperaturas baixas (na faixa de temperatura de 130 a 160 °C). Essa resina possui uma faixa de temperatura de trabalho compreendida entre -40 °C e 150 °C. A cura do adesivo DELO DA587 deve ser realizada em um forno sob uma temperatura de 150 °C, por um tempo de 5 minutos
- *Adesivo LOCTITE Ablestik 2035sc*: O adesivo LOCTITE Ablestik 2035sc é uma resina com base epóxi não condutiva livre de solvente e com cura a quente. Ela é uma resina destinada para *die attach* em aplicações que utilizam a tecnologia de *smart card*. Ela possui a característica de ter um baixo tempo de cura em temperaturas baixas, na faixa de temperatura de 110 a 150 °C. A cura do adesivo LOCTITE Ablestik 2035sc foi realizada em um forno sob uma temperatura de 120°C por 90 segundos.

- *Adesivo HBM P250-R* O HBM P250-R é um adesivo de base fenólica, cura a quente e de fácil manuseio. Essa resina possui uma grande faixa de temperatura de trabalho, podendo ser utilizada em aplicações que exigem temperaturas de trabalho que vão de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. A cura do adesivo HBM P250-R foi realizado em um forno sob uma temperatura de $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 4,5 horas. Após esse período recomenda-se uma pós cura de 1 hora a uma temperatura de $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante a cura do adesivo, deve ser mantida uma pressão sobre o piezoresistor e a base na qual ele é fixado de aproximadamente 40 N/cm^2 . Um fato observado durante os experimentos foi que a viscosidade do adesivo afeta o comportamento do adesivo após a cura. Essa viscosidade pode ser ajustada através da adição de etanol à solução. Notou-se que, para a aplicação em estudo, deixando o adesivo mais solúvel e menos viscoso, seu desempenho melhorou.
- *Adesivo Instantâneo PR-100*: O adesivo instantâneo possui como base de sua fórmula o cianoacrilato, uma resina acrílica que rapidamente se polimeriza na presença de umidade. Esse adesivo é de ação rápida, usado em aplicações industriais e domésticas. Apesar de ser um adesivo que possui uma boa adesão a materiais, ele suporta uma baixa variação de temperatura, não permitindo exceder $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. A cura do adesivo é realizada em temperatura ambiente durante cerca de 24 horas.

3.1.2 Conexão Elétrica

No processo de encapsulamento de dispositivos eletroeletrônicos, uma das principais etapas, e uma das mais importantes, é a interconexão elétrica entre o *chip* e os terminais do seu encapsulamento. Para cada conexão elétrica devem ser garantidos os parâmetros elétricos, como resistência, capacitância e indutância, de forma a certificar o desempenho elétrico do dispositivo. Em alguns casos, além de desempenho elétrico deve-se garantir a estabilidade mecânica e a dissipação térmica do componente. Para isso, existem diversas formas e combinações de processos que são capazes de assegurar o desempenho do dispositivo projetado. O estudo se propõe abordar duas tecnologias de conexão elétrica. A conexão elétrica por solda de fios e a conexão através de adesivos condutivos. Um dos objetivos em avaliar o processo de conexão elétrica através de adesivos condutivos é o de propor uma alternativa viável em que o processo de fabricação seja mais simples e tenha um custo de produção inferior ao método de solda de fios. Portanto, ambos processos serão estudados e investigados ao longo do trabalho.

3.1.2.1 Adesivos Condutivos

Os adesivos condutivos podem ser empregados em uma vasta variedade de aplicações que exigem uma boa resistência mecânica e baixa resistência elétrica na conexão entre os terminais do *chip* e os do dispositivo em que ele está sendo soldado. Esses adesivos são constituídos basicamente de um material com base de epóxi ou silicone que contém partículas de metal ou carbono.(MORRIS; LIU, 2006). Quando o adesivo está curado ele permite a passagem de

corrente elétrica através da rede de contatos criada pelas partículas condutoras. Basicamente, a condutividade elétrica da conexão está relacionada com o material das partículas, a sua quantidade, sua dimensão e formato, além do material e tamanho dos terminais do *chip*. Quanto maior o número de partículas condutoras presentes no adesivo, menor será a resistência elétrica da conexão. No entanto, deve haver um equilíbrio nessa quantidade de partículas condutoras, pois um número demasiado delas pode fragilizar a conexão sob o ponto de vista de resistência mecânica, já que afeta a propriedade do adesivo. (KRISTIANSEN et al., 2016).

Os adesivos condutivos têm sido utilizados há décadas na área de eletrônica automotiva e na montagem de *displays* de LCD. No entanto, o interesse por essa tecnologia pela indústria eletrônica vem crescendo, principalmente por restrições ao uso de substâncias e componentes tóxicos na fabricação de materiais eletrônicos. (LI; WONG, 2006). Algumas vantagens adicionais que os adesivos apresentam são:

- Possibilidade de obter dispositivos mais finos;
- Não necessita de resina *underfill* se utilizado ACA;
- Baixa temperatura de processamento;
- Permite ser aplicado a dispositivos flexíveis;
- Baixo custo.

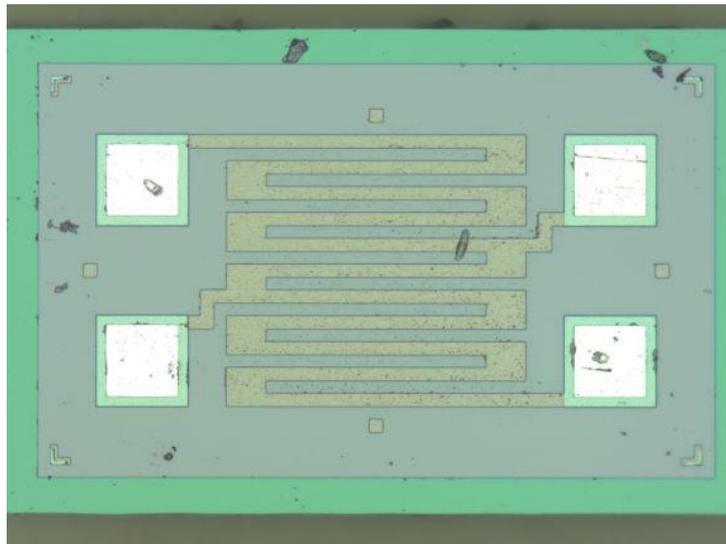
Os adesivos condutivos possuem um composto como elemento básico, sendo ele geralmente polimérico. Existem diversas composições desse elemento base que devem ser verificados de acordo com a aplicação a qual se deseja empregar o adesivo. As bases poliméricas utilizadas na fabricação de adesivos podem ser classificadas em dois grupos, os termoplásticos e os termofixos.

3.2 Sensor Piezoresistivo de Deformação

O sensor semicondutor piezoresistivo a ser utilizado no desenvolvimento do estudo é um componente fabricado integralmente com tecnologia brasileira, em parceria entre o Instituto de Tecnologia IttChip e a empresa CEITEC-SA. O sensor é fabricado sobre lâminas de silício de 150 mm do Tipo-P dopadas com Boro. As lâminas foram fabricadas pelo processo conhecido por Czochralski e possuem espessura de $625\mu\text{m}$ e orientação cristalina $\langle 1-0-0 \rangle$. Originalmente, as lâminas de silício possuem uma fina camada de óxido. Antes de serem processadas, devem passar por uma etapa de limpeza para retirar essa fina camada. Em seguida as lâminas passam por um processo em forno, criando uma camada grossa de dióxido de silício (SiO_2) de aproximadamente 850 nm. Utilizando um processo de deposição em forno (LPCVD, do inglês *Low Pressure Chemical Vapor Deposition*), é criada uma camada de polisilício de 450 nm dopado com fósforo.

Essa camada de polisilício é utilizada como elemento piezoresistivo no sensor semiconductor. No entanto, a camada de polisilício foi depositada por toda a superfície da lâmina. Em seguida, a lâmina passa por um processo de fotolitografia, em que é revelado o formato da região ativa do sensor através de exposição UV ao fotoresiste. Após a revelação, é realizada a corrosão do polisilício das regiões que não pertencem à região ativa do sensor. Após um processo de limpeza e inspeção da lâmina, ela passa pela etapa de deposição de alumínio por *sputtering*. A camada de alumínio é utilizada na construção dos terminais do dispositivo. Para remover o alumínio das regiões que não pertencem aos terminais do sensor, é realizada uma etapa de corrosão úmida do alumínio. Para definir os locais que deverão sofrer corrosão a lâmina passa novamente pela etapa de fotolitografia para gravar os locais que pertencem aos terminais do sensor. Após a corrosão do alumínio, a lâmina passa por um processo de limpeza e de recozimento. Finalizando o recozimento, inicia-se a etapa de afinamento da lâmina. O dispositivo utilizado foi afinado a uma espessura de $70\ \mu\text{m}$. Com a lâmina afinada na espessura desejada, realiza-se o corte de cada sensor presente na lâmina. Esses sensores possuem dimensões de $1 \times 0,6\ \text{mm}$. A figura 23 ilustra o elemento piezoresistivo que será utilizado no trabalho.

Figura 23 – Sensor piezoresistivo a ser utilizado no trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

Em temperatura ambiente, a resistência média que o piezoresistor apresenta, sem estar submetido à deformação, é de $3,7\text{k}\ \Omega$. No entanto, é importante salientar que em uma mesma lâmina de silício a variação de resistência dos piezoresistores pode ser superior a $300\ \Omega$, devido a não uniformidade de dopagem de silício. Além disso, ela apresenta uma resistência de folha média (R_s) média de $17\ \Omega/\square$. Através da resistência de folha é possível determinar a resistividade do material piezoresistivo de que o sensor é composto. A equação 34 estabelece a relação entre a

resistência de folha e a resistividade do material, onde t é a espessura do material.

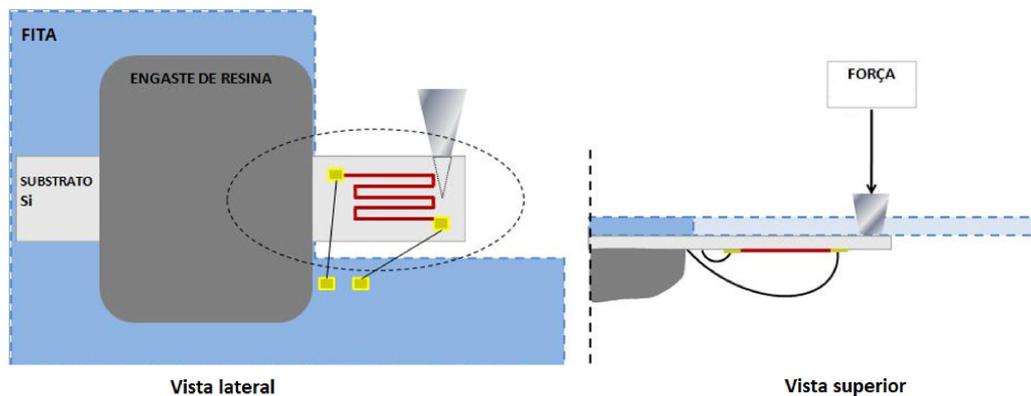
$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (34)$$

O material piezoresistivo utilizado na construção do piezoresistor de deformação (polisilício dopado com fósforo) possui uma espessura de 450 nm . Logo, pode-se determinar a resistividade do material.

$$\rho = R_s \cdot t = 7,65 \times 10^{-6} \Omega m \quad (35)$$

Como todo material piezoresistivo, a sua resistência sofre alterações de acordo com a deformação mecânica sofrida por ele. Para verificar esse comportamento da resistência do sensor piezoresistivo para diferentes deformações, foi realizado um experimento, no qual mediu-se a resistência do piezoresistor enquanto se aplicavam diferentes forças de deformação. O esquema de montagem mecânica para realizar as medidas está apresentado pela figura 24.

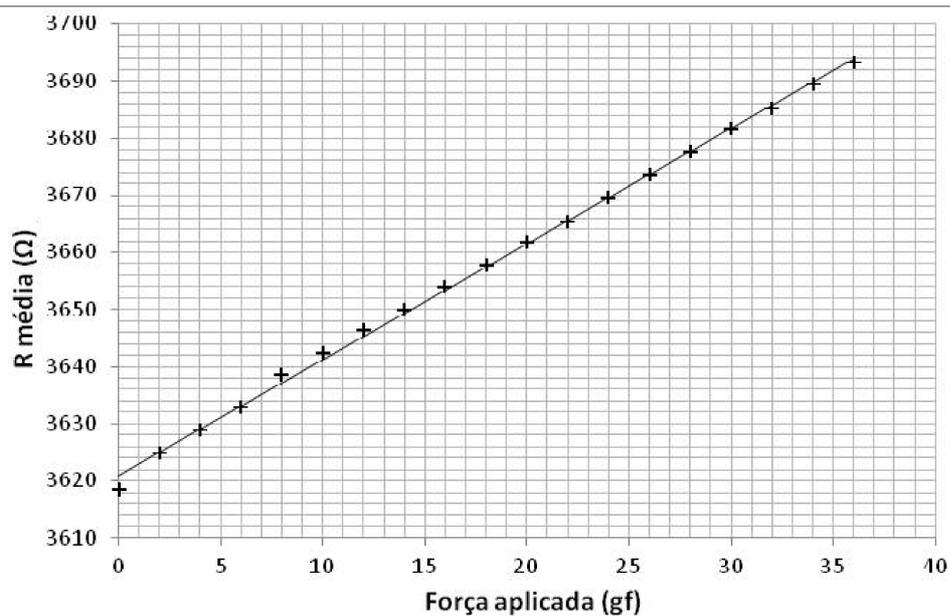
Figura 24 – Experimento para verificação da variação da resistência para diferentes deformações



Fonte: CEITEC-S.A.

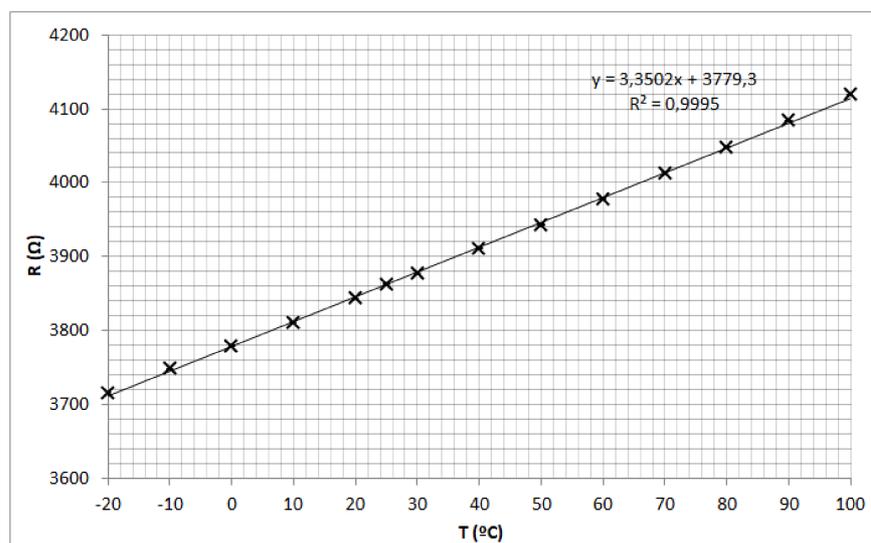
O resultado do experimento, que foi realizado em 3 diferentes amostras coletando 3 medidas para cada diferente valor de força aplicada, pode ser verificado através do gráfico da figura 25. Observando o gráfico da figura 25, verifica-se que o piezoresistor apresenta uma resposta praticamente linear para a faixa de força avaliada. Além disso, possui uma sensibilidade aproximada de $2,02 \Omega/gf$. No entanto, essa resistência sofre variação em função da temperatura apresentada pelo piezoresistor. Para realizar essa análise, foi realizada a medição do piezoresistor quando submetido a diferentes temperaturas de operação. O gráfico apresentado pela figura 26 mostra o comportamento de sua resistência, quando submetido a diferentes valores de temperatura. Esse teste foi realizado em quinze amostras e duas medições de resistência para cada valor de temperatura testado. Durante os teste a deformação do piezoresistor foi nula.

Figura 25 – Variação da resistência do piezoresistor para diferentes forças de deformação



Fonte: CEITEC-S.A.

Figura 26 – Variação da resistência em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível observar na figura 26, o sensor sofre influência em sua resistência de forma proporcional à temperatura a que ele está submetido. Além disso, verifica-se que a variação da resistência possui um comportamento linear em função da temperatura, o que permite descrever esse comportamento através de uma equação de primeira ordem. A equação 36 descreve a relação entre a resistência e a temperatura do piezoresistor utilizado no desenvolvimento do

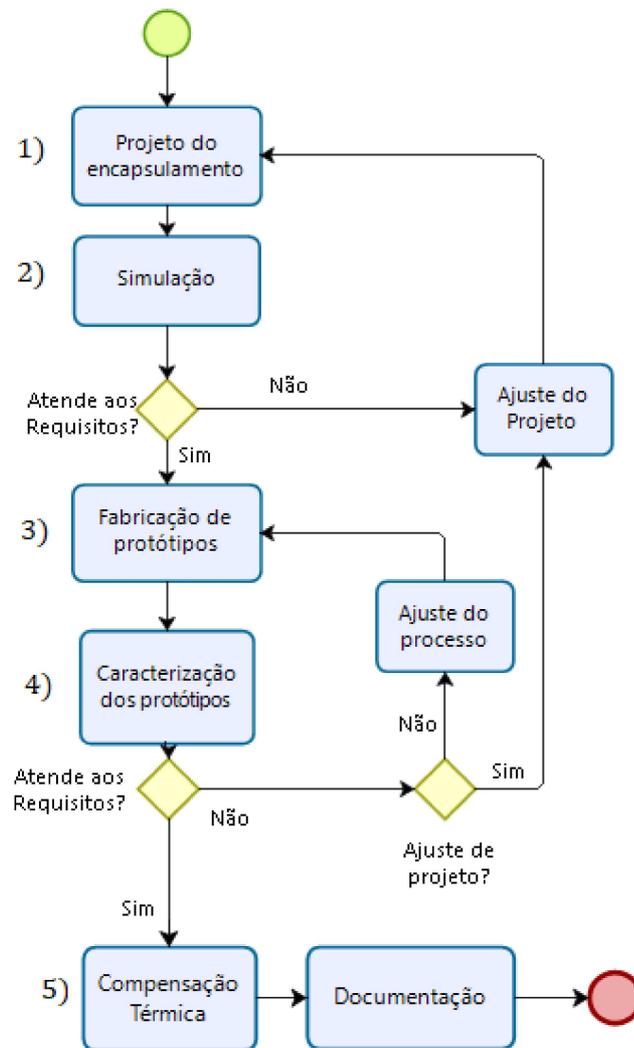
projeto, onde T é dado em ° C e R_t em Ω .

$$R_t = 3779 + 3,35T \tag{36}$$

3.3 Metodologia

A Metodologia proposta para o trabalho está dividida em cinco etapas distintas, que representam o projeto de encapsulamento, a simulação, fabricação de protótipos, caracterização dos protótipos e ensaios de confiabilidade. O fluxograma apresentado na figura 27 ilustra as etapas do projeto e a sequência na qual serão executadas. A tabela 1 apresenta de forma detalhada o que será desenvolvido em cada atividade, juntamente com as ferramentas necessárias.

Figura 27 – Fluxograma da metodologia proposta para o desenvolvimento do sensor de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 1 – Descrição das atividades a serem desenvolvidas

Atividades	Descrição	Materiais e Ferramentas
1) Projeto do encapsulamento	<ul style="list-style-type: none"> - Realização do projeto da membrana de deformação de forma a atender a especificação da faixa de pressão de medição - Estudo do posicionamento dos piezoresistores de deformação - Descrição do roteiro do processo de produção do sensor 	<ul style="list-style-type: none"> -COMSOL - AutoCAD - Altium
2) Simulação	-Realização de simulação do dispositivo em diferentes faixas de pressão e temperatura	-COMSOL
3) Fabricação de protótipos	-Construção de protótipos que utilizam os variados meios de fixação dos piezoresistores na membrana e os diferentes tipos de conexão elétrica	<ul style="list-style-type: none"> -Piezoresistores -Membranas de deformação -Adesivos condutivos (ACA) -Soldadora de fios -Adesivos de fixação (epóxi, cianoacrilato e fenólico) -Estufa para cura dos adesivos
4) Caracterização das amostras	<p>Para realizar a caracterização das amostras serão realizados os seguintes testes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resposta do sensor em função da pressão submetida; - Influência da temperatura de trabalho; - Linearidade; - Sensibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> -Protótipo -Multímetro -Ar comprimido -Estufa -Labview -MatLab
5) Compensação Térmica	-Realização de compensação térmica do sensor	-MatLab

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Projeto Mecânico da Membrana de Deformação

O projeto mecânico da membrana de deformação é fundamental para o funcionamento do sensor de pressão de forma segura e com bom desempenho. O projeto deve considerar principalmente a faixa de pressão que o sensor deve operar e também o seu material, sua geometria e limitações quanto a sua fabricação. Será desenvolvido o projeto mecânico para a membrana de deformação para medição de pressão de até 1 MPa.

O material utilizado na fabricação das membranas é o aço inoxidável 316L, que possui boa resistência à corrosão. Esse metal possui um limite de escoamento de 290 MPa. Portanto, deve-se projetar a membrana de forma a garantir que não ocorram deformações superiores

ao limite de escoamento, caso contrário, haverá deformações plásticas, algo que é totalmente indesejado para o correto funcionamento do sensor. Com relação ao aspecto construtivo, deve-se levar em consideração que essa membrana será colocada no interior do corpo de um sensor de pressão, que possui formatos que são usuais na área industrial. Portanto, deve-se atentar para que o corpo da membrana de deformação mecânica possua medidas compatíveis com o corpo do sensor. Comumente, o corpo dos sensores de pressão costuma prever a utilização de membranas com formato circular de 9 mm de raio e altura de 6,4 mm. Para isso, foram adotadas essas mesmas medidas padronizadas para o projeto do corpo da membrana de deformação.

A região sensível da membrana de deformação mecânica pode possuir diversos formatos, sendo os mais comuns o circular, o retangular e o quadrado. Porém, a membrana circular é a que apresenta maior deformação. Além disso, essa maior deformação é obtida com um menor nível de tensão (*stress*), se comparado com os demais formatos. (LIN; CHU; LU, 1999). No entanto, a membrana quadrada é a que apresenta maior sensibilidade e a melhor linearidade. Para membranas de mesma área, as de formato circular e quadrado são as que produzem melhores desempenhos. (SHABY, 2006). Além disso, indica-se a utilização de membranas circulares para a medição de baixas pressões e de quadradas para medidas de alta pressão. Apesar de a membrana quadrada ser a que possui maior sensibilidade, foi escolhida uma membrana circular para o presente trabalho, pois esse formato possui um processo construtivo mais simples de ser realizado em metais, o que impacta diretamente o custo de produção do dispositivo, colaborando com a meta de obter-se um sensor de baixo custo.

Para dimensionar a membrana deve-se primeiramente determinar uma de suas dimensões: raio ou espessura. Neste trabalho, optou-se por estipular inicialmente o raio e depois determinar a espessura da membrana. Para esse cálculo foi utilizada a equação 33. A espessura da membrana na faixa de pressão de até 1 MPa é de 0,22 mm, sendo que o valor foi arredondado na casa centesimal.

Conhecendo os valores das dimensões das membranas de deformação para cada faixa de pressão desejada, foi iniciado o processo de simulação para análise de deformação mecânica através do *software* COMSOL.

3.3.2 Simulação com *Software* COMSOL

A utilização de métodos de simulação em desenvolvimento de projetos é algo que vem sendo cada vez mais explorado nos ramos da engenharia. A simulação possibilita, através de experimentos, estudar o comportamento de um sistema ou de um modelo que o represente de forma simplificada. Além disso, permite avaliar os resultados que serão encontrados em situações reais, ampliando a compreensão do comportamento de sistemas. Até mesmo avaliar as estratégias frente a fatos dos quais não se consegue avaliar somente através de resultados finais, permitindo também compreender as dinâmicas intermediárias que se manifestam no sistema em análise. (SANTOS, 1992). Portanto, busca-se utilizar a simulação para replicar um sistema, tão

parecido quanto possível com a realidade e, através de sua simplificação, imitar matematicamente situações a fim de estudar seu comportamento e tirar conclusões para a tomada de decisão com base nos resultados obtidos.

Um *software* que permite realizar a simulação de sistemas multifísicos é o COMSOL. Esse é um *software* de simulação multipropósito para modelagem de projetos, dispositivos e processos em todas as áreas da engenharia, manufatura e pesquisa científica. O COMSOL possui diversos sistemas físicos, que podem ser utilizados de forma individual ou integrada, fazendo o acoplamento entre as físicas utilizadas. Sendo assim, utilizou-se o *software* COMSOL para o auxílio no projeto e na interpretação do funcionamento e das dinâmicas físicas que interagem no funcionamento do sensor em estudo.

3.3.3 Procedimentos e Análise Experimental

Além das análises e estudos realizados em simulação, foi realizada uma série de experimentos práticos, que fazem parte do processo de desenvolvimentos do sensor de pressão em estudo. Esses procedimentos foram realizados em laboratório com o objetivo de determinar o conjunto de materiais e métodos que resultam no melhor desempenho do sensor de pressão. Dentre os procedimentos elaborados, foi realizado um estudo de desempenho dos adesivos de fixação dos piezoresistores e de suas conexões elétricas. Na sequência são detalhados os procedimentos realizados para preparar as amostras para os testes e a metodologia realizada em cada um deles.

3.3.3.1 Processo de fixação dos piezoresistores

A qualidade da fixação do piezoresistor depende significativamente da condição da superfície onde ele será colocado. Logo, deve-se tomar cuidados com relação à preparação dessa superfície. Deve-se ter atenção, para que a superfície seja uniforme, lisa e livre de oxidação. Primeiramente deve ser realizada uma limpeza com o objetivo de retirar toda a sujeira e poeira que está não só no local onde o piezoresistor será fixado, assim como na região próxima ao sensor. Também é importante remover qualquer resíduo de graxa ou óleo que possa estar presente na superfície. Para isso é indicada a utilização de substâncias capazes de remover graxa, como acetona. A rugosidade da superfície também é uma característica determinante na qualidade da fixação do sensor. O mais indicado é a preparar a superfície de forma que fique levemente rugosa. Isso proporciona uma maior superfície de adesão, o que contribui à qualidade de fixação. Essa superfície é obtida através da utilização de jato de areia ou lixa com granulatura entre 220 e 300. É indicado que a profundidade da rugosidade esteja entre $2 \mu m$ e $4 \mu m$. Aconselha-se também que não haja um intervalo de tempo grande entre o momento de preparação da superfície e a aplicação do adesivo. Essa prática previne a formação de camadas espessas de óxido do material no momento de aplicação do adesivo.

Para uma melhor adesão e melhor transferência de deformação do adesivo, o processo de

cura necessita que o sensor seja submetido a uma leve pressão, para que garanta que a espessura resultante do adesivo não seja muito espessa. Além disso, esse processo contribui para que a disposição do adesivo seja uniforme ao longo do piezoresistor, melhorando o desempenho do conjunto. Tendo em vista esses detalhes que devem ser atentamente observados, as etapas descritas a seguir são as etapas adotadas para realizar a fixação dos piezoresistores. Atenta-se também que cada adesivo possui diferentes particularidades que exigem processos diferentes, como por exemplo, duração e temperatura de cura. Essas peculiaridades são abordadas na descrição de cada um dos adesivos. As etapas de fixação do sensor são:

- Limpeza da superfície onde o piezoresistor deve ser posicionado;
- Preparação da superfície através de uma lixa grão 300;
- Limpeza da superfície utilizando álcool isopropílico e acetona;
- Aplicação do adesivo na superfície;
- Posicionamento do sensor;
- Aplicação de fita adesiva para fixar o sensor durante o processo de cura;
- Aplicação de pressão sobre os sensores;
- Cura do adesivo, de acordo com a indicação para cada um dos adesivos.

3.3.3.2 Avaliação dos Adesivos de Fixação

Foi realizado teste com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes adesivos de fixação dos sensores de deformação. Uma vez fixado o sensor ao objeto que se deseja analisar a deformação, o adesivo deve possuir a propriedade de transmitir toda a deformação ao sensor. Portanto, foram fixados piezoresistores em lâminas que são submetidas à deformação. Os adesivos podem ter diferentes comportamentos quando submetidos a uma deformação, consequentemente, a deformação sofrida pelo sensor depende do comportamento do adesivo. Portanto, o que se deseja é identificar o adesivo que melhor transfere a deformação do objeto ao piezoresistor. O objetivo do teste é avaliar a sensibilidade do piezoresistor de acordo com a forma com que ele foi fixado à lâmina metálica. Para isso, buscou-se montar amostras com as mesmas características construtivas, no entanto com adesivos diferentes. Dessa forma, a variável que permite variações no desempenho do piezoresistor fica restrita ao adesivo utilizado em sua montagem. Os adesivos utilizados no experimento foram:

- DELO DA587
- ABLESTIK 2035sc
- 3M PR-100

- HBM P250-R

Os piezoresistores foram fixados sobre uma lâmina de aço inoxidável de 200 μm de espessura. O seu tamanho é de 36 x 80 mm. Em uma lâmina foram fixados 12 piezoresistores, sendo que 6 foram fixados utilizando o adesivo DELO DA587 e 6 utilizando o adesivo ABLES-TIK. Em outra lâmina foram fixados a mesma quantidade de piezoresistores, porém utilizando os adesivos com base de cianoacrilato e o HBM P250-R. O contato elétrico dos terminais do sensor foi realizado através do processo de *wirebonding* utilizando fio de ouro de 17 μm . Dessa forma, pode-se analisar o comportamento da resistência de cada piezoresistor em diferentes condições de deformação aplicada sobre ele. A figura 28 mostra uma das lâminas contendo os elementos piezoresistores fixados e conectados.

Figura 28 – Lâmina de deformação contendo os elementos piezoresistores fixados e conectados

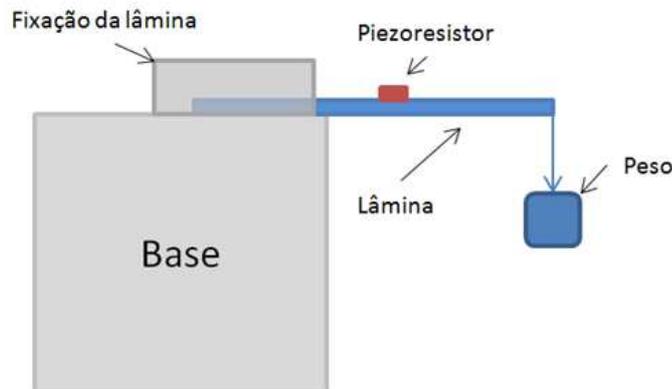


Fonte: Elaborado pelo autor

Testes com os Adesivos de Fixação

Uma das extremidades da lâmina contendo os piezoresistores foi fixada e na outra extremidade foi aplicado um esforço mecânico capaz de deformar a lâmina. Esse esforço mecânico foi realizado através do auxílio de massas calibradas, que por sua vez foram posicionadas na extremidade da lâmina. A posição da lâmina foi ajustada de forma que a distância entre a base e os piezoresistores fosse 20 mm e a distância entre os piezoresistores e o local onde os pesos são aplicados seja de 23 mm. A figura 29 ilustra o arranjo utilizado na análise de deformação do sensor.

Figura 29 – Arranjo elaborado para teste dos adesivos de fixação



Fonte: Elaborado pelo autor

A medição de resistência foi realizada com o auxílio de um multímetro, em que para cada diferente valor de peso aplicado à lâmina foi realizada uma série de 6 medidas. As medidas foram realizadas aplicando 7 diferentes valores de peso para deformação da membrana: 0, 20, 50, 70, 100, 120, 150 g. Portanto, para cada adesivo testado, foi realizado um total de 252 medidas. As medidas foram realizadas utilizando o multímetro modelo 34401A Multímetro digital de 6 1/2 dígitos da marca Keysight.

Antes de iniciar as medidas, foi estabelecido uma metodologia para estabilização térmica e elétrica dos valores das piezoresistências. Este procedimento foi necessário pelo fato de que os componentes envolvidos no processo não terem uma resposta imediata quando uma condição específica de operação for modificada. Para isso, toda vez que uma variável de processo for alterada, aguardar-se-á um tempo necessário para que a resposta dos componentes se estabilize. As medidas de resistência para cada massa aplicada à lâmina foram obtidas, em média, a cada 2 minutos até que seus valores não se alterassem, desconsiderando o último dígito do multímetro. As medidas foram realizadas em ambiente controlado, minimizando os efeitos e condições ambientais que possam influenciar nas medidas. A seguir são descritas as etapas seguidas para a medição de cada resistência.

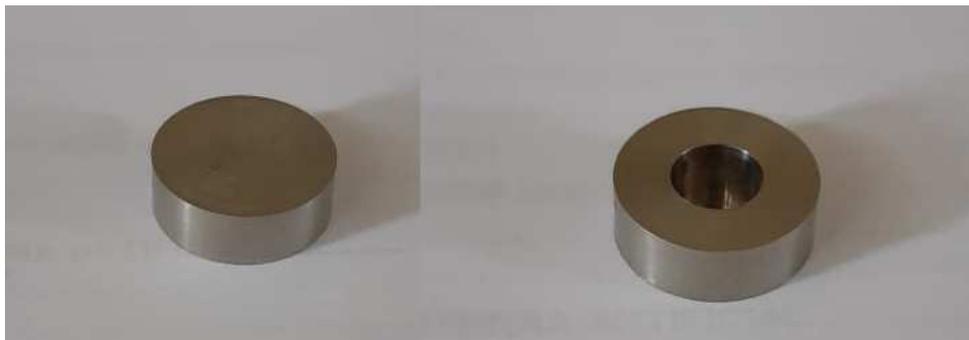
- Ligar o multímetro e aguardar por 10 minutos;
- Fixar a lâmina contendo os piezoresistores no arranjo elaborado para teste, conforme figura 29;
- Realizar medida de resistência de cada piezoresistor, aguardando estabilização;
- Aplicar massa à lâmina para deformá-la;
- Repetir a medição para cada massa utilizada no experimento.

3.3.4 Montagem dos Protótipos

Após o projeto, simulação física e análise dos materiais envolvidos na construção do sensor, foi realizado o processo de fabricação de amostras que serão submetidos a ensaios funcionais. Duas configurações de sensores foram construídas. Uma delas realiza a conexão elétrica através do processo de solda de fios e a outra utiliza adesivo condutivo.

Ambas configurações utilizam o mesmo tipo de membrana de deformação, tendo diferenças somente nas etapas de fixação e conexão elétrica dos elementos de deformação piezoresistivos. A membrana de deformação é construída através de um processo de usinagem utilizando uma peça de aço inoxidável 316L. A peça foi usinada em torno, de acordo com as dimensões estabelecidas no projeto da membrana de deformação. Após o processo de usinagem, a membrana passa por um processo térmico de alívio de *stress* mecânico, com o objetivo de reduzir o *stress* residual que pode ficar após a sua usinagem. A figura 30 apresenta a membrana de deformação após o seu processo de fabricação.

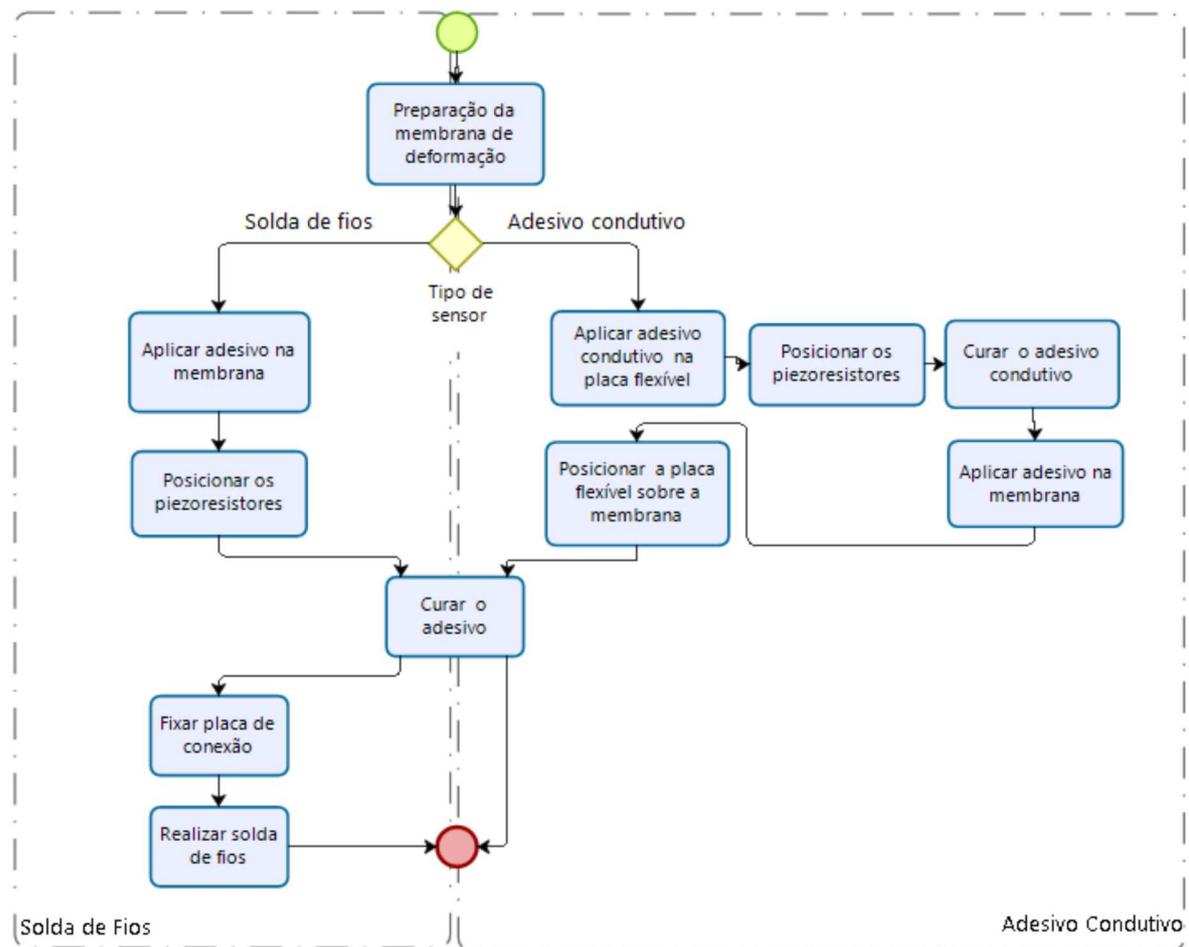
Figura 30 – Membrana de deformação após o seu processo de fabricação



Fonte: Elaborado pelo autor

Após obter a membrana de deformação, dá-se o início do processo de fabricação das duas configurações de protótipos. Existem dois diferentes processos construtivos básicos que são utilizados. Basicamente, o que os difere é a forma com que é realizada a conexão elétrica dos piezoresistores. A figura 31 possui o fluxograma contendo as etapas do processo de montagem do sensor de pressão para cada um dos dois processos abordados.

Figura 31 – Fluxograma das etapas de montagem do sensor de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4.1 Protótipo com Solda de Fios

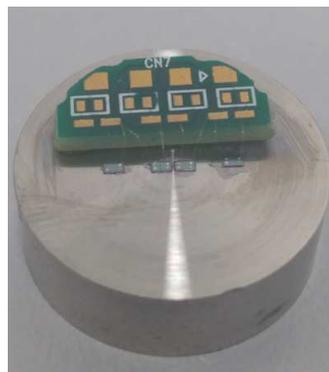
A construção do protótipo de sensor utilizando o processo de conexão elétrica por solda de fios pode ser dividido em duas etapas. A primeira delas se dá pela fixação dos elementos piezoresistivos de deformação sobre a membrana e a segunda pela solda de fios. De acordo com os testes e ensaios descritos anteriormente, o adesivo de fixação que apresentou o melhor resultado foi o P-250R. Portanto, esse foi o adesivo utilizado na construção dos protótipos. O processo de cura utilizada para o adesivo também foi descrito anteriormente. O posicionamento dos elementos piezoresistivos sobre a membrana teve como base o estudo realizado em ambiente de simulação, onde foi determinado o conjunto de posições que resultou em uma sensibilidade e melhor linearidade.

Após a fixação dos elementos piezoresistivos de deformação é realizada a sua conexão elétrica através do processo de solda de fios. Para isso, uma pequena placa de circuito impresso é fixada na lateral da membrana de deformação. Essa placa é utilizada para realizar as interligações elétricas dos elementos piezoresistores de forma a constituir uma ponte de Wheatstone. A placa

foi desenvolvida visando que ela seja fixada nas laterais da peça da membrana, que é uma região onde não há interferência na região sensível a deformações da membrana. Em sua construção também foi levado em consideração o espaço disponível, visto que existe limitações de espaço relativos ao corpo do sensor e o espaço destinado para fixação da membrana ao corpo do sensor. Essa mesma placa possui outros quatro terminais que correspondem aos quatro nós da Ponte de Wheatstone.

O processo de solda de fios foi realizado com fio de ouro de $17\ \mu\text{m}$ de diâmetro. A solda foi realizada na soldadora de fios marca TPT modelo HB10. A figura 32 mostra a membrana contendo os elementos piezoresistivos de deformação já conectados eletricamente à placa de circuito interno. Nos quatro terminais correspondentes aos nós da ponte de Wheatstone são soldados fios para facilitar a conexão dos instrumentos de medida.

Figura 32 – Membrana contendo os elementos piezoresistivos de deformação já conectados eletricamente à placa de circuito interno



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4.2 Protótipo com Adesivo Condutivo

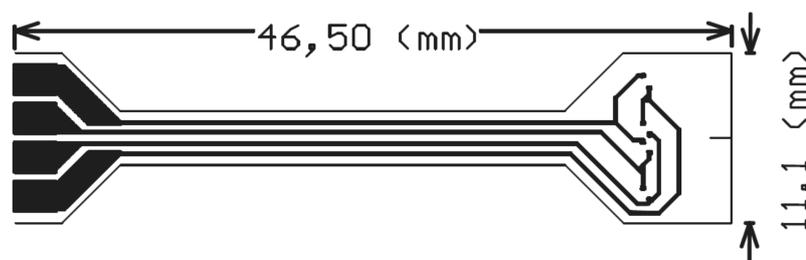
A montagem do protótipo que utiliza o adesivo condutivo como forma de condução elétrica dos piezoresistores possuem uma ordem construtiva diferente. Primeiramente deve ser realizada a conexão elétrica dos elementos piezoresistivos e em seguida a fixação deles à membrana de deformação. O adesivo condutivo utilizado foi o DELO AC245. Esse é um adesivo anisotrópico destinado para aplicações *flip chip*, com temperatura de cura de 150 a 210 °C. As partículas metálicas presentes no adesivo são de níquel com diâmetro médio de $5,3\ \mu\text{m}$.

Assim como o processo de conexão elétrica por *wirebonding*, o uso de adesivo condutivo exige que seja utilizada uma placa para aquisição dos sinais dos piezoresistores de deformação. No entanto, essa placa exige que se tenha algumas peculiaridades que são relevantes se comparadas ao processo que utiliza solda de fios. Para esse caso é necessário um substrato em que o adesivo será utilizado para fixar o piezoresistor e ao mesmo tempo realizar a sua conexão elétrica. Somente após aplicar os piezoresistores ao substrato deve ser feita a fixação sobre a membrana de deformação. Portanto, esse substrato não pode ser rígido a ponto de interferir na deformação

da membrana de deformação. Sendo assim, optou-se por desenvolver essa placa de aquisição de dados em um substrato flexível. Foi utilizado uma placa de circuito impresso de fenolite com espessura de $150\ \mu\text{m}$.

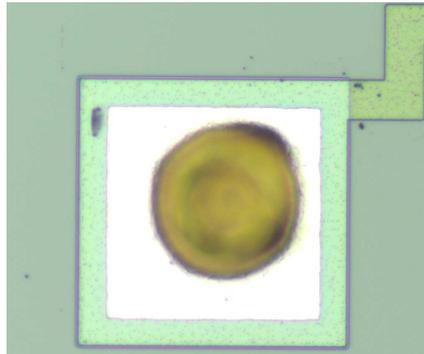
A placa recebe os piezoresistores e o seu próprio *layout* foi elaborado de forma a realizar interconexões necessárias para constituir uma ponte de Wheatstone com os quatro piezoresistores utilizados. Como eles são fixos à placa flexível e posteriormente colados na membrana de deformação, a posição dos piezoresistores na placa já deve ser realizada considerando o melhor posicionamento dos piezoresistores na membrana de deformação, de acordo com estudo também apresentado ao longo do trabalho. O *design* da placa flexível foi realizado no *software* Altium, que é uma ferramenta dedicada para o desenvolvimento de *layout* de placas de circuito impresso. A imagem do projeto da placa flexível pode ser visualizado na figura 33.

Figura 33 – *Layout* da placa flexível



Fonte: Elaborado pelo autor

O método de conexão elétrica através de adesivo condutivo foi realizado de duas formas distintas, de maneira a avaliar a necessidade do uso de *bumps* nos terminais dos piezoresistores. Os seus terminais são compostos por uma camada de $800\ \text{nm}$ de Alumínio e essa é a região mais elevada do piezoresistor. Isso possibilita o uso de ACA sem a utilização de *bumps*, já que as partículas metálicas possuem um diâmetro médio de $5,3\ \mu\text{m}$ e tanto os terminais do piezoresistor quanto da placa flexível são as partes mais elevadas de suas respectivas estruturas. No entanto isso não garante a qualidade do contato elétrico. Portanto, também foi desenvolvido um protótipo, em que foi construído nos terminais do piezoresistor um *bump* de ouro através do processo de *stud bump*. Com isso foi criado um pequeno *ball* com diâmetro de aproximadamente $75\ \mu\text{m}$ e altura de aproximadamente $20\ \mu\text{m}$. A figura 34 apresenta uma imagem do terminal do piezoresistor contendo o *stud bump*. Deste modo, ambas variações de conexão elétrica utilizando adesivo condutivo serão analisadas.

Figura 34 – Terminal do piezoresistor contendo *stud bump*

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma pequena quantidade de adesivo condutivo é aplicada sobre os terminais de contato da placa flexível e na sequência os piezoresistores são posicionados nos seus devidos lugares. A cura do adesivo deve ser realizada a uma temperatura de 150 °C por um tempo de 30 segundos. Em seguida essa placa flexível contendo os piezoresistores é fixada sobre a membrana de deformação mecânica utilizando o adesivo P250R, conforme descrito anteriormente. A figura 35 mostra a placa flexível para conexão dos piezoresistores e também a placa flexível já fixada a membrana de deformação.

Figura 35 – Placa flexível para conexão dos piezoresistores e placa flexível já fixada à membrana de deformação



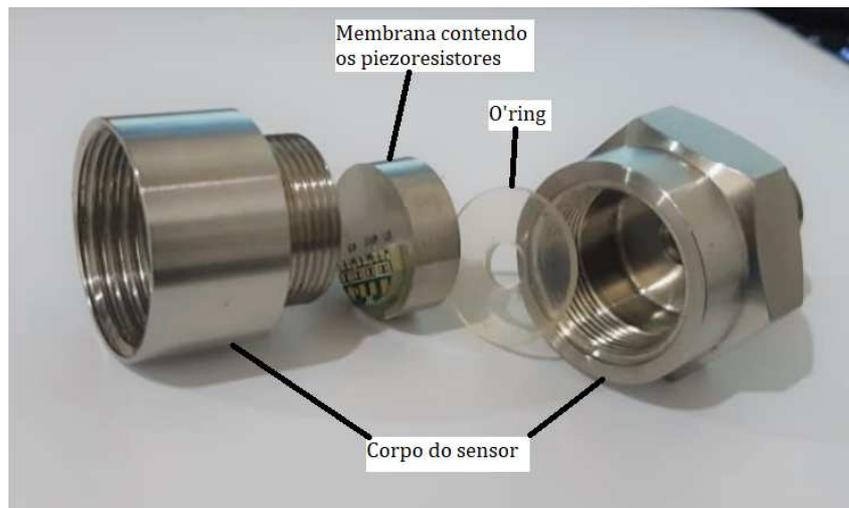
Fonte: Elaborado pelo autor

Após a conexão elétrica dos piezoresistores e sua fixação na membrana de deformação, essa célula de medição é colocada no interior de uma estrutura construída em aço inoxidável, que

constitui o corpo do transdutor de pressão. Esse corpo possui um formato típico dos transdutores industriais, disponibilizando a conexão da tomada de pressão no formato padrão NPT.

A fixação da membrana do sensor de pressão ao seu corpo é realizada através de um anel rosqueável, que pressiona a membrana ao corpo do sensor. Para evitar vazamentos entre o corpo do sensor e a membrana é colocado um O-ring antes de a membrana ser posicionada no corpo do sensor. A figura 36 mostra o formato e as peças que constituem o sensor construído com o processo de solda de fios.

Figura 36 – Componentes que constituem o sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.5 Testes e Ensaios

A avaliação do desempenho do sensor de pressão foi realizada através de testes e ensaios que foram efetuados nas amostras construídas. A seguir são descritos os procedimentos adotados para a análise do comportamento do sensor de pressão projetado.

3.3.5.1 Teste de Pressão Estática

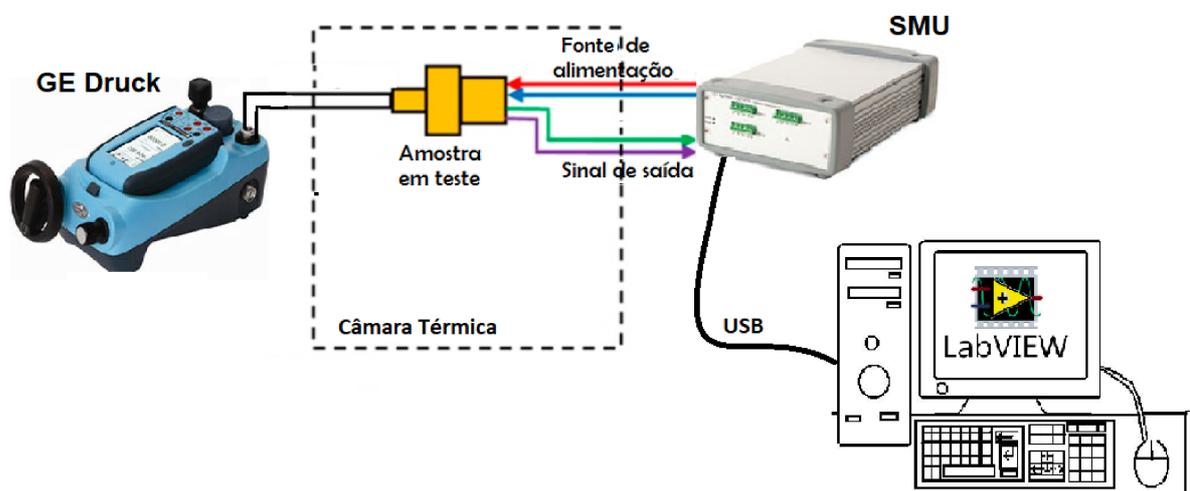
O processo de medição do sinal de saída do transdutor de pressão, com os elementos piezoresistores conectados em ponte de Wheatstone, é realizado aplicando-se uma corrente conhecida em duas extremidades opostas da ponte e medindo a tensão diferencial nas outras duas extremidades. A ponte de Wheatstone também pode ser excitada por uma fonte de tensão, no entanto optou-se por utilizar uma fonte de corrente, pois as referências e estudos abordados na Fundamentação Teórica mostram ser mais eficiente alimentar a ponte com uma fonte de corrente. A corrente que se aplica à ponte deve ser constante e conhecida. Durante os procedimentos práticos, foi utilizada uma fonte de corrente constante de 2 mA.

Após a excitação da ponte de Wheatstone, a célula do transdutor de pressão foi submetida a diferentes pressões, utilizando uma infraestrutura laboratorial composta por um controlador

de pressão em um ambiente com condições climáticas controladas. A resposta do sensor foi então medida sob diferentes valores de pressão, de acordo com a faixa de pressão de cada sensor de pressão construído. Os valores intermediários de pressão sempre correspondem a um múltiplo de 20 % do fundo de escala do sensor. Para o caso do sensor para medidas até 1 MPa, variou-se a pressão de 0 a 1 MPa, com um intervalo de 0,2 MPa entre cada medida. As medidas foram realizadas tanto incrementando quanto diminuindo os valores de pressão aplicados ao sensor. Além de verificar a pressão aplicada ao sensor, foi controlada e monitorada a temperatura de trabalho do sensor durante os testes. Sendo assim, os testes de resposta do sensor foram realizados em mais de uma temperatura, variando de 0 a 100 °C.

Além da medida referente ao diferencial de pressão dos terminais de saída da ponte de Wheatstone, foi monitorada a tensão resultante da fonte de corrente de alimentação. Como a ponte está sendo alimentada por uma fonte de corrente constante, a tensão resultante é diretamente dependente das resistências dos piezoresistores que a compõem. No entanto, por sua vez, a resistência dos piezoresistores sofre influência da temperatura a que estão submetidas, o que afeta também o comportamento do sinal final do transdutor. Tendo isso em vista, esse valor de tensão da fonte de corrente é utilizado como uma entrada na compensação da resposta do sensor. Esse procedimento foi realizado. A figura 37 apresenta o arranjo montado e os instrumentos utilizados no processo de medição e teste do transdutor.

Figura 37 – Arranjo e instrumentos utilizados no processo de medição e teste do transdutor

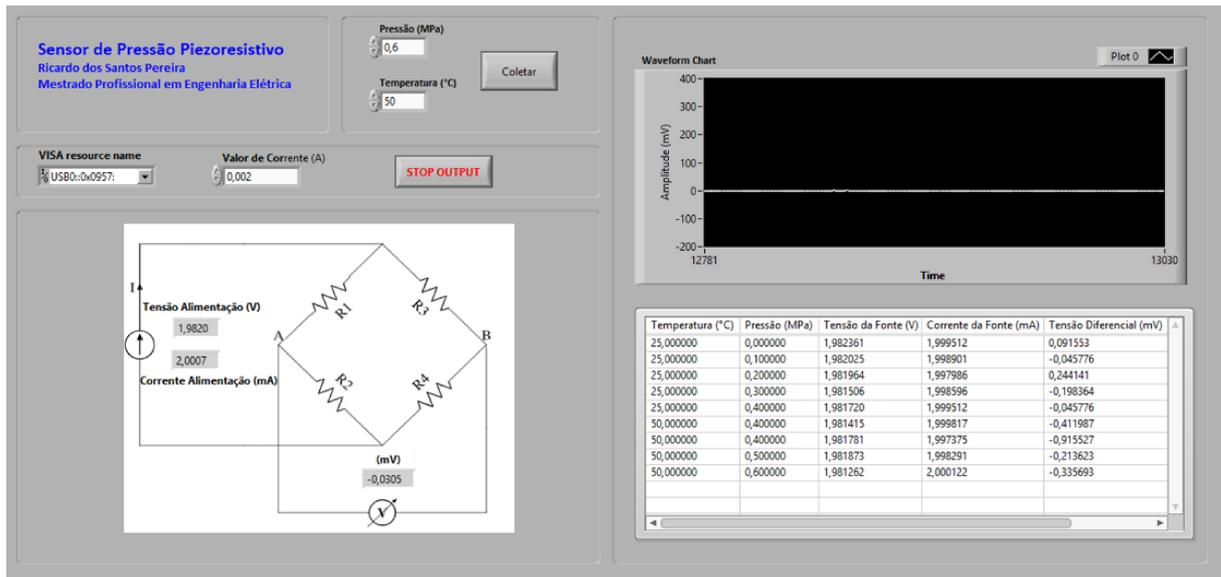


Fonte: Elaborado pelo autor

A aquisição dos dados de medição foi realizada através de uma SMU (do inglês, *Source Measurement Unit*) Agilent U2733A, que possibilita ser integrado ao LabView. Portanto, foi elaborado um programa através do *software* LabView, que se comunica com a SMU, adquirindo os dados medidos e mostrando-os no ambiente de medição. A SMU é responsável tanto por

alimentar a ponte de Wheatstone com a corrente desejada, como também por medir a tensão diferencial entre as duas malhas da ponte. Para cada ponto de pressão e temperatura cujos dados são adquiridos, realiza-se uma quantidade de oito medidas com intervalos de cinco segundos. A figura 38 mostra a tela do programa elaborado no LabView e a figura 39 apresenta a imagem dos equipamentos e da estrutura montada para realizar os testes das amostras de sensor de pressão.

Figura 38 – Tela do programa em LabView para aquisição das medições



Fonte: Elaborado pelo autor

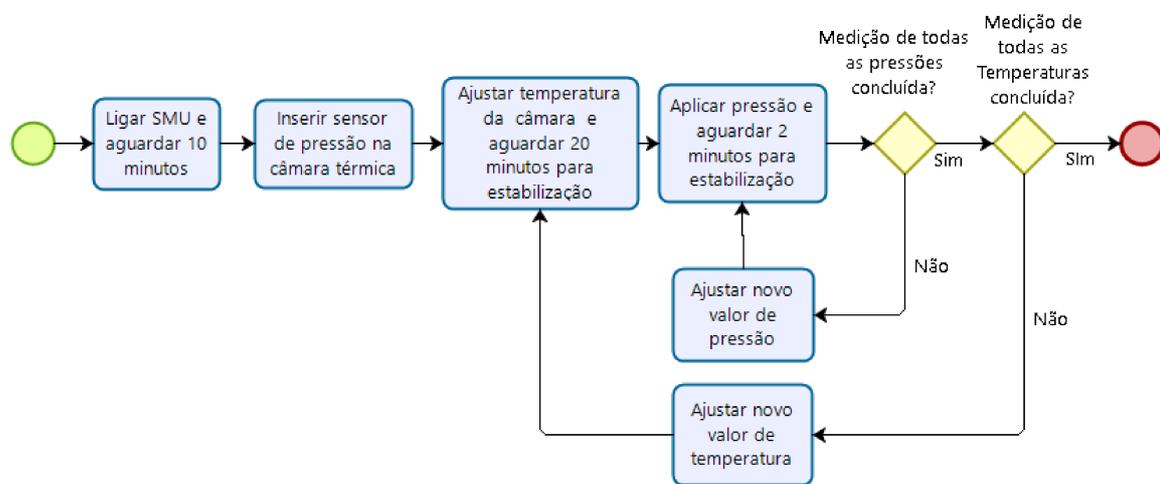
Figura 39 – Equipamentos e estrutura montada para realizar os testes das amostras de sensor de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a realização das medidas, foi estabelecida uma metodologia para estabilização térmica e elétrica dos valores e grandezas físicas envolvidas. Este procedimento é essencial para que ocorra a estabilização da pressão e temperatura na câmara climática. As medidas para cada valor de pressão aplicada ao sensor foram obtidas, em média, a cada 2 minutos até que seus valores não se alterassem. Quando aplicava-se uma alteração da temperatura do teste, aguardou-se um tempo de estabilização de 60 minutos, após o controlador de temperatura da câmara informar ter atingido a temperatura desejada. A figura 40 apresenta o processo para medição da resposta do sensor de pressão construído.

Figura 40 – Processo para medição da resposta do sensor de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.6 Compensação Térmica

Durante os experimentos práticos e em ambiente de simulação, percebeu-se que a temperatura é uma grandeza física que atua de forma expressiva sobre a resposta do sensor de pressão. Dessa forma, é desenvolvida uma proposta de compensação térmica através de uma abordagem matemática, que busca minimizar os seus efeitos relacionados à temperatura de trabalho.

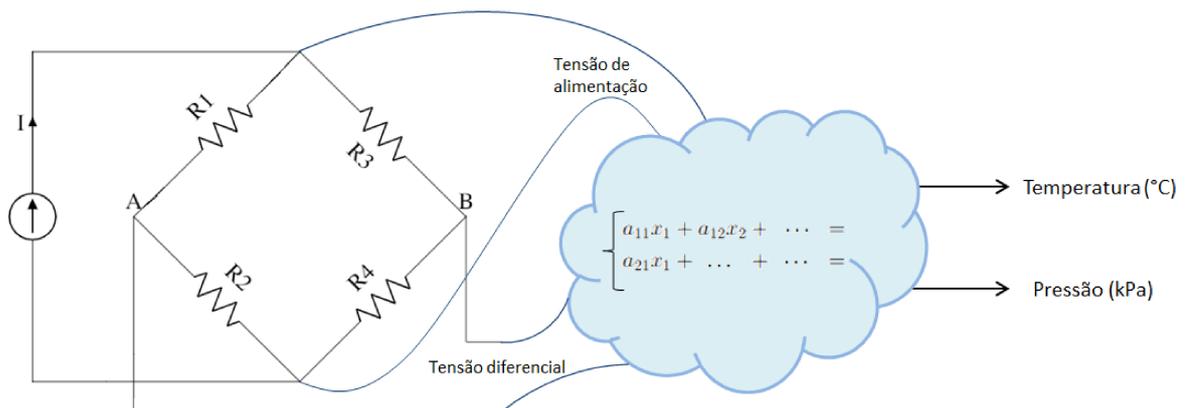
De acordo os testes realizados no item 3.2, com o objetivo de caracterizar os piezoresistores utilizados na construção do sensor de pressão, foi verificado que a sua resistência é dependente de sua temperatura e que essa relação se aproxima claramente a uma equação polinomial de primeira ordem. Além disso, mesmo quando os piezoresistores estiverem conectados em ponte de Wheatstone esse comportamento continua se manifestando, porém agora alterando a resistência resultante da ponte. Logo, é possível relacionar a resistência da ponte de Wheatstone com a sua temperatura de trabalho.

A alimentação do sensor pressão proposto por esse trabalho se dá por uma fonte de

corrente de 2 mA, logo, aplicando-se a relação descrita pela lei de Ohm, é possível estabelecer uma relação direta entre a tensão resultante nos terminais de alimentação da ponte de Wheatstone e o seu valor de resistência. Sendo assim, é utilizado esse valor de tensão de alimentação da ponte como variável relacionada com a temperatura na qual o sensor se encontra. Obtendo assim, um sensor de temperatura que está incorporado ao sensor de pressão em desenvolvimento. Isso é possível em função da dependência térmica que a resistência dos piezoresistores de deformação utilizados na construção do sensor possuem.

Além da tensão de alimentação da ponte, o modelo matemático utiliza a tensão diferencial da ponte para determinar a real pressão que está sendo submetida ao sensor. A figura 41 contém as variáveis e medidas que são utilizadas para realizar a compensação térmica e também os sinais resultantes da saída do modelo matemático. Esse modelo se propõe a determinar a não só a pressão dentro de determinada faixa de temperatura, assim como a própria temperatura de trabalho.

Figura 41 – Esquema de variáveis para compensação térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Para determinar a temperatura de trabalho do sensor é utilizado um modelo polinomial de primeira ordem cuja única entrada é a tensão da ponte de Wheatstone, descrita pela equação 37, onde T é a temperatura, V é a tensão da ponte e P_0 e P_1 são os coeficientes do modelo linear.

$$T = P_0 + P_1V \quad (37)$$

Já para determinar o modelo que descreve a pressão submetida ao sensor, deve ser determinado um modelo que possui dois sinais de entrada (tensão de alimentação e tensão diferencial da ponte). Para isso será testado e analisado os resultados para mais de um modelo de aproximação. Todos os modelos consistem de equações polinomiais contendo duas variáveis de entrada e uma variável de saída. Os modelos analisados são os expostos na tabela 2, onde X

se refere à tensão de saída da ponte, Y a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone e P_{ij} corresponde aos coeficientes da equação polinomial de acordo com a ordem de X (i) e Y (j).

Tabela 2 – Modelos para compensação térmica

	Modelo	Ordem X (V-Saída)	Ordem Y (V-Ponte)
M10	$P_{00} + P_{10}X$	1	0
M11	$P_{00} + P_{10}X + P_{01}Y$	1	1
M21	$P_{00} + P_{10}X + P_{01}Y + P_{20}X^2 + P_{11}XY$	2	1
M12	$P_{00} + P_{10}X + P_{01}Y + P_{02}Y^2 + P_{11}XY$	1	2
M22	$P_{00} + P_{10}X + P_{01}Y + P_{20}X^2 + P_{11}XY + P_{02}Y^2$	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Todos esses diferentes modelos são analisados com o objetivo de identificar qual deles consegue descrever de forma eficiente a resposta do sensor utilizando a menor ordem das variáveis medidas. Quanto maior a ordem das variáveis de entrada, espera-se que o modelo se aproxime de forma mais eficaz da resposta desejada, no entanto isso implica em um maior custo computacional para realizar essa aproximação. Dessa forma, verifica-se a resposta de cada modelo e é determinado aquele que satisfaz os critérios desejados sem necessitar de maior custo computacional.

Para determinar os coeficientes que determinam a função polinomial que descreve a resposta do sensor, foi implementado o método de mínimos quadrados, busca aproximar os dados experimentais ao modelo desejado, reduzindo o erro quadrático entre eles. Para isso foi desenvolvido um código no Software MATLAB, no qual se insere os valores obtidos experimentalmente e ele resulta nos coeficientes correspondentes ao modelo escolhido para aproximação.

Para avaliar como cada modelo se adere aos dados medidos experimentalmente, foi realizada uma análise de parâmetros que caracterizam a representação dos dados. Para isso foi avaliado:

- Coeficiente de Determinação - R^2 ;
- Soma dos Quadrados dos Resíduos - SSE (do inglês, *Sum Square Error*);
- Raiz do Erro Quadrático Médio - RMSE (do inglês, *Root Mean Square Error*).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos procedimentos e ensaios práticos e em ambiente de simulação, que por sua vez avaliaram o funcionamento e o desempenho do dispositivo construído. Também são apresentados os resultados atingidos em ensaios intermediários, que auxiliaram na escolha dos materiais e componentes utilizados na construção do sensor.

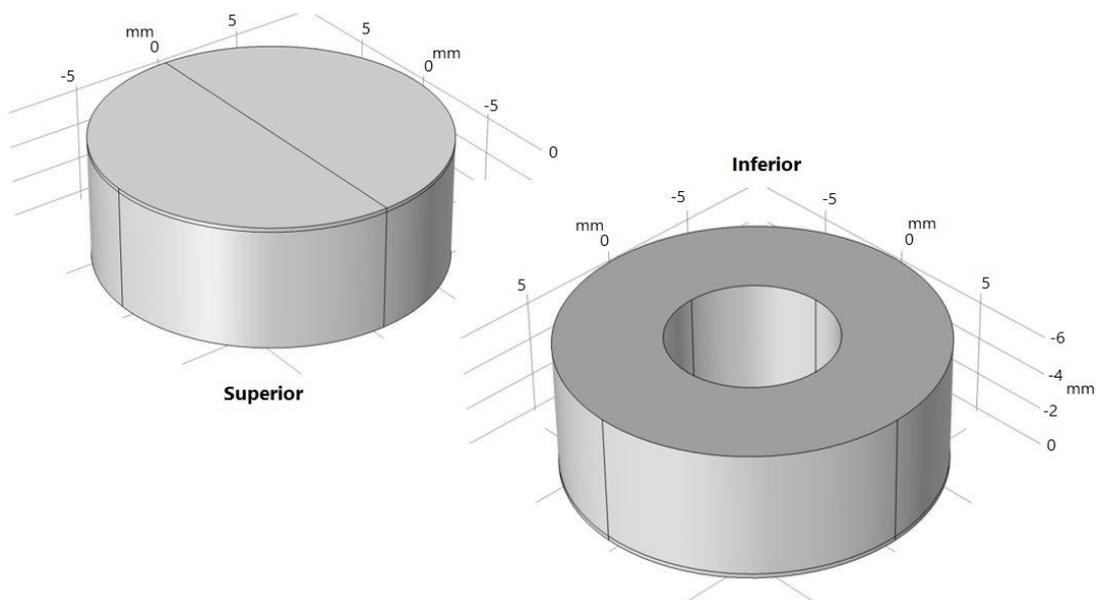
4.1 Resultados da Simulação

Nesta seção são apresentadas as análises e resultados referentes às simulações desenvolvidas no *software* COMSOL.

4.1.1 Análise de Deformação Mecânica da Membrana

Com as dimensões da membrana de deformação definidas conforme descrito anteriormente, foi realizada a simulação de deformação mecânica para cada uma das membranas. Para isso foi reproduzida a peça projetada no *software* COMSOL e simulado o seu comportamento para diferentes pressões de trabalho. A figura 42 mostra a estrutura da membrana construída no *software* COMSOL.

Figura 42 – Membrana construída no *software* COMSOL

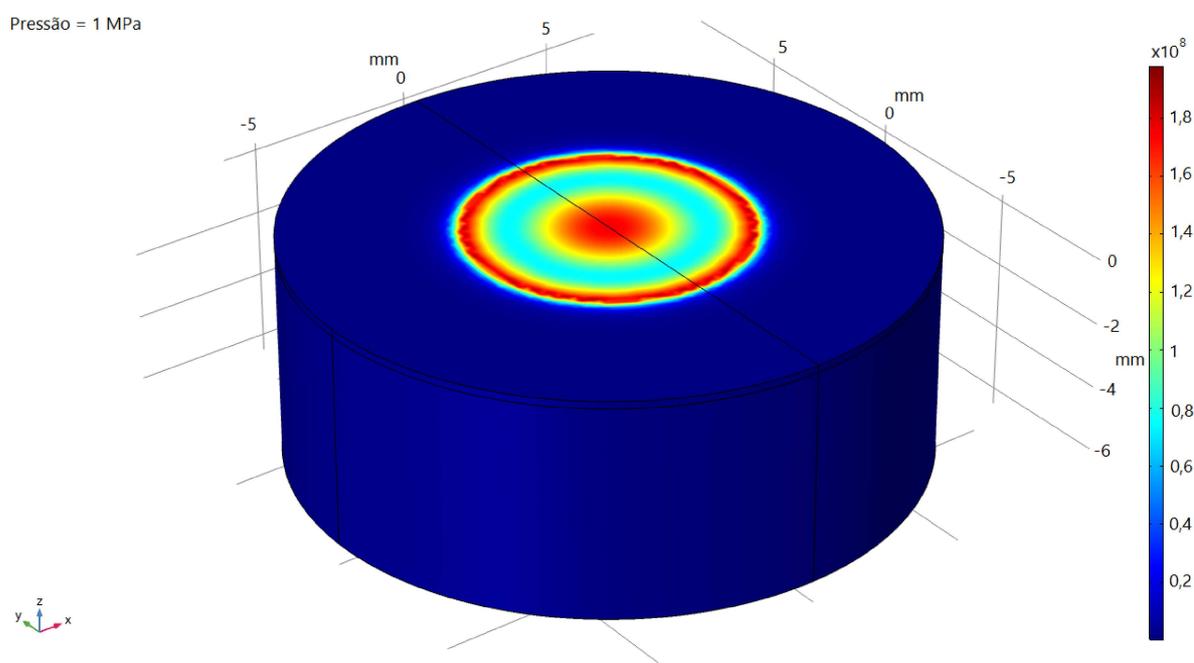


Fonte: Elaborado pelo autor

Um comportamento importante de ser avaliado é o *stress* mecânico ao longo da peça. Isso visa avaliar os esforços que ela sofre, permitindo verificar sua condição de trabalho e prevenir

deformações plásticas da peça. Para isso, em nenhum ponto do material deve ser possível ultrapassar o seu limite de escoamento. Neste caso um material é dito estar em estado de início de escoamento quando sua tensão equivalente de *von Mises*³ atinge um valor crítico de tensão de escoamento. A tensão equivalente de *von Mises* é usada para prevenir escoamento do material quando submetido a qualquer condição de carregamento. O dimensionamento da peça conforme realizado anteriormente, já prevê um limite de segurança para o sensor. Esse limite de segurança é importante, pois mesmo havendo um transitório de pressão que exceda a pressão de trabalho do sensor, ele não deve atingir o escoamento máximo dos materiais que o compõem. A figura 43 apresenta a tensão equivalente de *von Mises* ao longo da peça. A imagem refere-se à peça com membrana de espessura de 0,22 mm, submetida a pressões de 1 MPa.

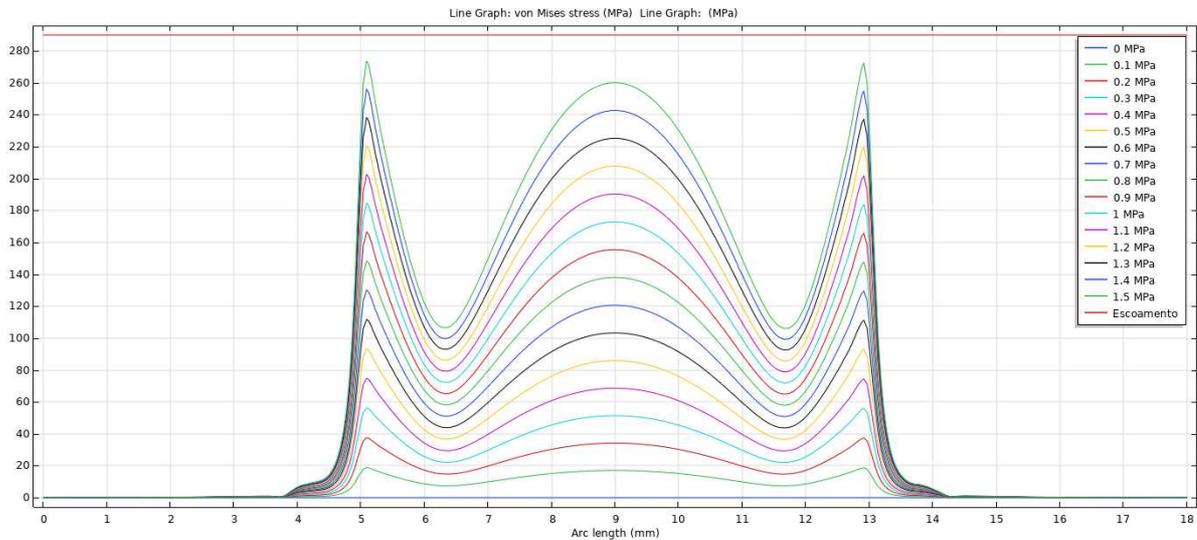
Figura 43 – Tensão equivalente de *von Mises* (N/m^2) na superfície da membrana



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 44 mostra a tensão equivalente de *von Mises* em um corte transversal na superfície superior da membrana, passando pelo seu centro. Como a membrana possui formato circular, as tensões representadas na imagem são suficientes para analisar a sua deformação. Foi inserido no gráfico o valor correspondente ao limite de escoamento do material da membrana (290 MPa). Através da comparação entre o limite de escoamento e as tensões da membrana é possível avaliar o quanto ela se aproxima do seu limite de escoamento.

³ O critério de tensão de *von Mises* máxima é baseado na teoria de *von Mises-Hencky*, também conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima. Essa teoria afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de *von Mises* se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão.

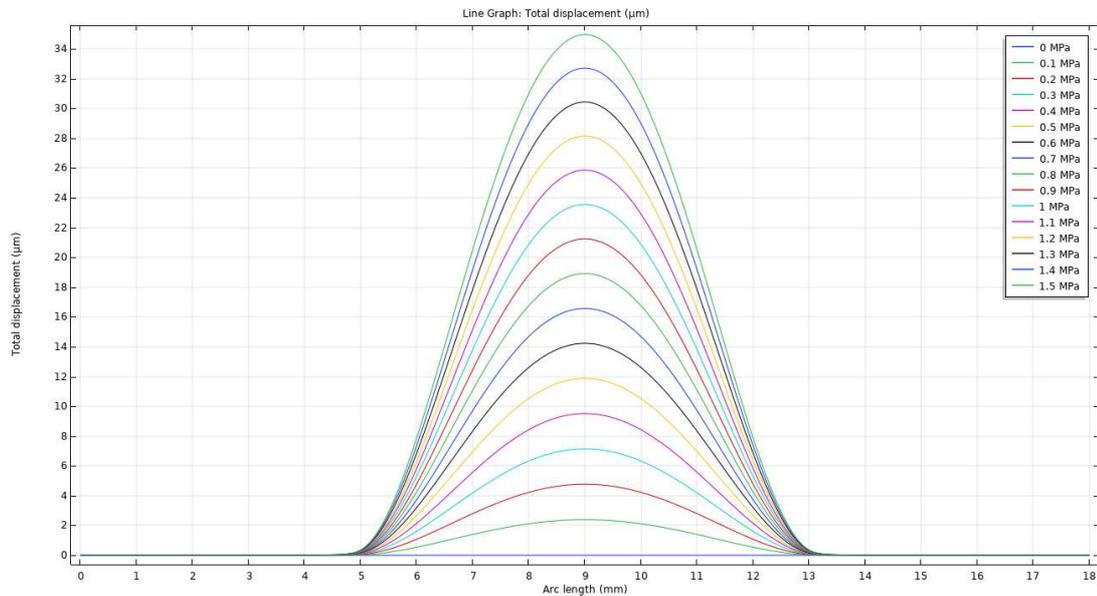
Figura 44 – Corte da tensão equivalente de *von Mises* (N/m^2) na superfície da membrana

Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando a figura 44 verifica-se que mesmo aplicando uma pressão de 1,5 MPa a tensão sobre a membrana não atinge o limite de escoamento do material. Porém esse valor fica muito próximo de atingir a deformação plástica do material que constitui a membrana. Qualquer sobrepressão aplicada sobre ela faz com que a deformação por ela sofrida seja irreversível. Portanto deve-se prever um fator de segurança no dimensionamento da membrana. Essa membrana possui uma espessura de 0,22 mm, que segundo o seu dimensionamento, seria a espessura ideal para um sensor para medição de pressão de até 1 MPa. Ao verificar a máxima tensão sofrida pela membrana ao aplicar 1 MPa encontra-se o valor de aproximadamente 190 MPa, valor que corresponde a aproximadamente $2/3$ da tensão de escoamento do material.

Observando as figuras 43 e 44 é possível verificar como se dá a distribuição de tensões sobre a membrana. Os valores máximos de tensão ocorrem na borda da membrana e no seu centro. Esses pontos de maior esforço são justamente os pontos onde ocorrerá a maior deformação do material, portanto, fixando os elementos sensores de deformação nessas regiões obtém-se uma maior sensibilidade na resposta do sensor. A figura 45 apresenta a deformação mecânica sofrida pela membrana em um corte transversal na face superior da membrana.

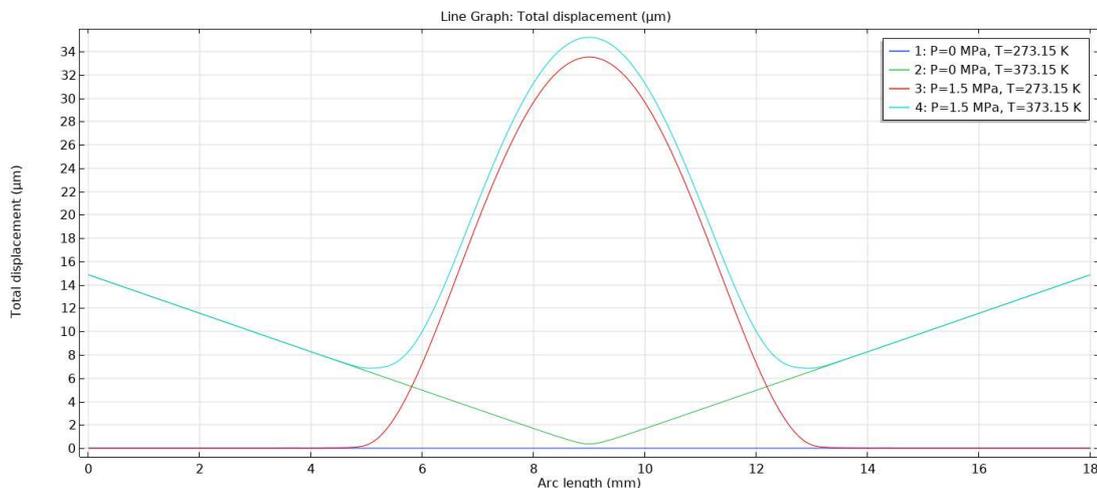
Figura 45 – Corte da deformação mecânica na superfície da membrana



Fonte: Elaborado pelo autor

O sensor de pressão também poderá trabalhar em temperaturas mais elevadas, podendo chegar a 100 °C. Portanto, essa análise de deformação mecânica pode ser realizada também nesses limites de condições de trabalho, para que se garanta que as propriedades mecânicas do diafragma de deformação mantenham-se dentro dos limites permitidos para o projeto em questão. Simulando a membrana de deformação em diferentes temperaturas, pode-se observar como a expansão térmica se manifesta sobre ela. Dessa forma, a análise da deformação da membrana foi executada em temperaturas de 0 °C e 100 °C.

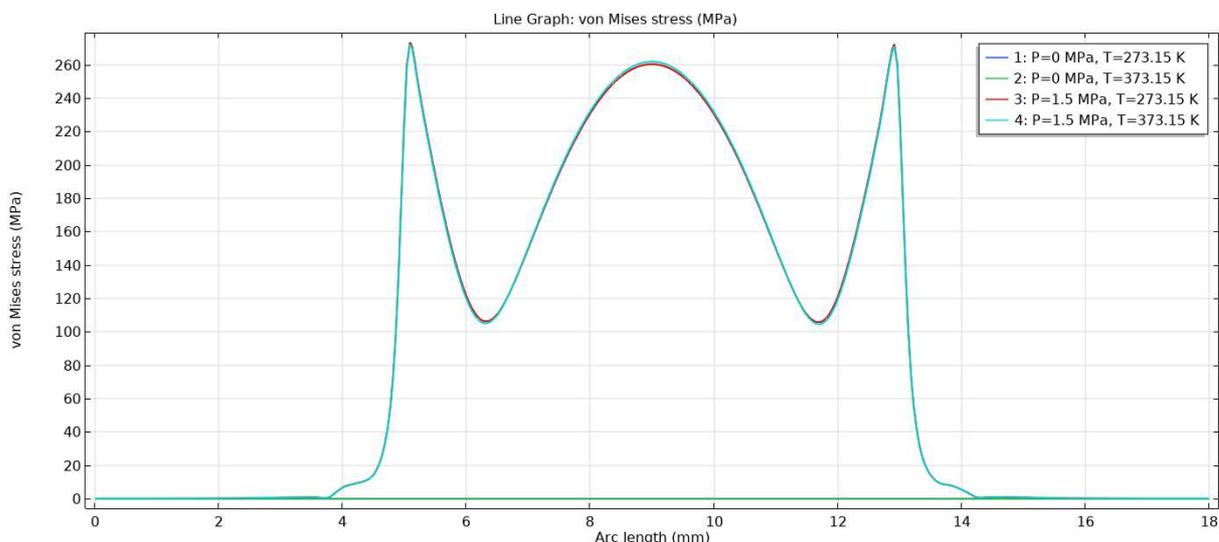
Figura 46 – Corte da deformação do diafragma em diferentes temperaturas na superfície da membrana



Fonte: Elaborado pelo autor

Os respectivos gráficos de tensão equivalente de *von Mises* e da deformação do diafragma podem ser visualizados nas figuras 46 e 47. A simulação foi realizada considerando a temperatura de referência de 0 °C.

Figura 47 – Corte da tensão equivalente de *von Mises* do diafragma em diferentes temperaturas na superfície da membrana



Fonte: Elaborado pelo autor

Como era previsto, a variação de temperatura provoca uma mudança de como ocorrem as deformações ao longo da membrana. Observando a figura 46, verifica-se que ao aumentar a temperatura ocorre uma dilatação térmica da membrana. Além disso, ocorre uma deformação sensivelmente maior do que em temperaturas menores. Esse fato é confirmado pelo gráfico da figura 47, em que pode ser verificado que as tensões na peça, quando em temperatura superior, são maiores. Para o caso em análise, quando aplica-se uma pressão de 1 MPa, ao elevar a temperatura da peça em 100 °C, ocorre uma deformação 0,4 % superior. Logo, estima-se, que em temperaturas maiores, que o sensor de pressão seja mais sensível, já que a membrana sofrerá uma deformação maior para uma mesma pressão.

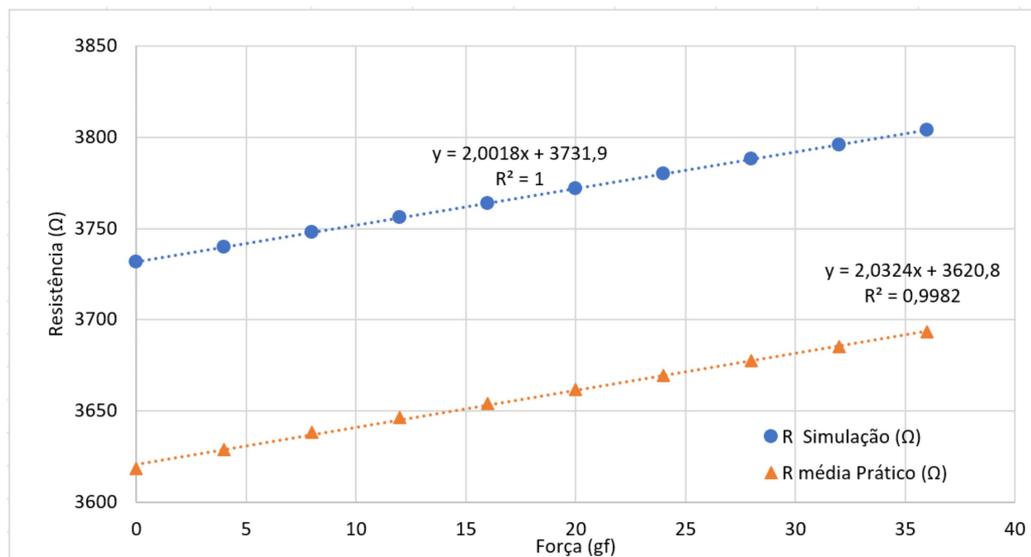
4.1.2 Análise de Simulação do Sensor Piezoresistivo de Deformação

Tanto a estrutura mecânica quanto o piezoresistor foram modelados em ambiente de simulação. No entanto, o piezoresistor, diferentemente da membrana, que é composta de um único material bem conhecido, é constituído de diferentes materiais, cujas propriedades não são bem definidas ou podem sofrer grandes variações, de acordo com o processo de fabricação. Com o objetivo de validar o modelo do piezoresistor em ambiente de simulação, foram realizados alguns testes e verificação comparando ambos - simulação e real.

A simulação buscou repetir os testes práticos realizados com o piezoresistor, sendo eles: variação de resistência em função da temperatura e teste da variação da resistência em

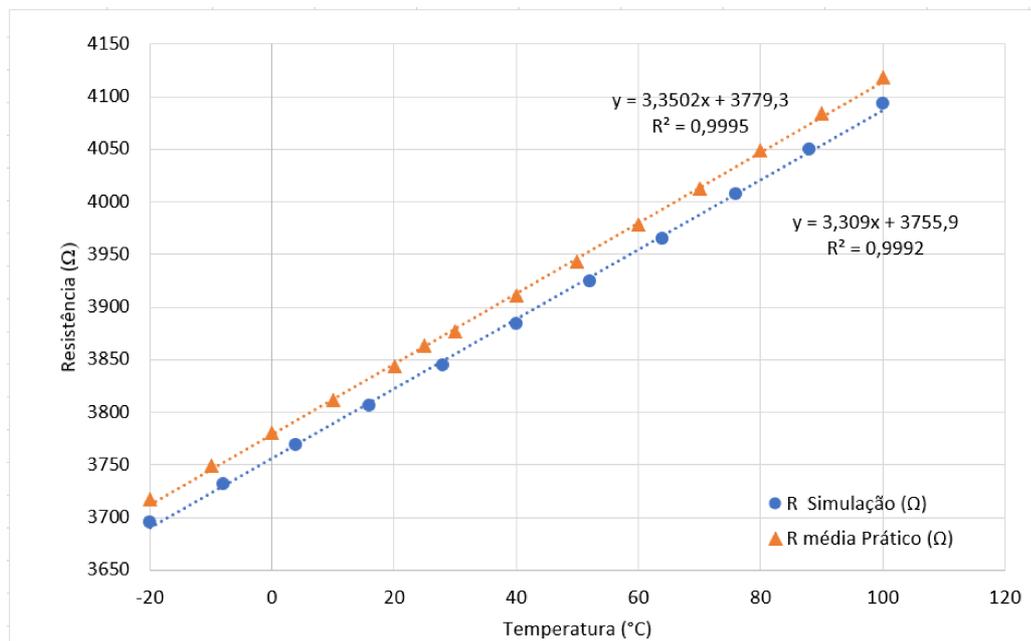
função da deformação aplicada a ele. Após os ajustes das propriedades de alguns materiais do modelo, foram obtidas respostas de funcionamento do piezoresistor simulado muito similares aos resultados dos testes práticos. Os gráficos apresentados pelas figuras 48 e 49 contêm a combinação dos resultados obtidos através de simulação e dos experimentos práticos. O gráfico na figura 48 contém a medição de resistência do piezoresistor quando submetido a diversas forças de deformação. Já o gráfico da figura 49 contém os valores de resistência do piezoresistor em diversas temperaturas de operação. Observando ambos gráficos nota-se que há um deslocamento vertical entre os dados simulados e práticos. O motivo para essa diferença se deve ao fato de que o ajuste do modelo simulado foi realizado com base em uma média de resistência de grande quantidade de piezoresistores. Já os testes práticos foram executados com uma quantidade de amostras inferior. Como descrito anteriormente, a variação de resistência dos piezoresistores em uma mesma lâmina de silício chega a 300 Ω .

Figura 48 – Comparação dos resultados simulados e práticos do piezoresistor, quando submetidos a diferentes forças de deformação



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49 – Comparação dos resultados simulados e práticos do piezoresistor, quando submetidos a diferentes temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor

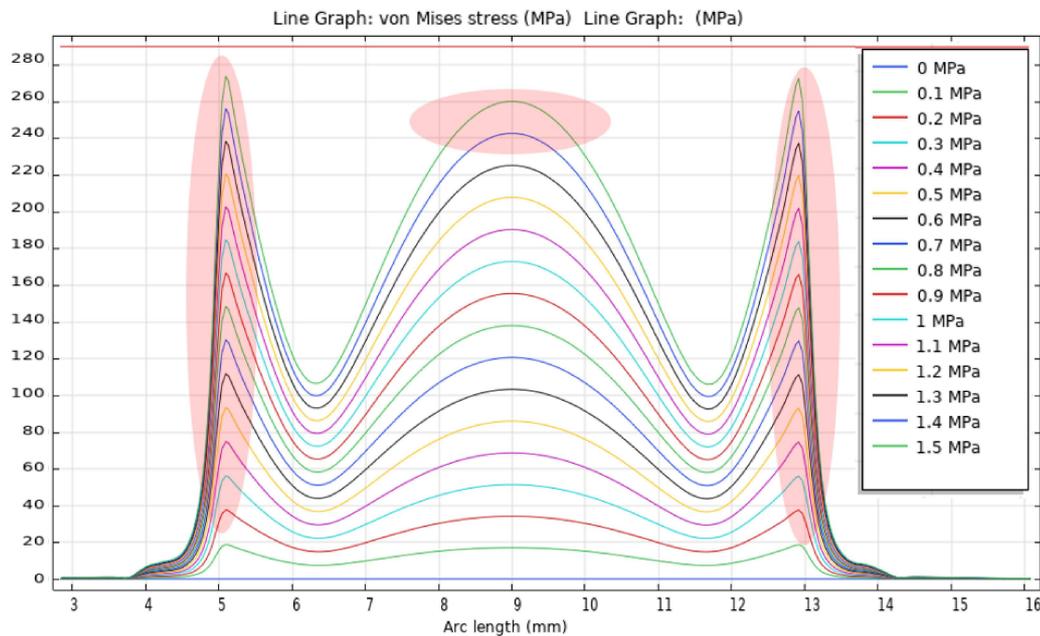
Através dos testes práticos e simulações do piezoresistor verifica-se que o comportamento da simulação condiz com o dispositivo real. A realização desses testes e comparações do modelo simulado com o real é fundamental para validar a simulação. Essa análise garante que os parâmetros e propriedades dos materiais utilizados na simulação sejam iguais às propriedades do componente real. Logo, as simulações realizadas com o piezoresistor estarão em concordância com os resultados práticos.

4.1.3 Análise de Posicionamento dos Sensores

O posicionamento dos sensores semicondutores sobre a membrana foi determinado através de um estudo de deformação da membrana metálica, onde se busca alocar os elementos sensores nos pontos em que ocorrem as maiores intensidades de deformação de tração e compressão. Esse estudo também foi realizado através do *software* de simulação física COMSOL. Para um melhor desempenho da ponte de Wheatstone, dois dos piezoresistores devem ser posicionados em locais onde ocorrem esforços de compressão e outros dois onde há esforço de tração. A membrana circular possui a característica de que as tensões radiais e axiais em sua superfície apresentam a mesma intensidade quando equidistantes do seu ponto central. Os pontos de mesmo raio, portanto, tendo como origem o centro da membrana, estão sujeitos às mesmas tensões de deformação. Durante as simulações no *software* COMSOL, buscou-se verificar o comportamento da deformação ao longo da membrana. O gráfico apresentado pela figura 50 mostra o comportamento da tensão de deformação da membrana ao longo de seu corte

transversal.

Figura 50 – Tensão de deformação ao longo da membrana



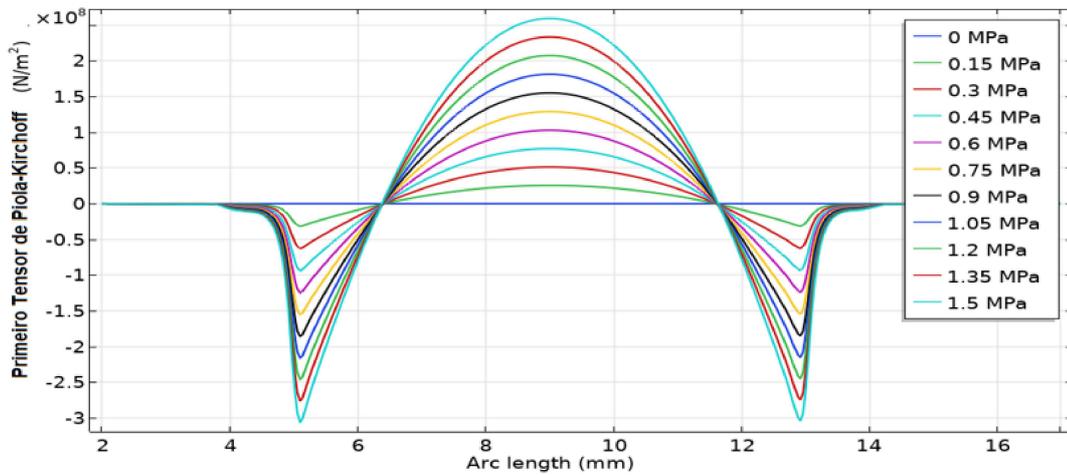
Fonte: Elaborado pelo autor

Na busca de obter o melhor desempenho do sensor de pressão, foi conduzida uma análise de sensibilidade da resposta do sensor de acordo com o posicionamento dos sensores semicondutores sobre a membrana de deformação. Os sensores semicondutores foram colocados em diferentes posições, procurando mantê-los próximos das regiões de maior tensão, conforme indicado no gráfico da figura 50.

No entanto, para o correto funcionamento da ponte de Wheatstone, não é suficiente ater-se somente à intensidade da tensão na superfície da membrana, mas também sua natureza (tração ou compressão) deve ser levada em consideração. Idealmente, a ponte de Wheatstone deve possuir dois elementos que sofram esforço de compressão e os outros dois que sejam submetidos ao esforço de tração. Visando essa condição, o gráfico da figura 51 apresenta os valores do primeiro tensor de Piola-Kirchoff⁴. Através dessa informação é possível verificar exatamente onde ocorrem os esforços de tração e compressão. Valores negativos indicam compressão e sinais positivos indicam um esforço de tração na superfície da membrana. Se os piezoresistores forem posicionados na borda da membrana, eles sofrerão um esforço de compressão. Já os piezoresistores centrais sofrerão um esforço de tração.

⁴ Primeiro tensor de Piola-Kirchoff é um tensor que relaciona a configuração inicial não deformada com as tensões na configuração final deformada.

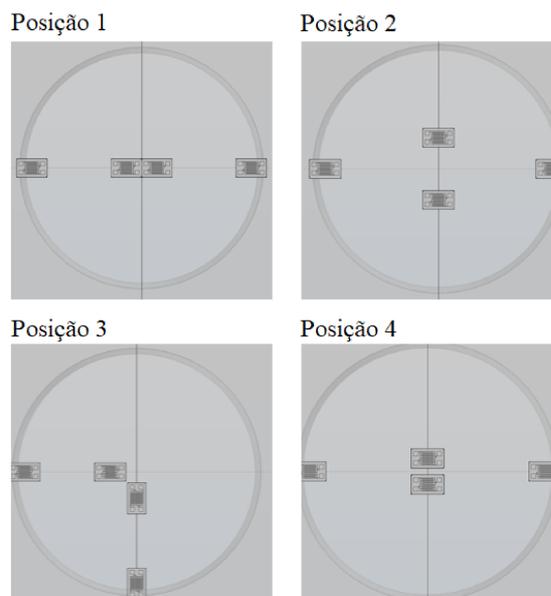
Figura 51 – Primeiro Tensor de Piola-Kirchoff



Fonte: Elaborado pelo autor

Além da sensibilidade, o posicionamento dos sensores semicondutores sobre a membrana pode afetar a sua linearidade. Nesse contexto, foi realizado um estudo para avaliar a resposta do sensor de pressão em função de diferentes posições em que os sensores de deformação são fixados sobre a membrana. O estudo foi realizado em ambiente de simulação com o auxílio do *software* COMSOL. Diferentes arranjos e posicionamento dos sensores de deformação foram simulados e, por sua vez, as suas respostas foram avaliadas. A simulação foi realizada para pressões de 0 Pa a 1 MPa. A figura 52 apresenta os arranjos de posicionamento propostos.

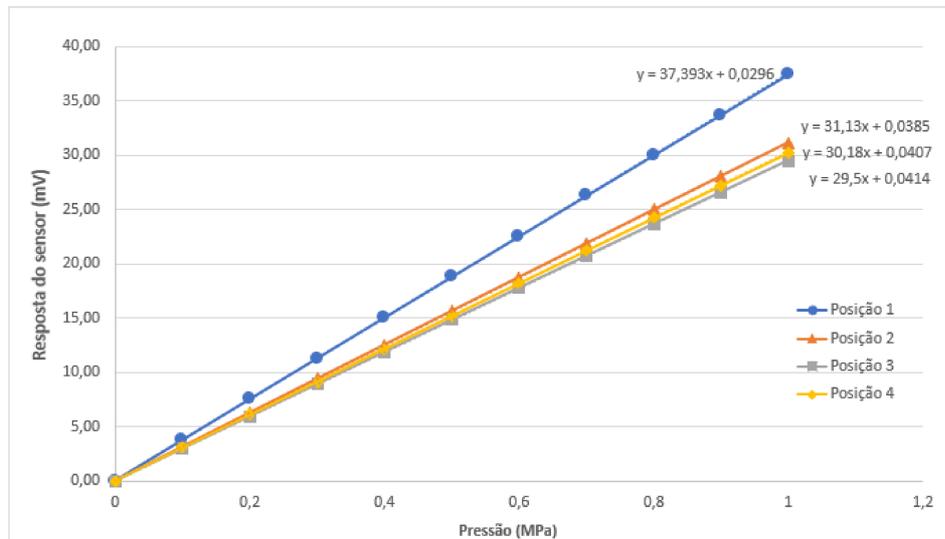
Figura 52 – Posições estudadas dos sensores semicondutores sobre a membrana



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada arranjo exposto na figura 52, foi realizada uma simulação em que se verificou o sinal de saída do sensor para diversos valores de pressão. Durante a simulação, a ponte de Wheatstone foi excitada com uma corrente de 2 mA. A medida da tensão diferencial ocorreu entre os terminais intermediários dos divisores de tensão. O gráfico da figura 53 mostra a tensão de saída de cada sensor para as pressões nele aplicadas.

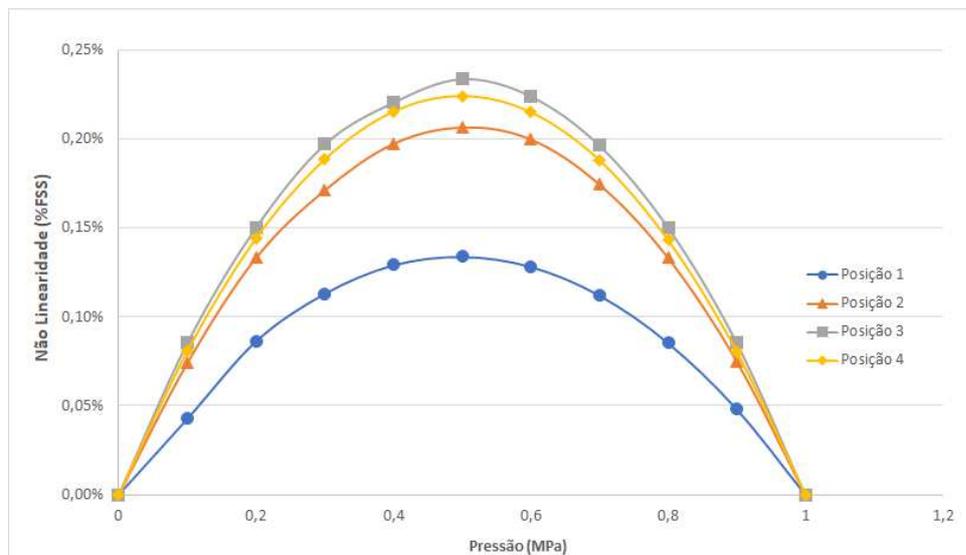
Figura 53 – Resposta do sensor para cada uma das posições propostas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observando o gráfico da figura 53 verifica-se que o arranjo de sensores semicondutores que produz a melhor sensibilidade ao sensor de pressão é o indicado pela posição 1 da figura 52. Além desse arranjo possuir a maior sensibilidade, ele apresentou a menor não-linearidade em sua resposta, conforme indicado pelo gráfico apresentado pela figura 54. Escolheu-se, portanto, esse modelo de arranjo na construção do transdutor de pressão.

Figura 54 – Não-linearidade da resposta do sensor para cada uma das posições propostas.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.4 Simulação do Sensor em Ponte de Wheatstone

Após ser validado o modelo do piezoresistor em ambiente de simulação, elaborado a análise de deformação mecânica da membrana metálica e também definido o melhor arranjo para posicionamento dos piezoresistores sobre a membrana, foi realizada a modelagem e simulação de toda a estrutura que compõe o sensor. Além disso, foram realizados em ambiente de simulação diversos testes funcionais para avaliar o funcionamento do sensor de pressão. Esses mesmos testes são reproduzidos com os protótipos de sensores de pressão construídos em laboratório.

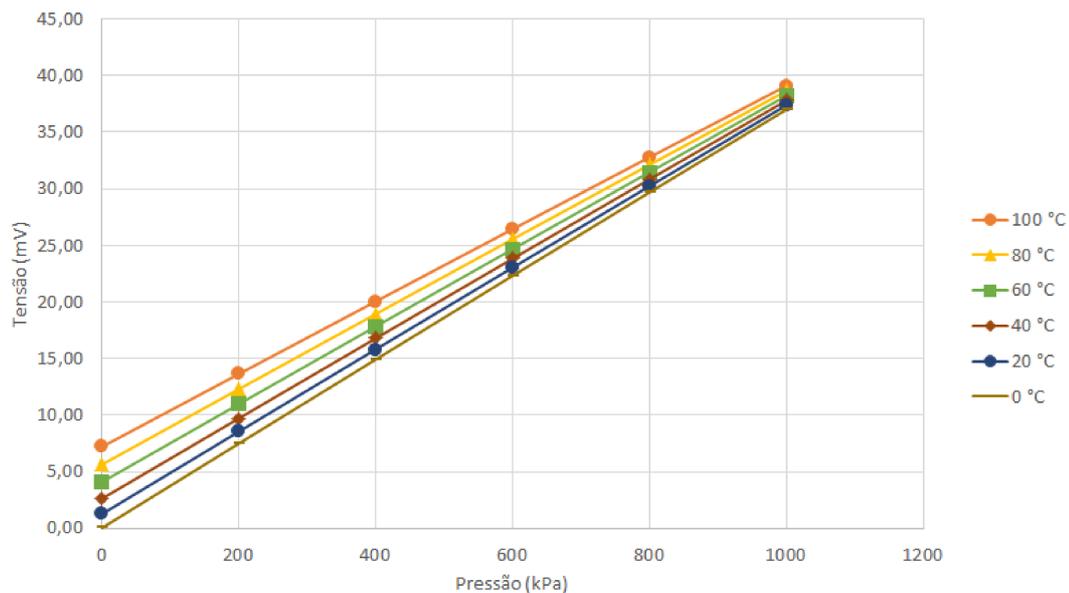
A simulação contendo todas as partes do sensor foi realizada combinando algumas condições operacionais e ambientais previstas para seu funcionamento. Portanto, essa simulação considera que todos os piezoresistores fixados à membrana estejam interligados em ponte de Wheatstone e a ponte esteja excitada com uma corrente constante. Além disso, a simulação foi realizada considerando diferentes temperaturas de operação e também que o sensor seja submetido a diferentes pressões de trabalho.

Considerando todas essas condições, foi efetuada uma combinação de simulações buscando verificar o funcionamento do sensor nas possíveis condições de funcionamento. As condições de operação consideradas foram:

- Faixa de pressão: 0 a 1 MPa;
- Temperatura de operação: 0 a 100 ° C;
- Corrente de excitação da ponte de Wheatstone: 2 mA.

Diversas análises foram realizadas através dos resultados nessas simulações. Uma das principais observações a serem realizadas é o comportamento da tensão diferencial da ponte de Wheatstone, sob diferentes pressões aplicadas ao sensor. Também é importante verificar como é o seu funcionamento em diferentes temperaturas. O gráfico apresentado na figura 55 contém o sinal de saída do sensor para diferentes pressões e temperaturas.

Figura 55 – Sinal de saída do sensor para diferentes pressões e diferentes temperaturas.

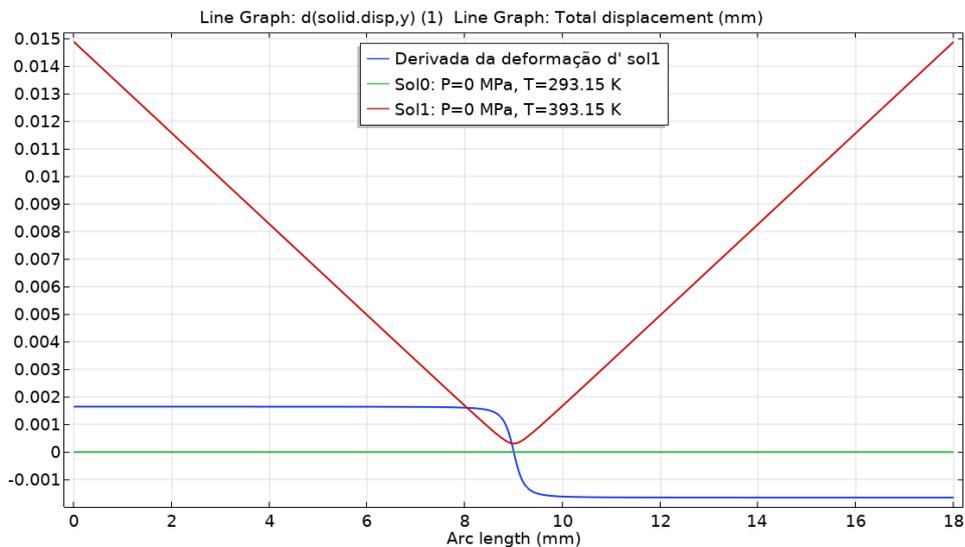


Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a curva de resposta do sensor, verifica-se que a sensibilidade do sensor de pressão sofre uma grande influência da temperatura. Isso ocorre pelo efeito da mudança das propriedades físicas do material que compõem a membrana de deformação e também devido à diminuição da sensibilidade do piezoresistor à deformação quando ele trabalha em temperaturas maiores. Quanto à mudança das propriedades físicas da membrana de deformação, essas variações sofridas em decorrência da temperatura foram demonstradas nas simulações anteriores.

Nota-se através do gráfico da figura 55 que a maior variação ocorre quando não há pressão aplicada ao sensor. Isso representa uma variação grande no *offset* do sensor. Ao buscar entender os fenômenos que provocam esse efeito, foram analisados os dados obtidos através da simulação do sensor. Para isso, primeiramente, foi verificada a dilatação térmica da membrana. O gráfico da figura 56 mostra a deformação causada pela dilatação térmica da membrana ao longo de um corte transversal passando pelo seu centro. Juntamente com o valor de dilatação, foi plotado o valor referente à derivada parcial da deformação causada pela dilatação térmica em relação à posição do eixo do corte em análise. Percebe-se que, com exceção da região central da membrana, o módulo da taxa de variação da dilatação térmica é constante.

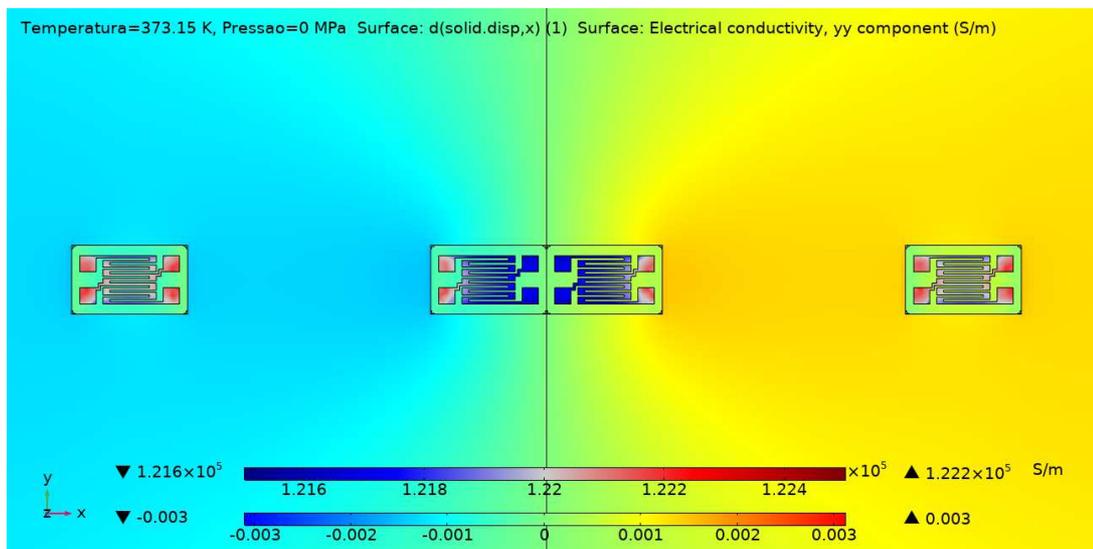
Figura 56 – Deformação causada pela dilatação térmica.



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, existe uma região central na qual a dilatação não possui um comportamento linear. Essa região coincide com o local onde dois dos piezoresistores da ponte estão posicionados. Como os piezoresistores estão interligados em ponte, esperava-se que esses efeitos de dilatação térmica fossem minimizados, visto que todos eles estariam sofrendo uma dilatação de mesma intensidade, sendo anulada pela ponte de Wheatstone. No entanto isso não é observado, pois os piezoresistores centrais não possuem a mesma deformação devido à dilatação se comparados com os piezoresistores da extremidade da membrana, causando um desbalanceamento da ponte gerado pela dilatação térmica. Esse efeito também pode ser observado através da figura 57, que apresenta a condutividade dos piezoresistores durante a deformação causada pela variação da dilatação térmica. Verifica-se que realmente parte da região ativa do piezoresistor está sobre a área na qual a dilatação térmica não é linear, provocando uma mudança em sua condutividade que é diferente da mudança de condutividade dos piezoresistores posicionados na borda da membrana.

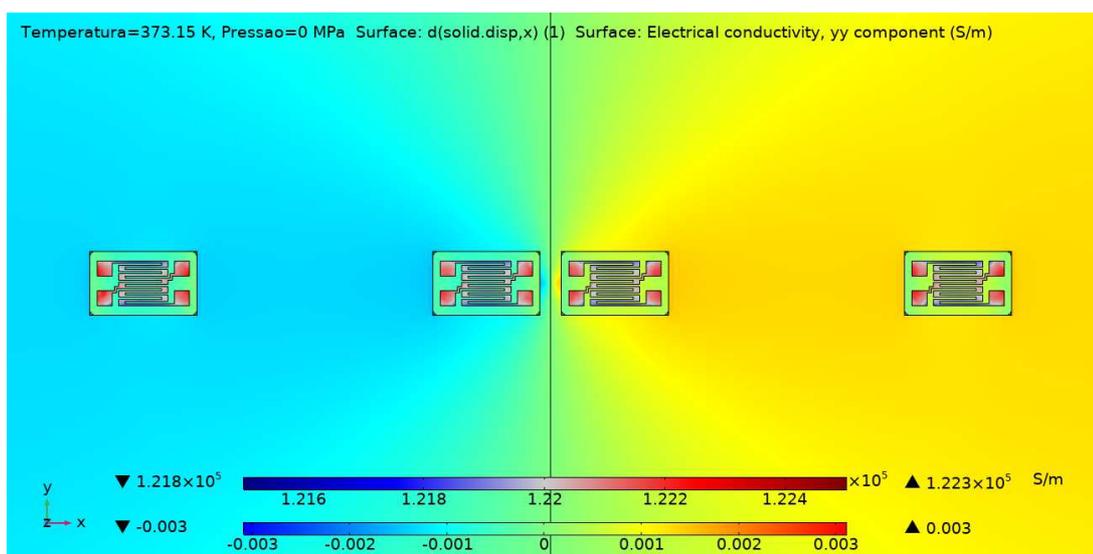
Figura 57 – Condutividade dos piezoresistores durante dilatação térmica.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para minimizar esse efeito da dilatação térmica, foram reposicionados os piezoresistores da região central para que eles permaneçam inteiramente na área em que a dilatação térmica é constante e de mesma intensidade dos demais piezoresistores. Isso foi realizado deslocando cada piezoresistor central $200 \mu m$ para a borda da membrana, como pode ser visualizado na figura 58.

Figura 58 – Condutividade dos piezoresistores durante dilatação térmica, quando deslocados do centro.

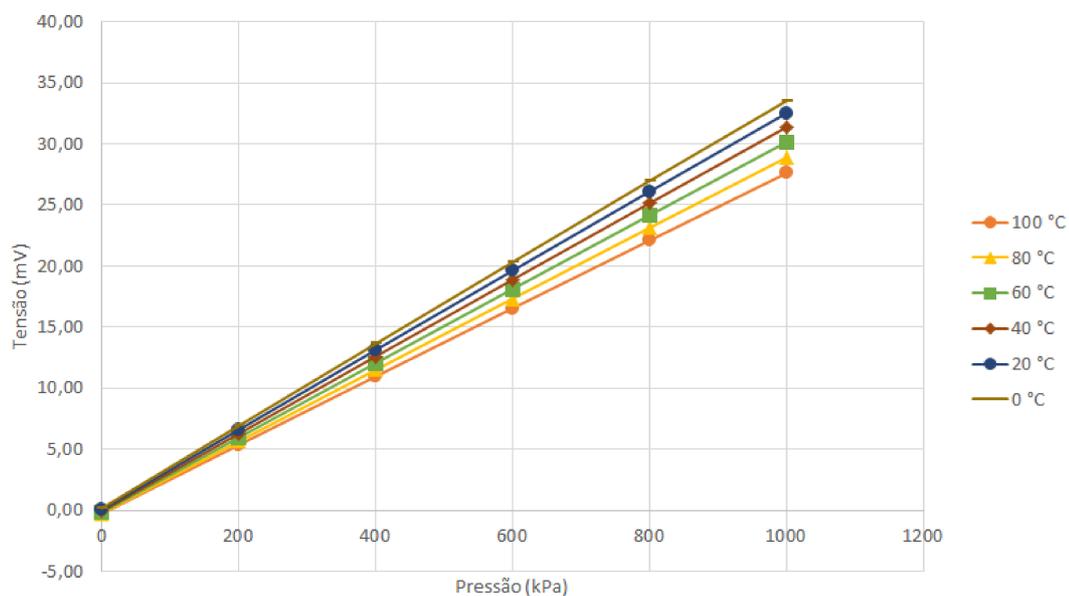


Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a figura 58 e comparando-a com a figura 57, percebe-se que ao deslocar os piezoresistores, a condutividade ao longo de sua região ativa foi mais uniforme e consistente durante a ocorrência da dilatação térmica. Isso contribuiu com a redução da tensão de *offset* do sinal

de saída do sensor quando em temperaturas mais elevadas. A figura 59 mostra a resposta do sensor para diferentes pressões e temperaturas após o ajuste de posicionamento dos piezoresistores centrais. Percebe-se que houve uma redução significativa no *offset* do sinal de saída do sensor. Nota-se que, de fato, essa mudança de posicionamento provocou uma melhora significativa na variação da tensão de *offset* do sensor. Na disposição original, ao variar a temperatura de trabalho em $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tensão de *offset* sofria uma alteração de $7,2\text{ mV}$. Após a modificação da posição dos piezoresistores, a variação de *offset* foi reduzido para $0,45\text{ mV}$.

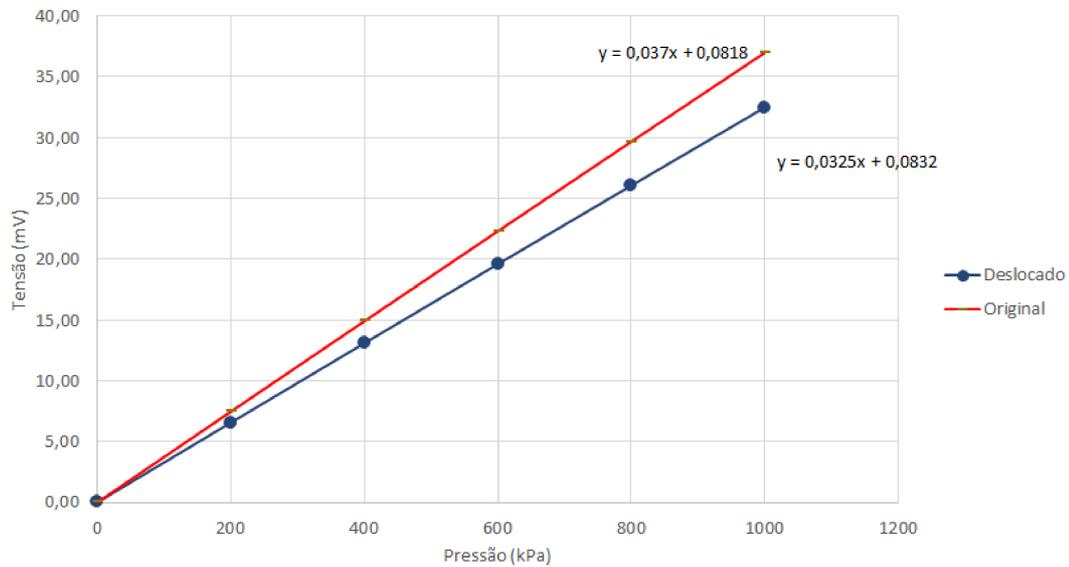
Figura 59 – Resposta do sensor para diferentes pressões e temperaturas após ajuste na posição dos piezoresistores.



Fonte: Elaborado pelo autor

A proposta de disposição dos piezoresistores sobre a membrana de deformação teve como consideração principal a maior sensibilidade possível para a resposta do sensor, buscando posicioná-los nas regiões onde ocorrem maiores deformações. No entanto a simulação térmica do sensor demonstrou essa grande variação de *offset* quando altera-se a temperatura de trabalho. Após a mudança da posição dos piezoresistores centrais da membrana, diminuindo a variação de *offset*, foi verificado qual o impacto na sensibilidade do sensor quanto à pressão de trabalho, visto que houve uma mudança na posição dos piezoresistores. A figura 60 contém a resposta do sensor de pressão para a disposição original e a alterada em função da variação de *offset*. Verifica-se que ao mudar a posição dos piezoresistores a sensibilidade do sensor também foi afetada. Para o caso analisado, ocorreu uma diminuição da sensibilidade de $12,1\%$. Comparando como os demais arranjos estudados no item 4.1.3 do presente trabalho, mesmo alterando o arranjo de posição original, a sensibilidade do sensor para com os piezoresistores centrais deslocados, continua maior que os demais arranjos.

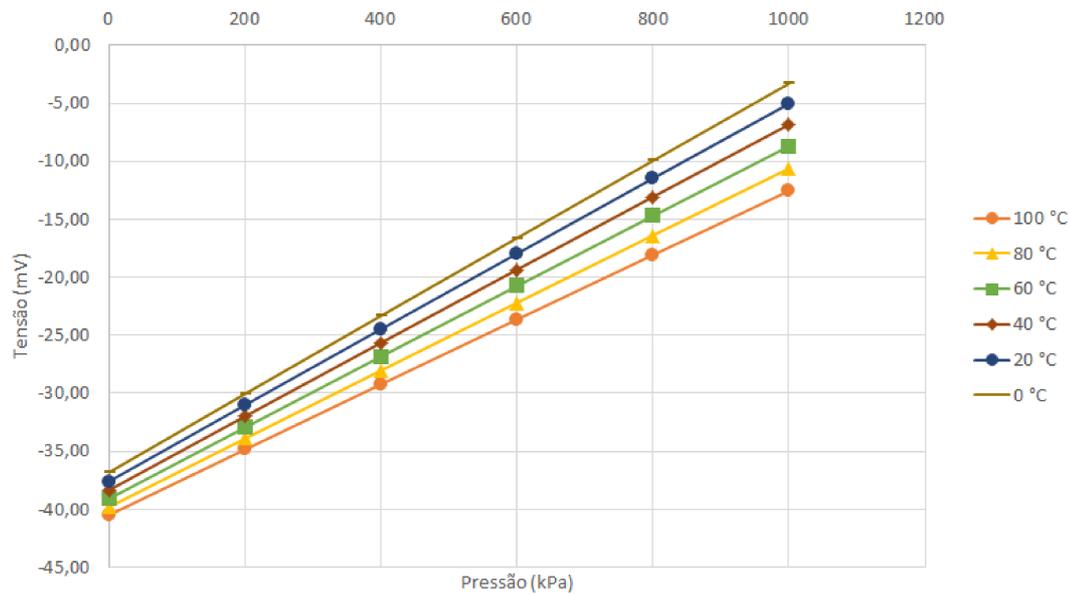
Figura 60 – Resposta do sensor para diferentes pressões para a disposição original e a alterada em função da variação de *offset*



Fonte: Elaborado pelo autor

Outra análise verificada através de simulação foi o comportamento do sensor quando os piezoresistores utilizados em sua construção não possuem valores de resistência iguais. Isso em função da diferença na concentração de dopantes em cada dispositivo. Isso é algo que na prática possivelmente sempre vai ocorrer, pois dificilmente todos eles terão exatamente o mesmo valor de resistência. Isso se deve ao processo de fabricação dos piezoresistores, que não garante a perfeita uniformidade de dopagem do polisilício em todas as regiões da lâmina de silício. Portanto, foi realizada uma simulação em que a dopagem de um dos piezoresistores da ponte tenha uma diminuição de 2 % na sua concentração de dopantes. Os mesmos testes descritos anteriormente foram realizados nessa nova condição de trabalho. A figura 61 apresenta o gráfico contendo o sinal de saída do sensor para o caso em que um dos piezoresistores possui a dopagem 2 % inferior aos demais.

Figura 61 – Resposta do sensor com um piezoresistor com dopagem 2 % inferior aos demais



Fonte: Elaborado pelo autor

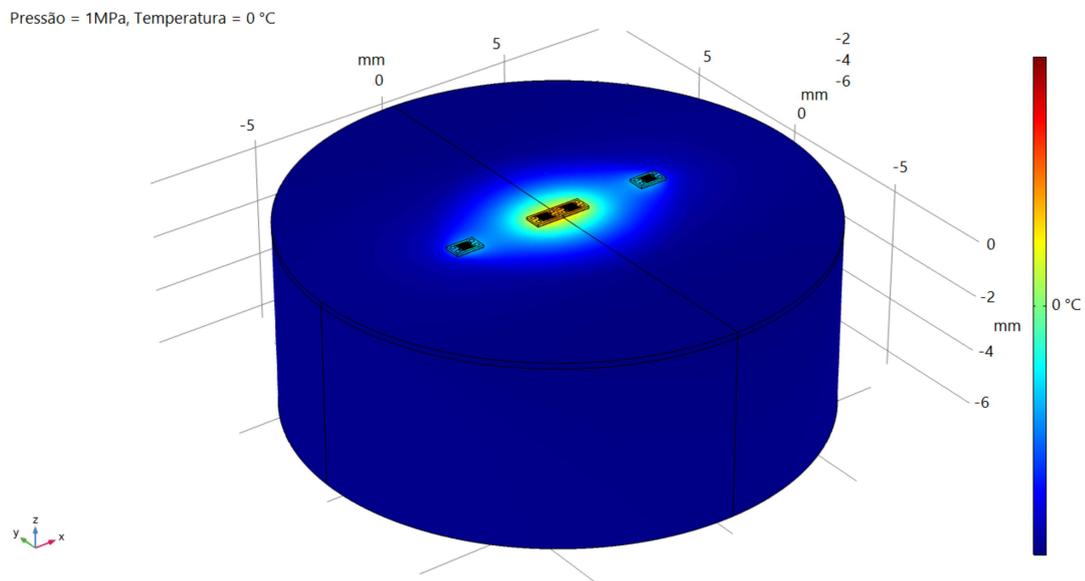
O gráfico mostra que essa diferença de dopagem provocou uma variação no *offset* do sensor para -37,6 mV em temperatura ambiente. Essa mudança era esperada, visto que a diferença de dopagem causa uma mudança na resistência, o que provoca um desbalanceamento da ponte. Além do efeito sobre o *offset*, ocorre também uma alteração na sensibilidade do sensor. Para uma mesma temperatura (20 ° C) o sensor com piezoresistores com dopagens iguais possui uma sensibilidade de $32,47 \mu V/kPa$. Já o sensor com dopagem diferente apresenta sensibilidade de $32,568 \mu V/kPa$. Essa maior sensibilidade se deve ao fato de que a sensibilidade à deformação do piezoresistor está inversamente relacionada a sua densidade de dopantes. A dopagem menor em um dos piezoresistores torna-o mais sensível à deformação. Se, ao invés de reduzir a concentração de dopantes, ela fosse aumentada em 2 %, a sensibilidade do sensor sofreria uma redução para $32,373 \mu V/kPa$.

Na prática, não é possível ter um controle tão preciso da dopagem dos piezoresistores utilizados na montagem do sensor, logo cada sensor possuirá a suas próprias características de funcionamento. Uma alternativa para reduzir esses efeitos é a utilização de piezoresistores, em um mesmo sensor, que estejam localizados próximos na lâmina de silício. Ao utilizar os piezoresistores de uma mesma região a diferença na concentração de dopantes tende a ser inferior do que no caso de piezoresistores que estão localizados em regiões diferentes do *wafers*.

Algo que pode ser verificado através de simulação é a transferência de calor devido ao efeito Joule nos piezoresistores e sua distribuição ao longo da superfície da membrana. Caso os piezoresistores estejam dissipando uma potência alta, esse calor gerado por eles pode afetar as medidas do sensor de pressão. Portanto, foi verificado como ocorre essa dissipação de

calor avaliando se ela é significativa a ponto de interferir nas medições. A figura 62 mostra a distribuição de temperatura ao longo da superfície da membrana e dos piezoresistores.

Figura 62 – Temperatura ao longo da superfície da membrana e dos piezoresistores.



Excitando a ponte de Wheatstone com uma corrente de 2 mA, que é a corrente utilizada na simulação, a potência dissipada pelos piezoresistores é de aproximadamente 15 mW. Como pode ser observado na figura 62, esse calor provoca uma variação da temperatura sobre a membrana, porém o efeito que ela provoca pode ser desprezado, visto que essa elevação da temperatura é de magnitude inferior a $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essa ordem de grandeza de diferencial de temperatura sobre a superfície é insignificante para afetar o desempenho do sensor de pressão. Conseqüentemente, a corrente de excitação da ponte pode ser considerada adequada, pois não provoca alta dissipação de calor e gera um bom nível de tensão (alimentação de aproximadamente 7,5 V).

4.2 Resultados Práticos Intermediários

Nessa seção são apresentados os resultados dos testes e ensaios que foram elaborados durante a construção do sensor, com objetivo de analisar e selecionar os materiais e componentes que fazem parte do dispositivo final.

4.2.1 Avaliação dos Adesivos de Fixação

De acordo com o método descrito no item 3.3.3.2, foram realizadas as medidas de resistência dos piezoresistores para cada adesivo testado. A tabela 3 apresenta os valores médios de resistência encontrados para os piezoresistores com diferentes deformações e diferentes

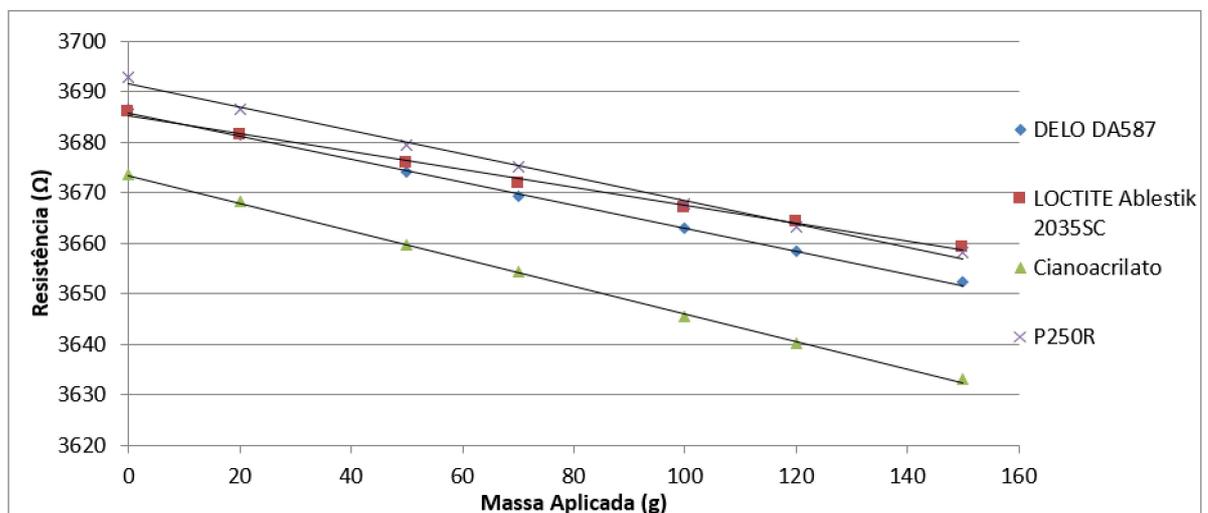
adesivos. No gráfico da figura 63 é possível visualizar o comportamento da resistência com os diferentes adesivos utilizados.

Tabela 3 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos

massa (g)	DELO DA587		LOCTITE Ablestik 2035SC		Cianoacrilato		P250R	
	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad
0	3686,45	0,173	3685,93	0,155	3673,61	0,142	3692,87	0,109
20	3681,34	0,136	3681,58	0,133	3668,21	0,094	3686,53	0,099
50	3674,04	0,143	3675,85	0,105	3659,64	0,159	3679,34	0,105
70	3669,37	0,243	3671,93	0,114	3654,24	0,092	3675,05	0,085
100	3662,86	0,285	3667,14	0,119	3645,49	0,124	3667,90	0,100
120	3658,40	0,160	3664,27	0,120	3640,24	0,100	3663,30	0,093
150	3652,32	0,144	3659,08	0,140	3633,15	0,102	3658,15	0,091

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 63 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos



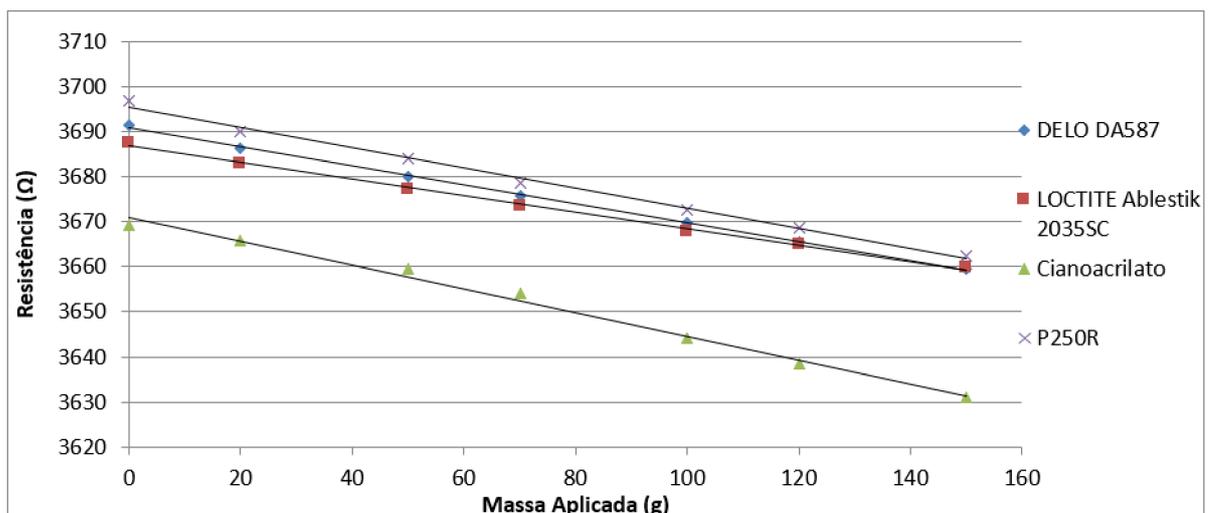
Fonte: Elaborado pelo autor

Após a conclusão desse primeiro teste, as amostras foram submetidas a uma etapa de *burn in*, ou seja, elas foram mantidas a uma temperatura elevada por um período de tempo para avaliar se ocorre alguma mudança no comportamento dos sensores de deformação, como por exemplo a degradação do adesivo de fixação. As amostras foram levadas a uma estufa e mantidas por 46 horas a uma temperatura de 85 °C. Após esse período de tempo foram coletadas todas as medidas novamente, sob as mesmas condições das medições anteriores, descritas anteriormente. A tabela 4 apresenta os valores médios de resistência encontrados para os piezoresistores com diferentes deformações e diferentes adesivos. No gráfico da figura 64 é possível visualizar o comportamento da resistência com os diferentes adesivos utilizados.

Tabela 4 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos após *burn in*

Massa (g)	DELO DA587		LOCTITE Ablestik		Cianoacrilato		P250R	
	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad	R (Ω)	desv pad
0	3691,31	0,106	3687,57	0,120	3669,32	0,114	3696,90	0,116
20	3686,39	0,097	3683,02	0,092	3665,73	0,101	3690,01	0,159
50	3680,06	0,082	3677,12	0,096	3659,51	0,123	3684,00	0,105
70	3675,75	0,125	3673,50	0,102	3654,13	0,126	3678,59	0,085
100	3669,91	0,131	3667,67	0,094	3644,16	0,116	3672,75	0,100
120	3665,39	0,580	3664,89	0,118	3638,52	0,115	3668,61	0,091
150	3659,55	0,114	3659,93	0,103	3630,98	0,130	3662,42	0,091

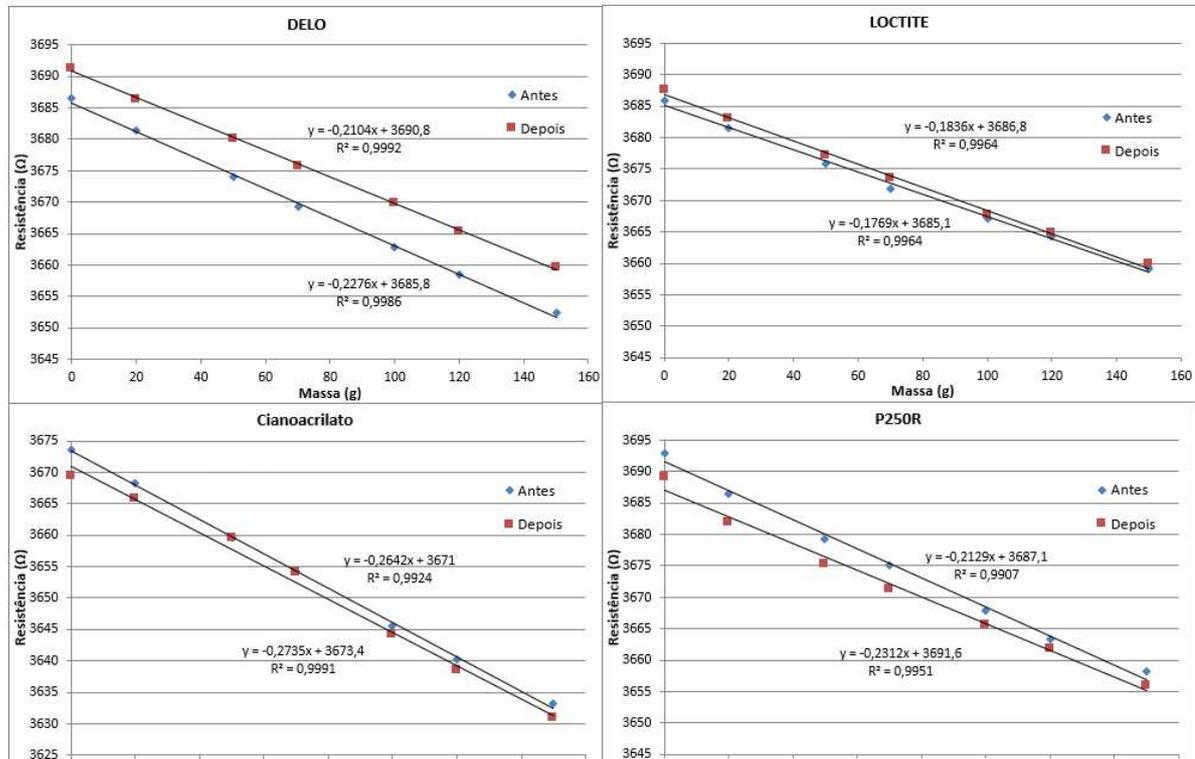
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 64 – Resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos após *burn in*

Fonte:Elaborado pelo autor

O gráfico da figura 65 apresenta o comparativo entre as medições realizadas antes e depois do *burn in*. Nota-se que em todos os casos ocorreu uma variação significativa das resistências dos piezoresistores. No entanto esse fato pode ser explicado pela diferença de temperatura das amostras nos dois momentos de medição. Como descrito anteriormente, os piezoresistores utilizados apresentam uma variação média de $3,35 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Portanto, uma variação de apenas 1°C é suficiente para provocar a mudança de resistência encontrada nos testes.

Figura 65 – Comparativo da resistência dos piezoresistores quando deformados, utilizando diferentes adesivos antes e após *burn in*

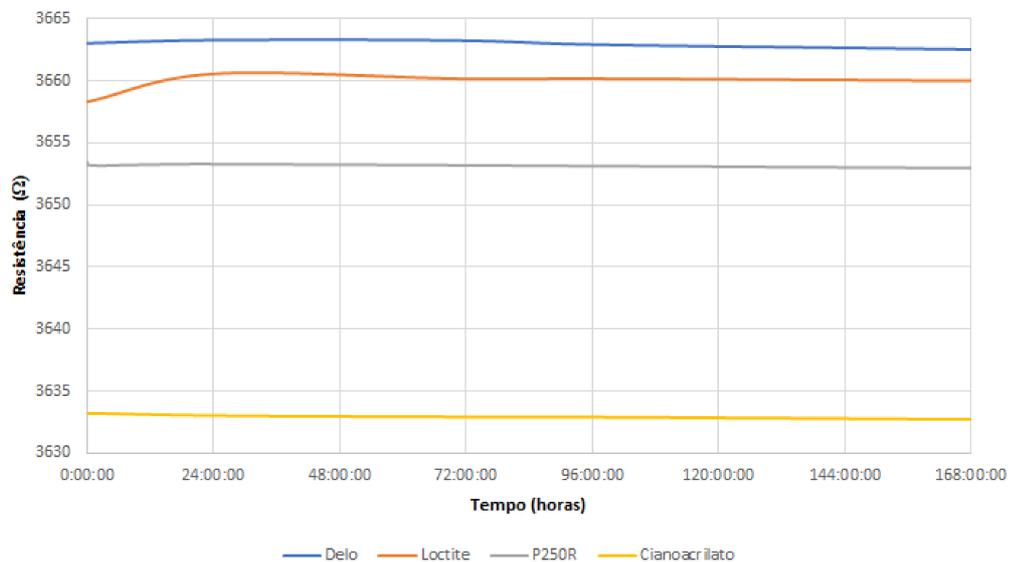


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Teste de *Creeping*

Para avaliar a performance e desempenho da fixação do piezoresistor à membrana de deformação é realizado um teste em que se verifica a mudança da resistência do piezoresistor com a passagem do tempo, quando o conjunto é submetido a uma deformação constante. Nesse caso está sendo avaliado não só o *creeping* do adesivo, mas sim de todo o conjunto - adesivo, membrana de deformação e o próprio piezoresistor. Justamente por ser possível avaliar o comportamento de todos os componentes ao mesmo tempo tendo presente as relações entre cada um deles, é aconselhável que esse teste seja realizado com todos os componentes juntos. Para isso, os piezoresistores foram fixados à uma membrana de deformação de aço inoxidável utilizando diferentes adesivos. Essa membrana foi submetida a uma deformação constante por um período de uma semana, totalizando 168 horas. Ao longo desse período a temperatura das amostras foi controlada de forma a permanecer constante. Durante esse período foi realizada a medida de resistência de cada um dos piezoresistores fixados a ela. Para cada adesivo analisado, foi fixado um total de seis piezoresistores à membrana, aumentando a quantidade de amostras e minimizando os efeitos e variações do processo construtivo dos dispositivos e do método de medição. O gráfico da Figura 66 apresenta a resistência dos piezoresistores ao longo do teste.

Figura 66 – Medida de resistência dos piezoresistores durante o teste de *creep* com diferentes adesivos



Fonte: Elaborado pelo autor

A combinação de componentes que melhor se configura para a aplicação desejada é a que apresenta a menor intensidade de *creeping*. Ou seja, esse fenômeno é algo indesejado para o funcionamento do sensor, visto que é difícil de estabelecer a diferença entre o *creeping* e uma variação real da deformação da membrana. A Tabela 5 apresenta o *creeping* que o conjunto apresentou para cada um dos adesivos analisados.

Tabela 5 – *Creeping* dos adesivos analisados

Adesivo	<i>Creep</i> (ppm)
Delo	136
Loctite	-465
Cianoacrilato	130
P250R	72

Fonte: Elaborado pelo autor

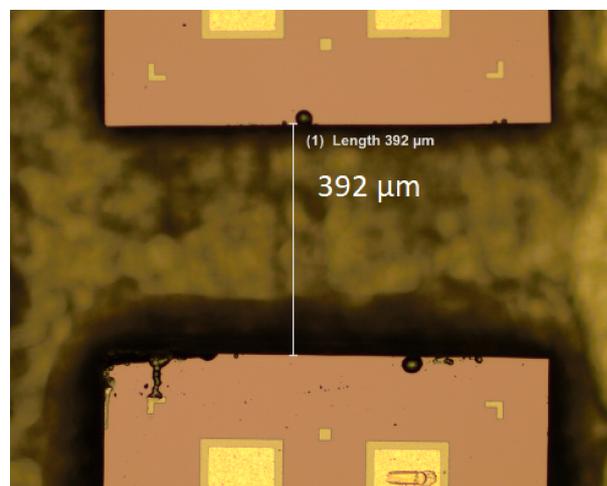
Ao observar os valores de *creeping* encontrados no experimento, verifica-se que o adesivo P250R proporcionou a menor intensidade de *creeping*. Na sequência ficaram o adesivo a base de cianoacrilato, o DELO e, por último o Loctite. Observa-se também uma característica importante do adesivo Loctite, pois ele foi o único que obteve um aumento da resistência com o passar do tempo. Como o esforço de deformação da membrana se manteve constante, esse aumento na resistência é interpretado como um descolamento do piezoresistor da membrana, visto que a resistência do piezoresistor sofre um aumento somente se houver uma diminuição em sua deformação. Já os demais piezoresistores tiveram um comportamento oposto, pois continuaram reduzindo a resistência. Ou seja, os piezoresistores continuaram se deformando no sentido da

deformação inicial. Essa é uma característica típica do *creeping* da membrana de deformação e não do adesivo. Quando o material da membrana sofre uma deformação elástica espontânea, essa rápida deformação é seguida por uma deformação adicional dependente do tempo. Tendo em vista esses pontos destacados, o adesivo que apresentou a melhor performance foi o P250R, pois obteve a menor intensidade de *creeping*.

4.2.3 Avaliação Térmica

Foi executado um experimento em que buscou-se avaliar o comportamento térmico do conjunto que compõe a célula de medição do sensor de pressão. Com base nesse teste, envolvendo todos componentes e materiais utilizados na construção do conjunto, verificou-se o seu comportamento frente a diferentes temperaturas. Esse teste também teve como finalidade verificar de forma prática os efeitos da dilatação térmica verificados na simulação descrita no item 4.1.4 do presente trabalho e também avaliado a mudança de posicionamento dos piezoresistores de deformação da região central da membrana de deformação. Para isso, além dos protótipos do *layout* inicial, foram construídos mais três células de medição do sensor de pressão, nos quais os piezoresistores centrais foram deslocados cada um de $200\ \mu\text{m}$ para as bordas, resultando em afastamento central de $400\ \mu\text{m}$. A figura 67 apresenta o afastamento resultante entre os dois piezoresistores centrais.

Figura 67 – Afastamento dos piezoresistores centrais em protótipo

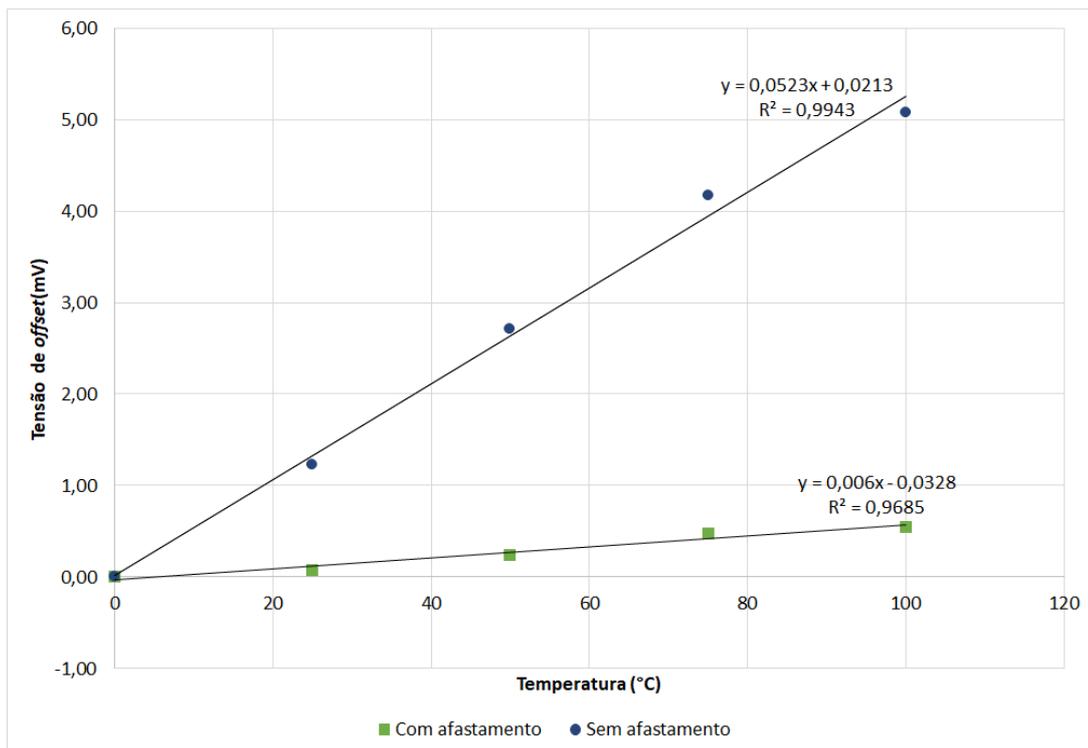


Fonte:Elaborado pelo autor

O teste foi realizado utilizando três amostras para cada um dos dois diferentes posicionamentos. Não foi aplicada nenhuma pressão ao sensor, os testes foram restritos quanto a sua temperatura de trabalho. Durante o teste foi monitorada a tensão diferencial da ponte de Wheatstone, gerando um gráfico que mostra a variação da tensão de *offset* do sensor. O gráfico da figura 68 apresenta os dados obtidos no testes para ambas as disposições dos piezoresistores sobre a membrana. Para a apresentação dos resultados através do gráfico, foi subtraído dos

demais valores medidos o valor de *offset* inicial. Parte-se do valor de 0 mV quando a temperatura de trabalho foi de 0 °C. Esse ajuste foi realizado para uma melhor apresentação e compreensão dos dados, visto que o valor absoluto de *offset* é diferente para cada uma das amostras de sensores. Além disso, para essa análise em específico, está sendo verificada a taxa de variação de *offset* em função da temperatura de trabalho.

Figura 68 – Sinal de *offset* do sensor de pressão para diferentes temperaturas para o sensor sem e com afastamento dos piezoresistores centrais.



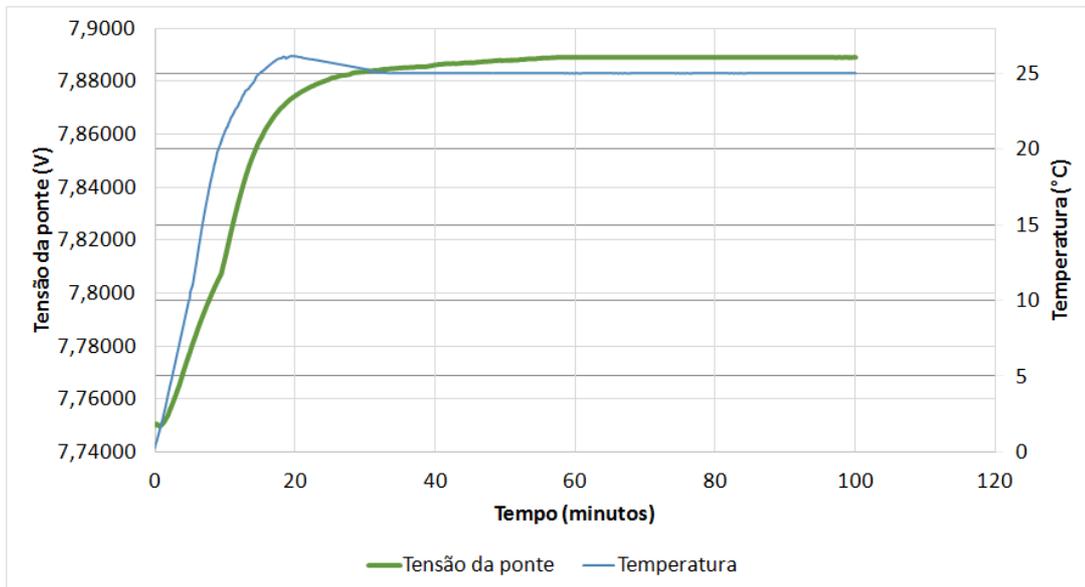
Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na figura 68, o experimento prático comprovou o resultado obtido em ambiente de simulação, no qual a mudança no posicionamento dos sensores centrais resulta na redução da variação de *offset* com a temperatura.

Durante esse mesmo teste foi realizada uma análise de como o sensor de pressão se comporta durante a sua mudança de temperatura de trabalho. Essa análise é importante, pois durante os testes, ao modificar a temperatura, deve-se garantir que as amostras estejam já estabilizadas termicamente, para que então a caracterização seja executada. Uma característica observada foi a tensão de alimentação da ponte, que está diretamente relacionada com a resistência da ponte. O gráfico da figura 69 apresenta a tensão da ponte ao longo do tempo, sendo que no instante inicial a temperatura do ambiente onde os sensores estavam presentes foi alterada de 0 para 25 °C. É possível observar que o tempo necessário para a estabilização do sensor é de aproximadamente 60 minutos. Portanto, constata-se que toda vez que, durante a caracterização, a temperatura de

trabalho do sensor for alterada, deve-se aguardar um intervalo de pelo menos 60 minutos antes de as medidas serem realizadas.

Figura 69 – Tensão da ponte durante mudança de temperatura de 0 para 25 °C



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Análise da Conexão elétrica

Foram avaliadas três formas possíveis de conexão elétrica dos piezoresistores de deformação. A primeira delas foi através da solda de fios, técnica conhecida e consolidada na construção de sensores de pressão. As outras duas foram baseadas no uso do adesivo condutivo anisotrópico, o que permite simplificar de forma significativa o processo construtivo do sensor, visto que não se faz necessário utilizar o processo de solda de fios em cada um dos dispositivos em fabricação.

Durante os testes nos protótipos que foram construídos utilizando adesivos condutivos, verificou-se que eles apresentavam uma variação no seu sinal de saída, que possui um comportamento similar a um ruído elétrico. A intensidade desse ruído era relevante quando comparado com o sinal de resposta do sensor. Esse comportamento era observado mesmo sem submeter pressão a ele e mantendo as condições ambientais de funcionamento. Como isso só foi observado quando se utilizava a conexão elétrica por adesivo condutivo, descarta-se a hipótese de que a fonte para esse comportamento tenha como origem as demais partes que compõem o sensor. Para isso, foi observado esse sinal de ruído e verificado seu comportamento e comparado com o protótipo que utiliza a solda de fios como forma de conexão elétrica. Para caracterizar a intensidade do ruído, foi calculado o valor de SNR (Relação Sinal Ruído, do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*) do sinal de saída.

Quando se analisa o sinal de saída do protótipo que utiliza a conexão elétrica por solda de

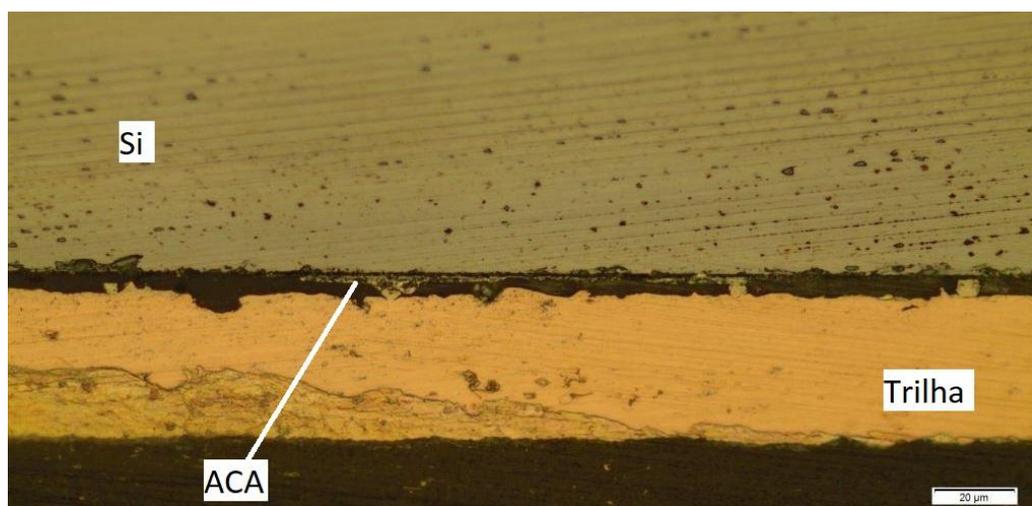
fios, verifica-se que o valor de SNR é de 41,17 dB. Já no protótipo que foi construído utilizando Adesivo Condutivo Anisotrópico essa relação de ruído no sinal passou para 25,32 dB. Esse é um valor consideravelmente pior do que o outro, o que compromete o desempenho do sensor. Uma outra forma de avaliar a qualidade da conexão elétrica dos terminais nessa condição é medir diretamente a resistência de contato. Durante os testes, verificou-se uma resistência de aproximadamente $360\text{ m}\Omega$. Por mais que essa resistência seja desprezível ao comparar com a resistência do piezoresistor, ela é um indicativo da qualidade da conexão elétrica. Para verificar como ocorreu o contato entre o piezoresistor e a placa flexível, foi realizado um *cross section* da conexão e analisada a imagem em microscópio óptico (ver figuras 70 e 71).

Figura 70 – Contato entre piezoresistor e placa flexível sem *stud bump* (zoom 10X)



Fonte:Elaborado pelo autor

Figura 71 – Contato entre piezoresistor e placa flexível sem *stud bump* (zoom 50X)



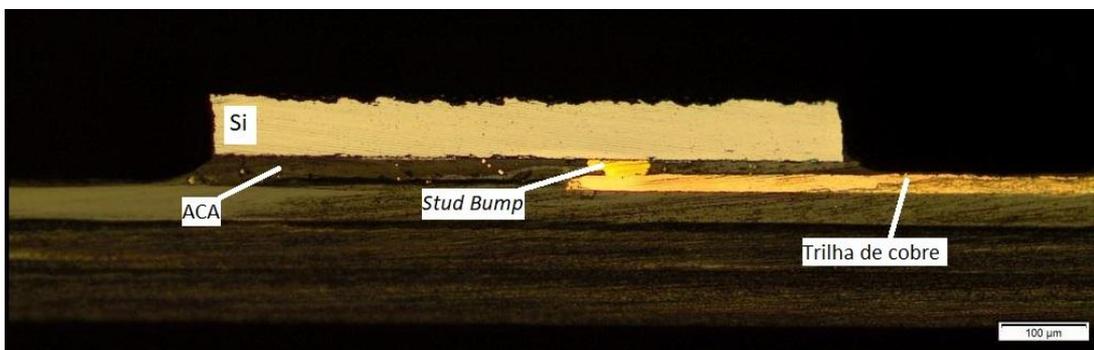
Fonte: Elaborado pelo autor

Observando as figuras 70 e 71 verifica-se que o terminal do piezoresistor não faz contato mecânico direto com o terminal do substrato flexível. A figura 71 mostra que existe uma região entre os terminais que são preenchidas pelo adesivo condutivo. Observa-se também a presença de algumas partículas metálicas, que são responsáveis por realizar o contato elétrico. No entanto,

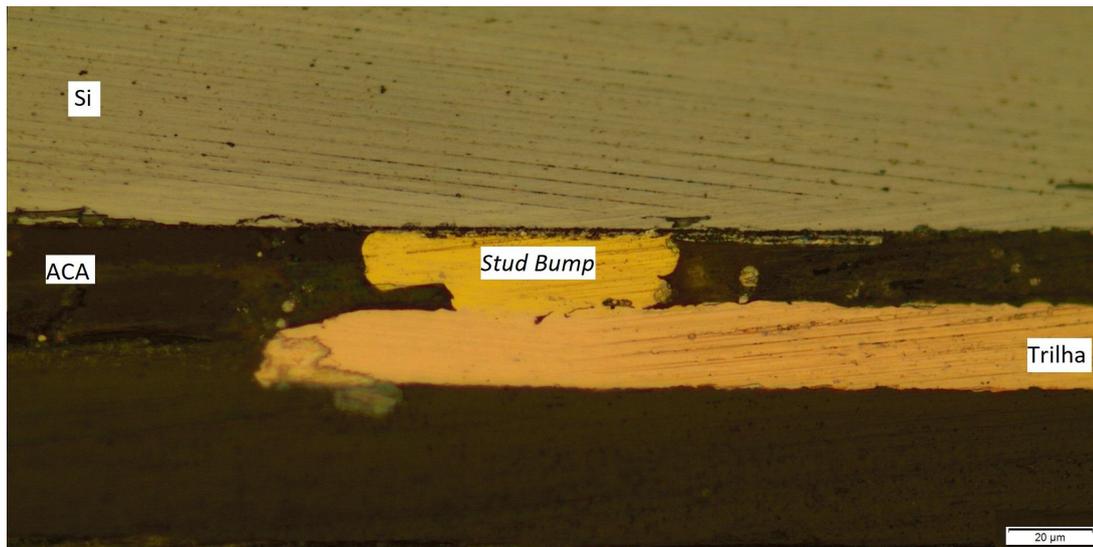
é notório que essa área de contato não é grande, podendo comprometer a qualidade do contato. Uma das causas do problema pode estar relacionada às características do terminal do piezoresistor. Os seus terminais foram construídos de alumínio e possuem uma espessura de 850nm. O uso do ACA requer que, durante a cura ele seja submetido a uma pressão que seja capaz de quebrar a camada oxidada do alumínio, deformando o material do terminal. No entanto, existe uma fina camada de alumínio que limita a área de contato entre o terminal e as partículas metálicas presentes no adesivo condutivo.

Uma alternativa para esse processo de conexão elétrica, a fim de minimizar o efeito do ruído e melhorar a conexão elétrica é utilizar o processo de *stud bump* nos terminais do piezoresistor. Dessa forma, cria-se um *bump* de ouro sobre os terminais do piezoresistor. O ouro é um material que possui a característica de ser macio, deformando-se facilmente. Portanto, ao aplicar pressão e calor durante a cura do adesivo condutivo, o ouro sofre uma deformação, que proporciona uma maior área de contato entre os terminais do piezoresistor e da placa flexível. Assim como para a conexão sem *stud bump*, foi realizada uma análise da conexão elétrica por meio da imagem de microscopia do *cross section* da conexão elétrica. As figuras 72 e 73 mostram o *cross section* do contato entre o piezoresistor e a placa flexível utilizando o *stud bump*.

Figura 72 – Contato entre piezoresistor e placa flexível com *stud bump* (zoom 10X)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 73 – Contato entre piezoresistor e placa flexível com *stud bump* (zoom 50X)

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao introduzir o processo de *stud bump*, verificou-se que a qualidade do contato elétrico apresentou melhora significativa. A intensidade do ruído passou para 31,9 dB. Ao medir a resistência de contato para essa configuração, também identificou-se que houve uma redução, indicando que realmente ocorreu um contato melhor entre o piezoresistor e a placa flexível. A medida indicou uma resistência de contato de aproximadamente $70\text{ m}\Omega$.

4.3 Resultados dos Testes e Ensaios

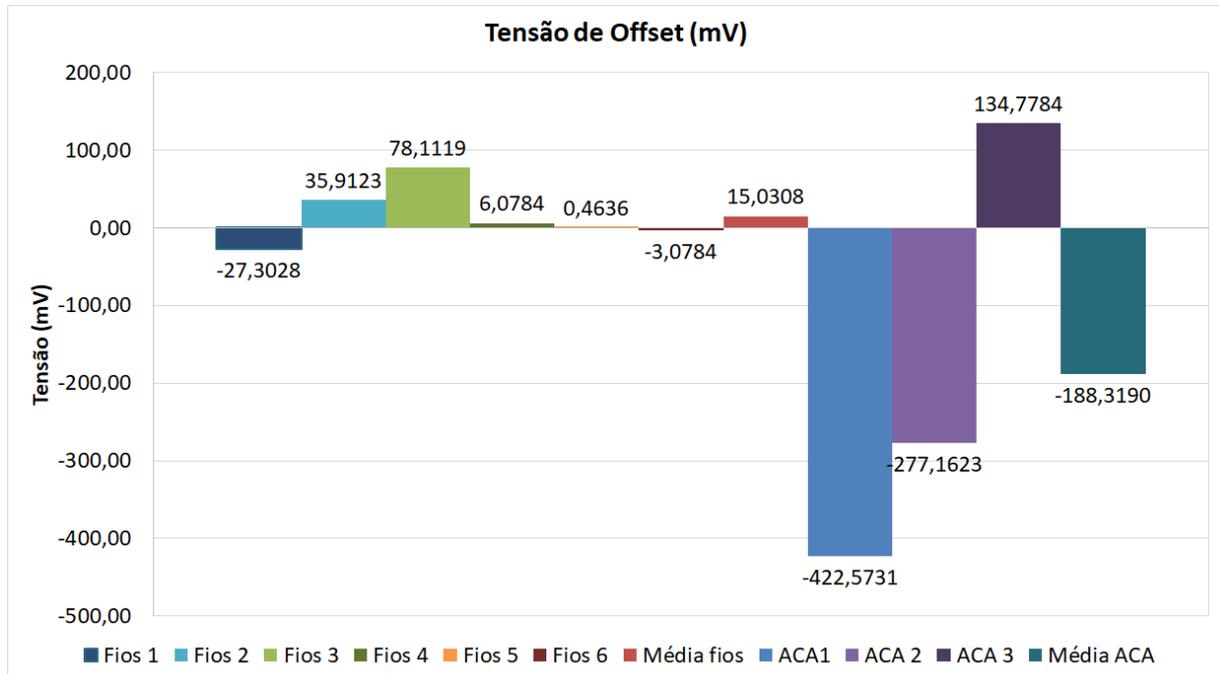
Nessa seção são apresentados os resultados dos testes e ensaios que foram implementados com os protótipos construídos. Os mesmos testes foram executados com ambas as configurações de protótipos montados conforme descrito no item 3.3.4. No total foram construídas 6 amostras de sensor de pressão na configuração de solda de fios com espaçamento central e 3 amostras que utilizam adesivo condutivo e *stud bump* para realizar a conexão elétrica.

4.3.1 Teste de Pressão Estática

Os resultados referentes aos testes de pressão estática foram obtidos por meio da metodologia descrita no item 3.3.5.1 do presente trabalho. Nele, diferentes pressões são aplicadas ao sensor de pressão para diferentes temperaturas de operação. No entanto, foi verificado que cada sensor de pressão construído possui um valor de tensão de *offset* diferente dos demais. Isso é algo esperado, visto que os sensores piezoresistivos de deformação utilizados em sua construção não possuem exatamente a mesma resistência. Além disso, o processo produtivo de cada sensor pode apresentar algum tipo de variação, podendo introduzir tensões residuais em seus dispositivos que podem afetar o balanceamento da ponte de Wheatstone. O gráfico da figura 74 apresenta os

valores de *offset* para temperatura de (0 °C) e sem aplicação de pressão de cada um dos sensores caracterizados.

Figura 74 – Tensão de *offset* de cada sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que há uma grande variação nos valores de *offset*, sendo que as amostras construídas com adesivo condutivo possuem uma magnitude consideravelmente superior às amostras construídas pelo processo de solda de fios. Um dos motivos que pode justificar esse maior valor de *offset* se deve ao processo de cura do adesivo condutivo. O ACA exige que o seu processo de cura seja realizado sob pressão em temperatura elevada. Esses fatores favorecem a criação de tensões residuais nos sensores de deformação que afetam justamente o equilíbrio da ponte de Wheatstone.

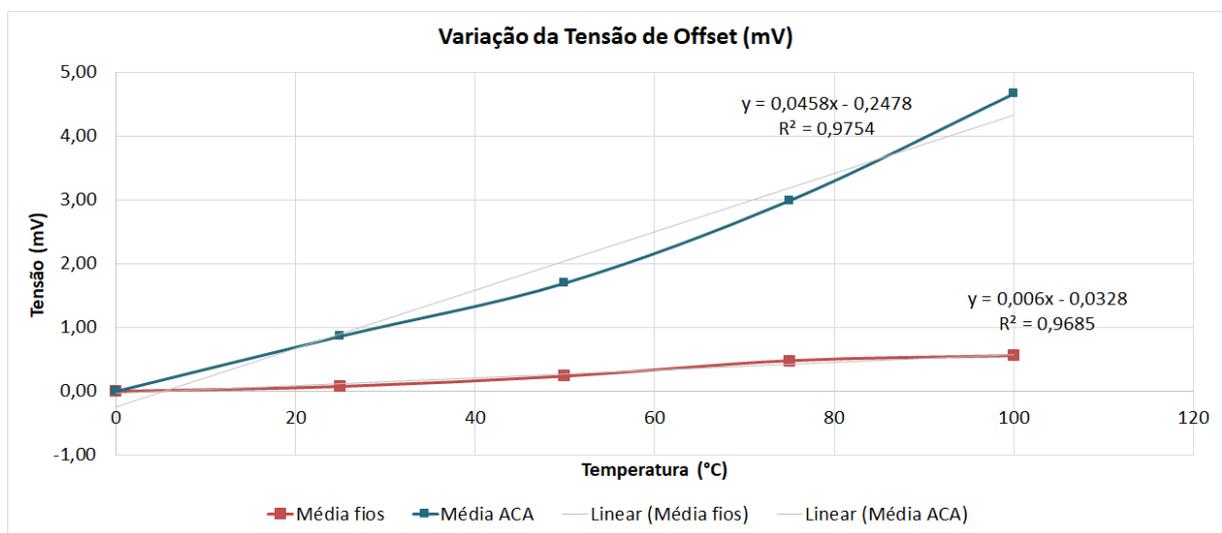
O processo de construção do sensor de pressão utilizando adesivo condutivo passa pelo processo de cura do ACA e do adesivo de fixação dos sensores de deformação na membrana metálica. Esses são dois processos nos quais os adesivos devem ser curados sob pressão constante, podendo gerar deformações residuais nos sensores de deformação e, conseqüentemente, alteração em suas resistências. Já a construção do sensor de pressão baseado no processo de solda de fios, utiliza somente uma cura de adesivo sob pressão. O que explicaria essa menor magnitude nas tensões de *offset* se comparado com os sensores que utilizam adesivos condutivos para conexão elétrica.

Todavia, esses diferentes valores de *offset* dificultam a comparação e análise dos resultados. Tendo isso em vista, foi descontado esse valor inicial da tensão de *offset* das medidas

de cada um dos sensores. Dessa forma somente são consideradas as variações de tensão, cuja origem é a variação de pressão e/ou a variação de temperatura.

A primeira característica observada no funcionamento dos sensores de pressão construídos foi o comportamento da tensão de *offset* do sensor de pressão para diferentes temperaturas. Para isso, foi medido diferencial de tensão de saída do sensor sem aplicação de pressão nas temperaturas de 0, 25, 50, 75 e 100 °C. O gráfico da figura 75 apresenta os valores medidos para cada configuração de protótipo, já considerando a compensação dos diferentes valores de tensão de *offset*, conforme descrito anteriormente.

Figura 75 – Tensão de *offset* para as duas configurações de sensor

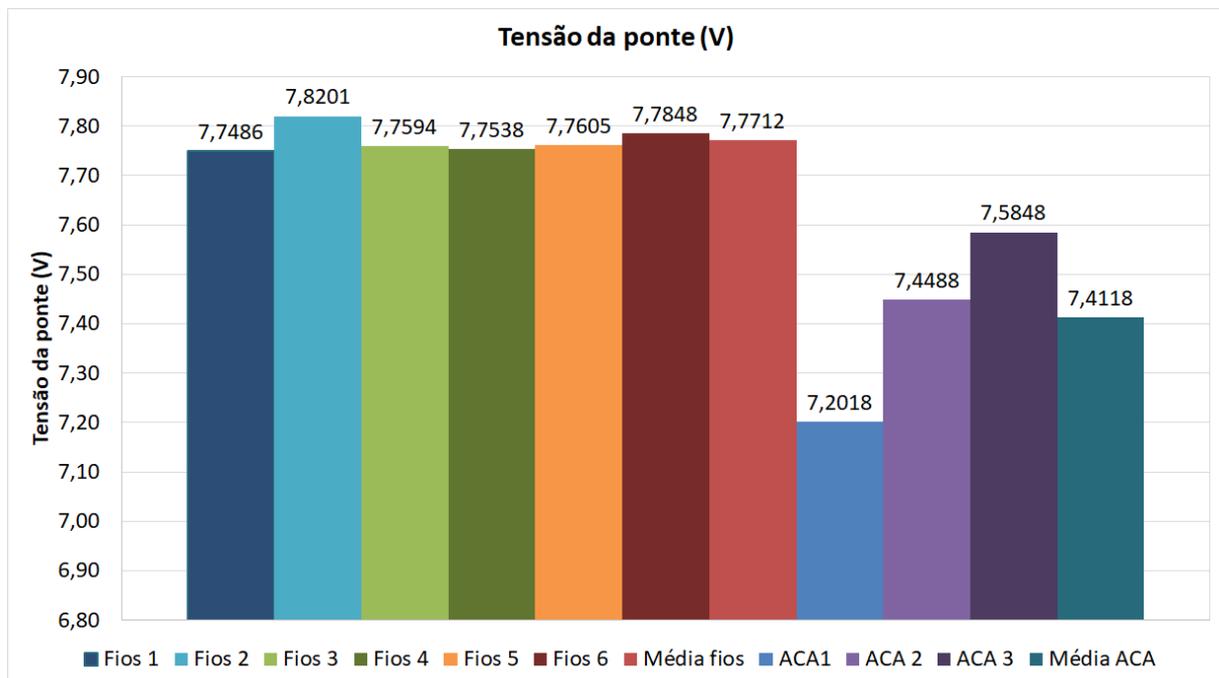


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o gráfico apresentado pela figura 75, a tensão de *offset* dos sensores de pressão tende a aumentar com o aumento de temperatura. Além disso, nota-se um comportamento mais acentuado nas amostras que possuem a conexão elétrica feita por adesivo condutivo. Nota-se que além deles apresentarem um valor absoluto de *offset* maior, eles são mais sensíveis à temperatura de trabalho.

Além da tensão de *offset*, foi analisado o comportamento da resistência da ponte para diferentes temperaturas. Como a ponte é alimentada por uma corrente fixa de 2 mA, a variação na resistência pode ser observada pela tensão de alimentação da ponte. Dessa forma, foi medida essa tensão de alimentação para cada temperatura. Durante os testes de caracterização do sensor de pressão notou-se que, assim como os valores de *offset*, a resistência de cada ponte também não apresenta os mesmos valores, devido a variações do processo produtivo de cada piezoresistor de deformação. O gráfico da figura 76 apresenta os valores de tensão da ponte para temperatura de (0 °C) e sem aplicação de pressão, quando alimentada com 2 mA para cada um dos sensores caracterizados.

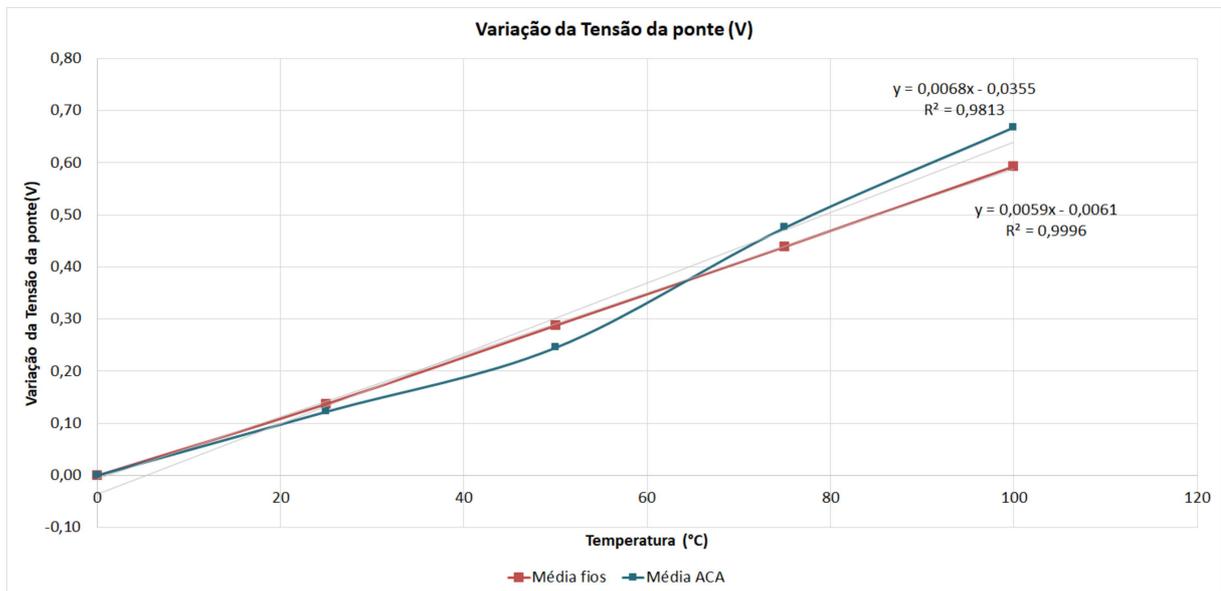
Figura 76 – Tensão da ponte em cada sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como foi realizado nas medidas de *offset*, para cada medida de tensão da ponte, foi subtraído o valor correspondente à tensão de alimentação da ponte para temperatura de 0 °C do respectivo sensor, obtendo a variação da medida do sensor com relação ao ponto inicial. Com isso, é possível realizar uma avaliação e comparação dos dados de cada amostra de forma mais clara. Os valores médios da tensão de alimentação da ponte em função da temperatura de trabalho para cada configuração de sensor pode ser verificado no gráfico da figura 77. O comportamento da tensão de alimentação, e conseqüentemente, da resistência da ponte, tende a possuir uma resposta proporcional à temperatura do ambiente ao qual o sensor está trabalhando. Observa-se no gráfico que ambos sensores apresentaram um comportamento muito similar, no entanto o sensor construído com ACA apresenta uma sensibilidade com a temperatura ligeiramente superior ao sensor de solda de fios. Por outro lado, o sensor construído com solda de fios apresenta uma resposta que mais se aproxima a uma reta, possuindo um coeficiente de determinação de 0,9996. O sensor construído com ACA possui um coeficiente de determinação de 0,9813 para sua tensão de alimentação em função temperatura de trabalho.

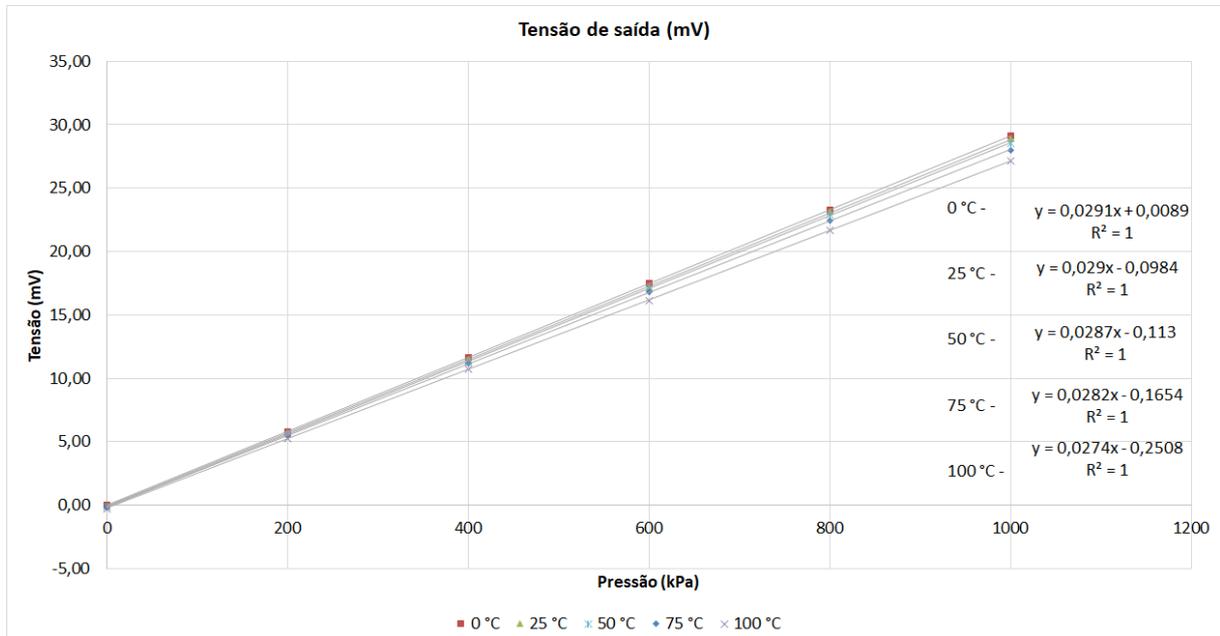
Figura 77 – Tensão de alimentação da ponte em função da temperatura de trabalho para cada configurações de sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

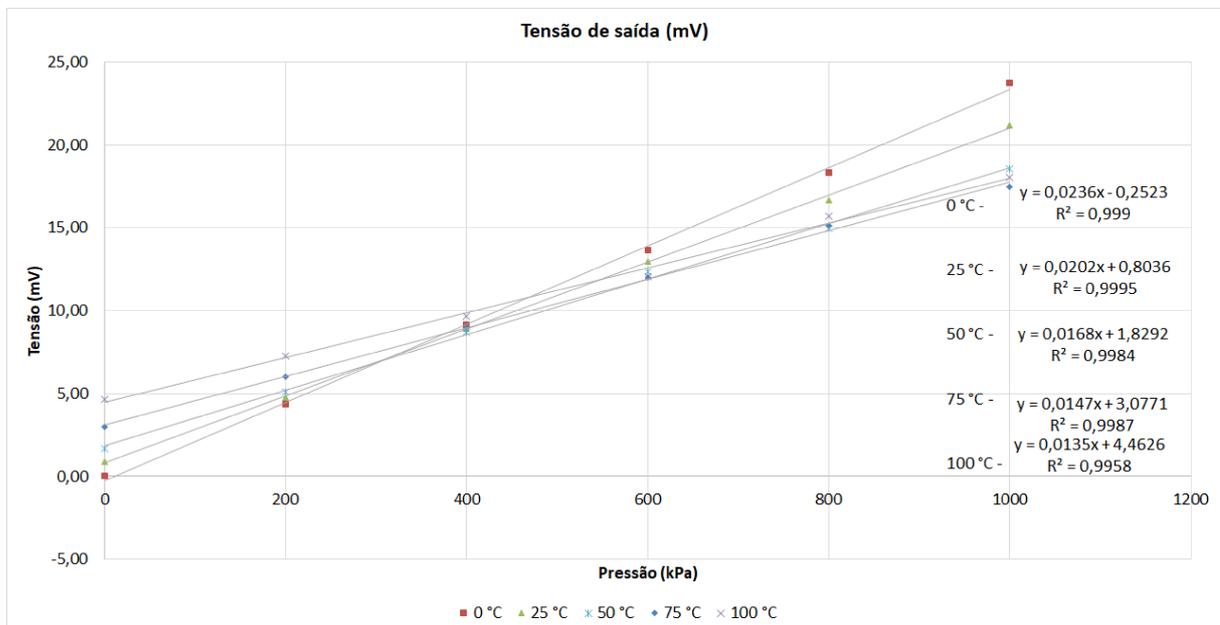
Após os testes que visam verificar como a temperatura afeta o sensor de pressão, foram realizadas as medidas em que a pressão era a grandeza física que atuava sobre o sistema. Esses testes foram realizados aplicando-se diferentes pressões, de 0 a 1 MPa e observado a tensão diferencial da ponte de Wheatstone. Essas medidas foram realizadas em diversas temperaturas, variando de 0 a 100 ° C, de acordo com o descrito no item 3.3.5.1 do presente trabalho. A figura 78 apresenta as medidas obtidas com as amostras dos sensores construídos com solda de fios e a figura 79 apresenta as medidas referentes às amostras com adesivo condutivo. Os dados apresentados nos gráficos representam a variação de tensão de saída comparado com a tensão de *offset* apresentada no gráfico 74.

Figura 78 – Tensão de saída do sensor com solda de fios em função da pressão, para diferentes temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 79 – Tensão de saída do sensor com adesivo condutivo em função da pressão, para diferentes temperaturas

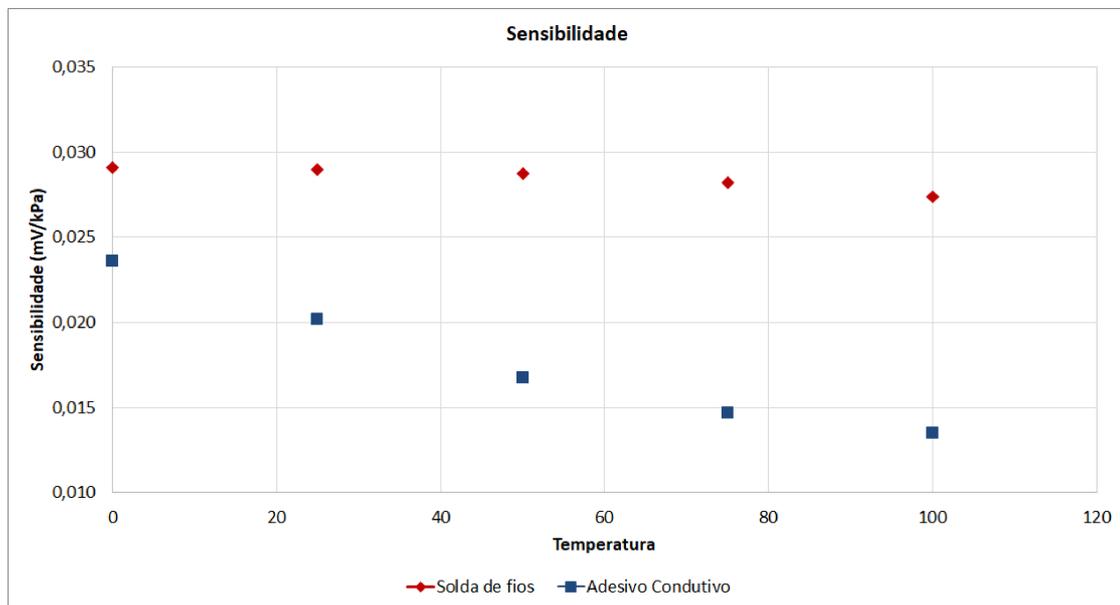


Fonte: Elaborado pelo autor

Observando o gráfico da figura 78 é possível notar que o sensor possui um comportamento linear com relação a pressão aplicada a ele. A variação média de tensão de saída do sensor de sua pressão inicial até a sua máxima pressão de trabalho de projeto foi de 29,107 mV. Nota-se também

que, além da variação da tensão de *offset* já explanado anteriormente, a sensibilidade do sensor apresenta variação de acordo com a sua temperatura de trabalho. Esse mesmo comportamento é observado nas amostras de sensor de pressão construídas com adesivo condutivo. Porém, neste caso, tanto a variação de *offset*, quanto a variação de sensibilidade se manifestaram de forma mais intensa, sendo mais suscetíveis a variação de temperatura de trabalho. Para avaliar o comportamento da sensibilidade dos dois tipos de sensores com a temperatura foi elaborado um gráfico (figura 80), que apresenta a sensibilidade média dos sensores para as diferentes temperaturas analisadas.

Figura 80 – Sensibilidade do sensor de pressão para diferentes temperaturas

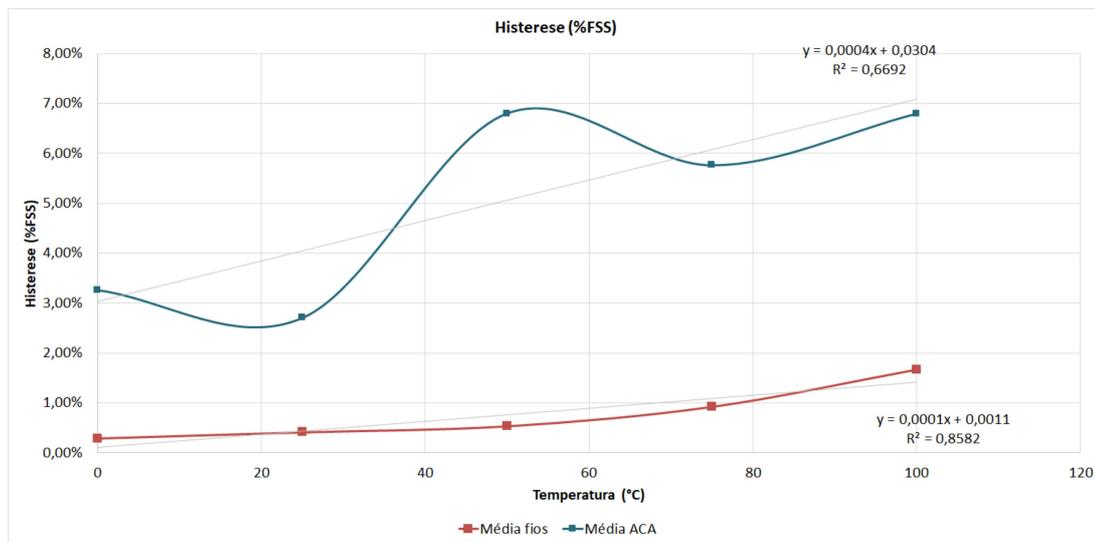


Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se por meio do gráfico da figura 80 que além de a sensibilidade do sensor que utiliza solda de fios ser maior do que os sensor com ACA, a variação de sensibilidade é inferior. Esse mesmo comportamento de redução da sensibilidade com o aumento da temperatura também foi observado durante os testes em ambiente de simulação. Isso se deve ao fato de que o coeficiente de piezoresistividade do material é alterado com a temperatura, sendo que o aumento da temperatura causa a redução de sua piezoresistividade. Portanto esse é um comportamento já esperado e busca-se minimizá-lo através da compensação térmica apresentado no presente trabalho.

Outros comportamentos observados durante os testes foram a histerese e a linearidade apresentadas pelos sensores de pressão. A histerese foi observada para todas as temperaturas medidas e pode ser verificada por meio do gráfico da figura 81, que apresenta os maiores valores de histerese de cada tipo de sensor para cada temperatura analisada. Nota-se que, em ambos os casos, a histerese possui a tendência de aumentar com o aumento da temperatura. Porém a histerese apresentada pelo sensor de pressão construído por solda de fios é significativamente inferior à apresentada pelo sensor construído por adesivo condutivo.

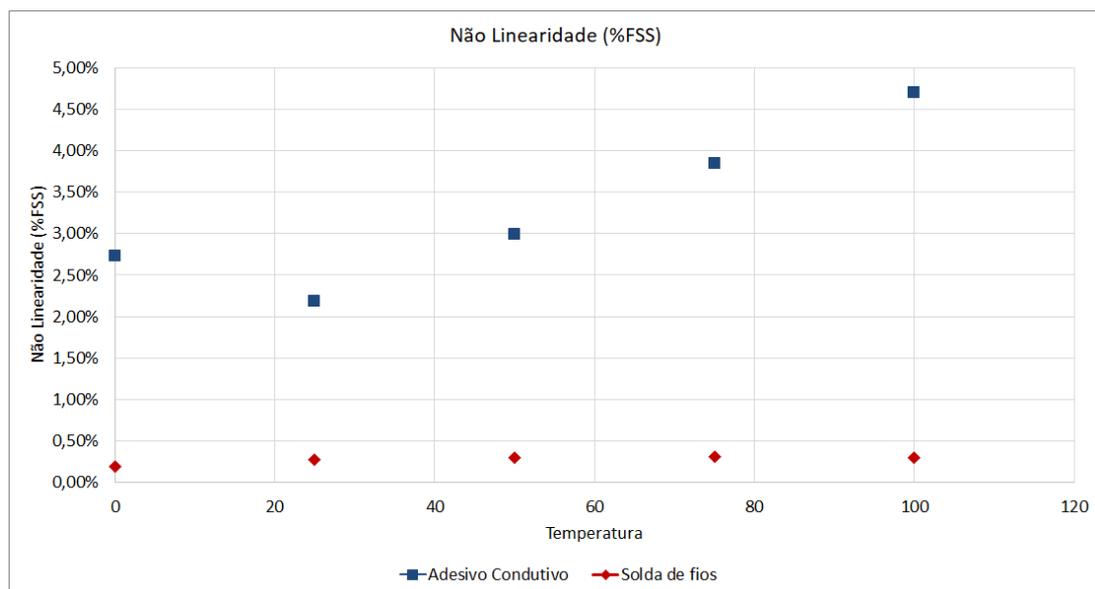
Figura 81 – Histerese dos sensores de pressão em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação à não linearidade da resposta dos sensores, também verificou-se que os sensor de pressão construído com adesivo condutivo apresenta valores superiores aos sensores construído por meio da solda de fios. A não linearidade para cada tipo de sensor de pressão pode ser verificada na figura 82. Observa-se também que ocorre um aumento da não linearidade do sensor construído com ACA. Já o sensor construído por solda de fios possui a não linearidade praticamente constante em todas as temperaturas analisadas.

Figura 82 – Não linearidade dos sensores de pressão em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados observados durante a caracterização dos sensores, verifica-se

que os sensores de pressão construídos por meio de solda de fios apresentam não só uma maior sensibilidade quanto à pressão aplicada sobre eles, mas também possuem melhor estabilidade térmica. Em todas as características analisadas, esse tipo de construção de sensor de pressão apresentou melhor desempenho se comparado aos sensores construídos por meio de adesivos condutivos. Isso denota que quando a aplicação na qual o sensor deve ser empregado necessita maior robustez e melhor sensibilidade, o sensor de pressão que utiliza solda de fios é o mais indicado.

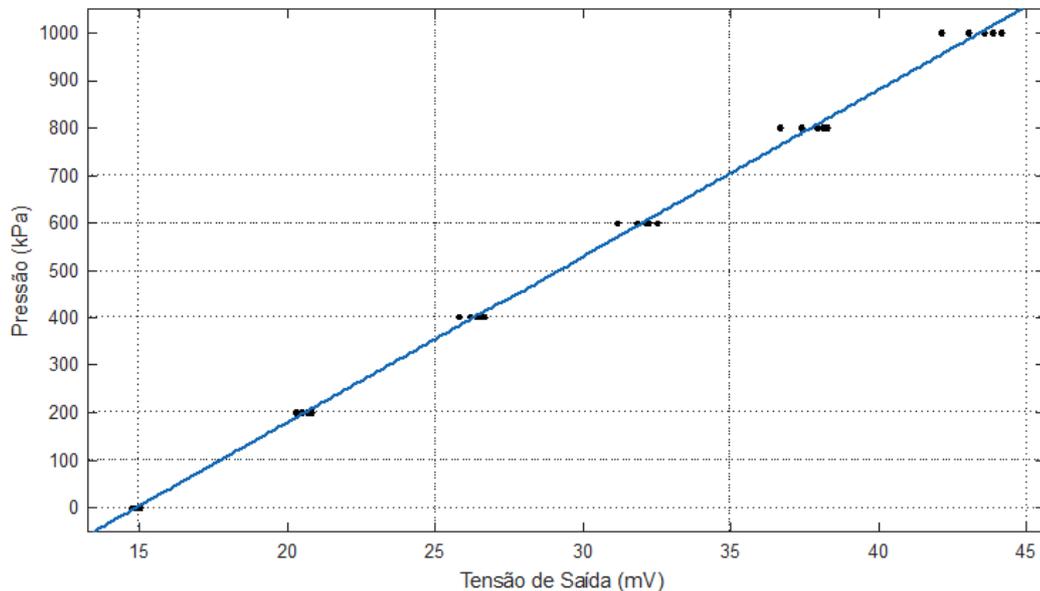
O sensor de pressão construído com adesivo condutivo apresenta menor sensibilidade e maior dependência com a temperatura de trabalho. Essas características estão justamente relacionadas ao uso do adesivo condutivo e ao processo de fabricação relacionado a ele. Uma das primeiras etapas na construção do sensor de pressão é a fixação e contato elétrico dos elementos piezoresistores à placa flexível. Como a cura do adesivo é feita por meio de pressão e temperatura, a cura pode ter ocorrido enquanto os piezoresistores sofriam deformações mecânicas que afetam não só a estabilidade da ponte de Wheatstone, mas também a sua própria sensibilidade e funcionamento. Outro fato importante é que os quatro piezoresistores que compõem a ponte podem não estar perfeitamente alinhados, podendo estar em alturas diferentes. Caso esses piezoresistores estejam em planos diferentes, ao fixá-los sobre a membrana de deformação eles estarão em alturas diferentes, criando dinâmicas de comportamento diferentes entre cada sensor que compõe a ponte de Wheatstone. Isso provoca um desbalanceamento no funcionamento da ponte.

4.3.1.1 Compensação Térmica

Após a coleta e análise dos dados resultantes do teste de pressão estático, foi implementado o processo de compensação térmica, de acordo com a descrição do item 3.3.6 do presente trabalho. No entanto para avaliar o quanto essa compensação traz de benefício para a grandeza na qual esta sendo medida, foi obtido primeiramente um modelo no qual a pressão aplicada ao sensor é obtida exclusivamente pela tensão de saída da ponte de Wheatstone. Nesse caso, a relação entre a pressão e os dados referentes às medidas dos sensores são aproximados a uma função de primeira ordem, que pode ser expressa pela equação 38. O gráfico da figura 83 apresenta a reta correspondente à equação 38. Além da reta são apresentadas as medidas obtidas para cada valor de pressão analisado nas diferentes temperaturas testadas. Para esse estudo foram utilizados os dados referentes à média dos valores obtidos nos testes com os sensores de pressão construídos com solda de fios.

$$Pressão[kPa] = 35,05V_{saída} - 521,5 \quad (38)$$

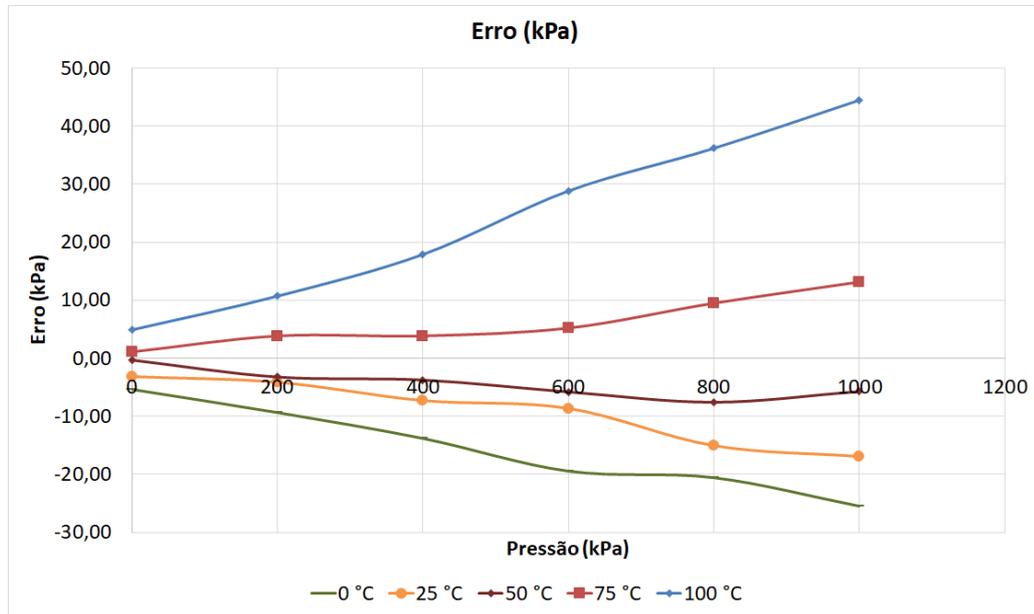
Figura 83 – Equação de primeira ordem que caracteriza a resposta do sensor sem compensação de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao observar o gráfico da figura 83 e comparando os dados experimentais nas diferentes temperaturas e pressões em que o sensor foi testado, com a reta descrita pela equação, verifica-se que o erro de medição aumenta quando aumenta-se a pressão. Isso está relacionado com a variação de sensibilidade provocada pela variação de temperatura. De acordo com a equação, para atingir o fim de escala de medição do sensor, em 1000 kPa, necessita-se de uma tensão de 43,41 mV. No entanto, em função da variação de temperatura, o valor referente a uma tensão de saída da ponte de 43,41 mV pode variar de 974,9 a 1044,9 kPa, totalizando uma variação de 70 kPa de erro. Cerca de 7 % do fundo de escala do sensor de pressão. Sendo assim, a não compensação da temperatura em que o sensor se encontra provoca um erro elevado. Para facilitar essa visualização, foi elaborado um gráfico contendo somente o erro de medição para cada temperatura entre a medida de referência e resultante da equação que não possui compensação térmica (ver figura 84).

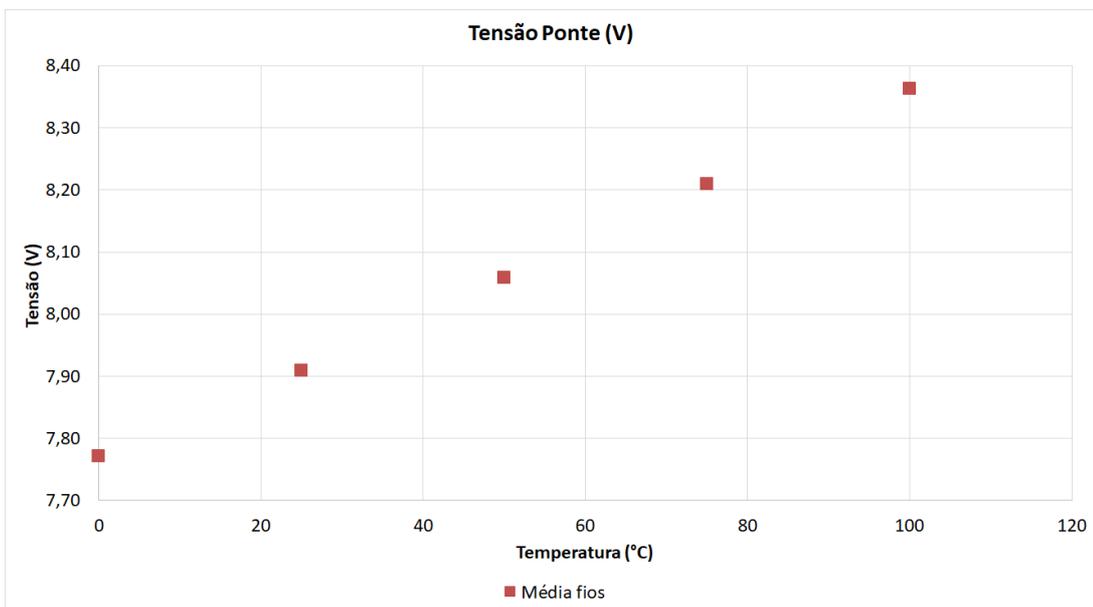
Figura 84 – Erro de medição para cada temperatura entre a medida de referência e resultante da equação que não possui compensação térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a realização da compensação térmica, inicialmente foi realizada linearização para encontrar a temperatura de trabalho do sensor de pressão, utilizando a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone. O gráfico da figura 85 apresenta os dados da tensão de alimentação da ponte para as diferentes temperaturas às quais as amostras do sensor de temperatura foram submetidas.

Figura 85 – Tensão de alimentação da ponte para as diferentes temperaturas testadas



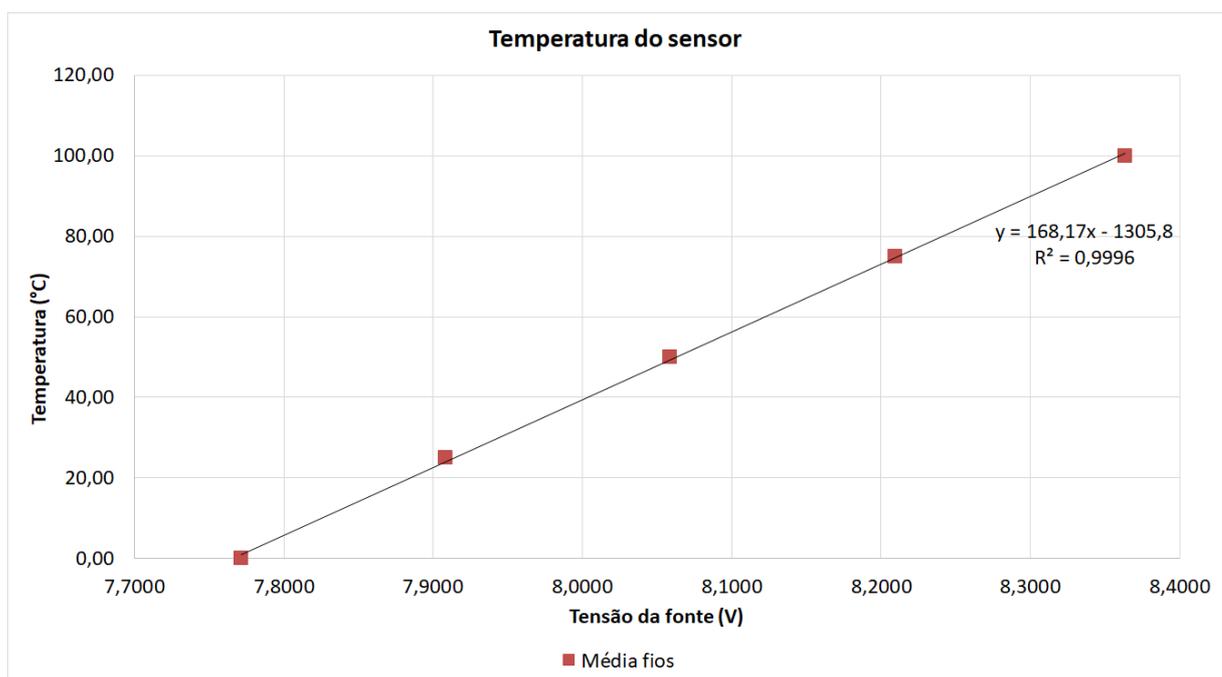
Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a realização dos testes, notou-se que a tensão de alimentação da fonte não sofre influência da pressão que é aplicada ao sensor. Portanto, é indiferente para essa análise relacioná-la à pressão. Os dados apresentados se referem à média dos valores das seis amostras para pressão de 0 kPa que utilizam conexão elétrica por solda de fios. Aproximando os resultados à uma função de primeiro grau, em que a variável independente é a tensão de alimentação da ponte, por meio da linearização, obtém-se uma reta que pode ser definida pela equação 39.

$$Temperatura[^\circ C] = 168,17V_{ponte} - 1305,8 \quad (39)$$

Ao observar essa reta e comparar com os dados obtidos de forma prática é possível inferir que essa reta define de forma aceitável a função que relaciona a tensão de alimentação da ponte com a temperatura à qual ela está submetida. O valor de R^2 também reforça essa condição, visto que ele possui um valor muito próximo à unidade. Os dados medidos e a resposta referente à equação encontrada podem ser observados no gráfico da figura 86.

Figura 86 – Temperatura de trabalho do sensor definida pela tensão da ponte



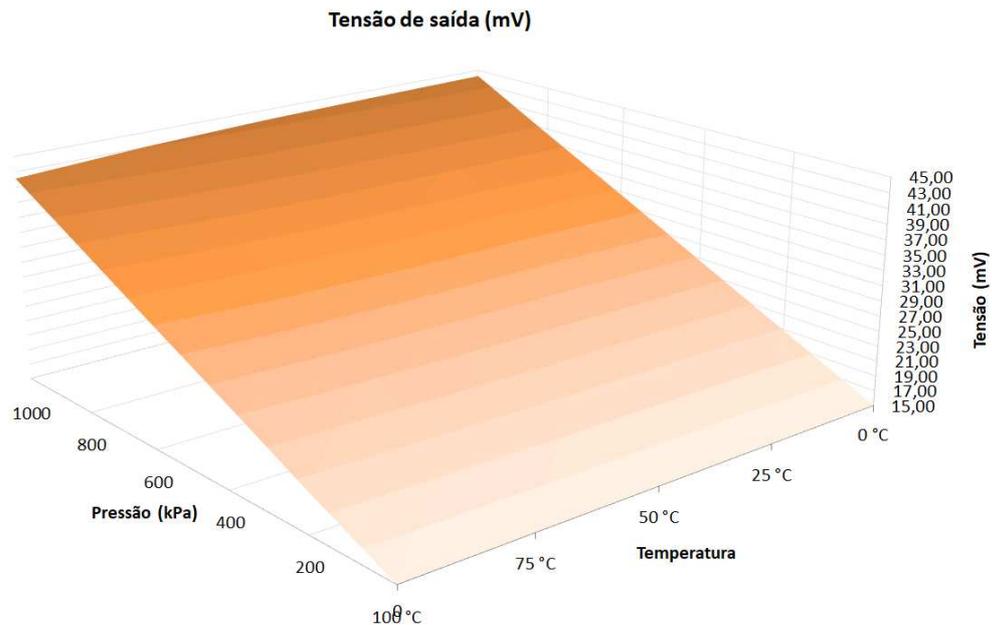
Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, sem a utilização de um novo sensor para medição da temperatura do ambiente em que o sensor se encontra, é possível determiná-la de forma simples e com boa precisão.

Após elaborar o método de obtenção de temperatura de trabalho do sensor, foram desenvolvidos e avaliados os diferentes métodos de compensação térmica da resposta do sensor de pressão. Para isso, utilizando os dados experimentais, foram obtidos os diferentes modelos avaliados e analisados quanto a sua eficiência em compensar a variação causada pela temperatura

na resposta do sensor. A figura 87 apresenta uma imagem contendo o plano formado pelos dados experimentais, em que plota-se a pressão aplicada ao sensor em função do valor da tensão aplicada à ponte e a tensão diferencial da saída da ponte de Wheatstone. Portanto, busca-se encontrar um plano representado por equações lineares que se aproximam ao plano formado pelas medidas.

Figura 87 – Dados de medição de pressão e temperatura do sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

A obtenção do plano que se aproxima aos dados experimentais foi adquirido por meio do método dos mínimos quadrados, em que aproximou-se esses dados a um modelo desejado. Para avaliar os diferentes modelos estudados, de acordo com o apresentado na tabela 2, foram determinados alguns parâmetros com o objetivo de avaliar como cada modelo se aproxima dos dados medidos. A tabela 6 apresenta os parâmetros de caracterização dos modelos.

Tabela 6 – Análise dos resultados de cada modelo avaliado

Modelo	R^2	SSE	RMSE	Coefficientes
M10	0,9978	7479,5	16,34	2
M11	0,9994	2075,6	8,76	3
M21	0,9998	603,21	4,91	5
M12	0,9999	254,41	3,19	5
M22	0,9999	250,82	3,23	6

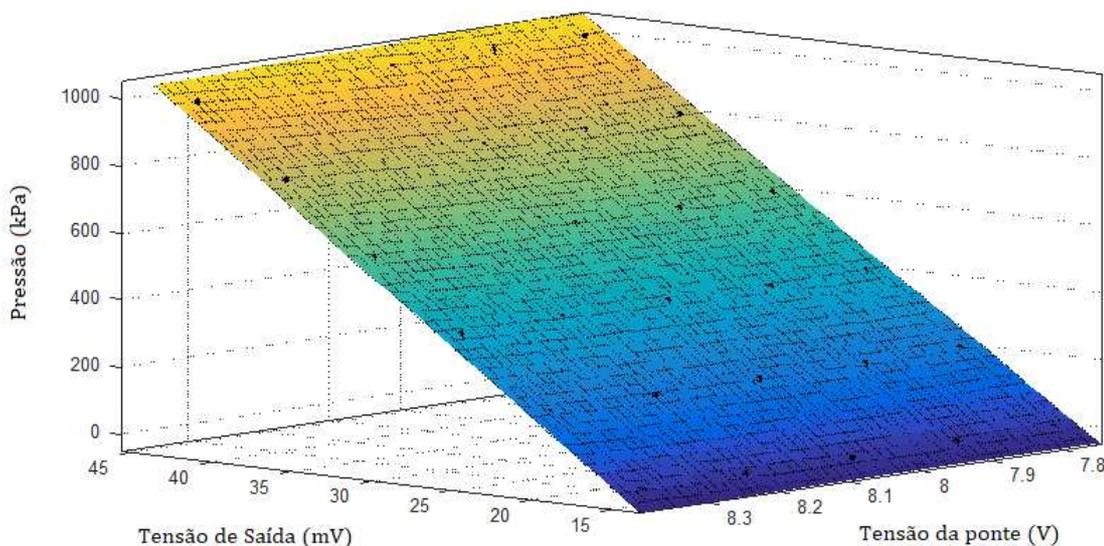
Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando os modelos e os parâmetros que os caracterizam, nota-se que os modelos que

melhor descrevem os dados experimentais são os M12 e M22. Eles possuem o mesmo valor de coeficiente de determinação, sendo que o M22 possui SSE e o M12 possui RMSE menor. Tendo em vista que essa diferença não é significativa, optou-se por utilizar o modelo M12, pois possui uma quantidade de coeficientes menor que o M22. Isso faz com que sua implementação seja mais simples, pois envolve uma quantidade de cálculos inferior. A equação 40 apresenta o modelo de compensação contendo os coeficientes já calculados e a figura 88 apresenta o plano descrito pelo modelo obtido.

$$\text{Pressão [kPa]} = 5902 + 6,943V_{\text{saída}} - 1556V_{\text{ponte}} + 3,497V_{\text{saída}}V_{\text{ponte}} + 94,13V_{\text{ponte}}^2 \quad (40)$$

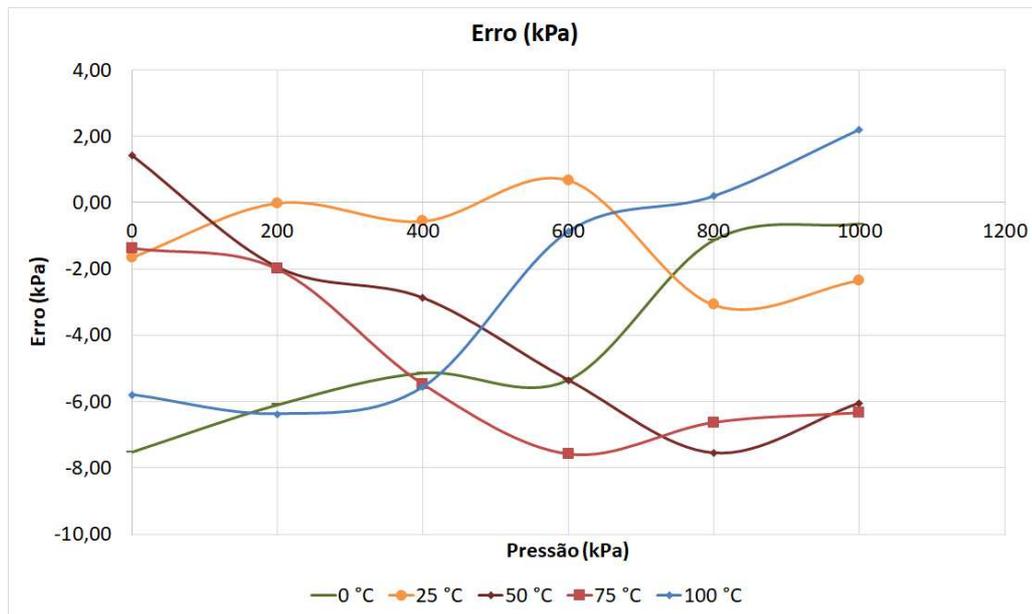
Figura 88 – Dados de medição de pressão e temperatura do sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

Agora, avaliando a equação do plano que descreve as medidas do sensor pressão, foi verificado o erro entre o plano de compensação do sensor de pressão e a medida de pressão de referência. Utilizando o modelo de compensação térmica proposto, o máximo erro encontrado foi de 7,58 kPa, ou seja, 0,758 % do fim de escala do sensor. Portanto, ao optar por não implementar a compensação térmica proposta o sensor apresenta um erro 5,5 vezes superior. O gráfico da figura 89 apresenta os erros entre as medidas de referência e o plano criado pela resposta do sensor contemplando a compensação térmica.

Figura 89 – Erro entre a medida de referência e o plano de resposta do sensor de pressão com compensação térmica



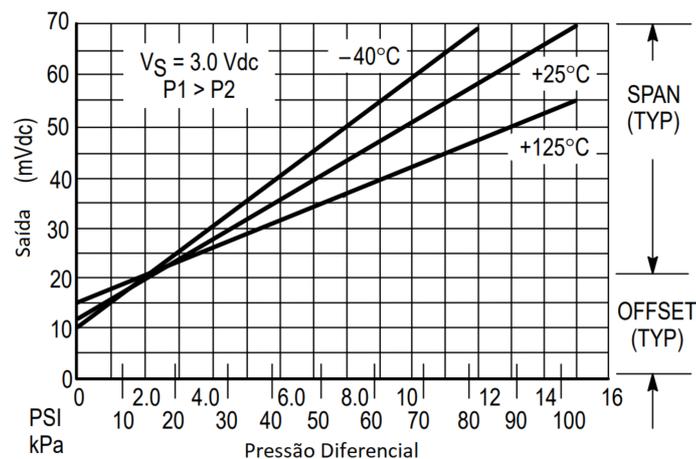
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se também que o máximo erro apresentado pelo sensor após a compensação térmica proposta em uma variação de 100 °C é inferior ao erro que o sensor sem compensação apresenta em uma variação inferior à 10 °C. Isso demonstra que a eficiência do método de compensação proposto. Além disso, destaca-se que o método proposto não necessita que seja incorporado um sensor de temperatura ao sensor de pressão. A temperatura do sensor de pressão é inferida através de medidas da própria ponte de Wheatstone. Portanto, o método proposto apresenta uma abordagem matemática que utiliza somente os sinais da ponte de Wheatstone formada pelos piezoresistores de deformação para realizar a compensação térmica.

4.3.2 Comparação do Comportamento Térmico com Sensores Comerciais

Tanto durante os testes realizados em ambiente de simulação quanto nos testes práticos verificou-se que a temperatura de trabalho do sensor afeta de forma significativa a sua resposta. Tendo isso em vista, foi verificado se os sensores piezoresistivos de silício disponíveis comercialmente também apresentam essa mesma característica. Um dos sensores analisados foi o MPX100 fabricado pela Motorola (MOTOROLA, 1998), que consiste em um sensor de pressão piezoresistivo fabricado em silício para trabalhar com pressões de até 100 kPa. A figura 90 apresenta a curva de resposta do sensor para diferentes pressões e temperaturas.

Figura 90 – Resposta do sensor Motorola MPX100



Fonte:(MOTOROLA, 1998)

Observando a figura 90 constata-se que a resposta do sensor também apresenta uma forte influência com relação a sua temperatura de trabalho. Não só a sua sensibilidade, mas também o seu *offset* sofrem alteração à medida que a temperatura muda. Quanto menor a temperatura de operação do sensor, maior é a sua sensibilidade em relação à pressão que é aplicada ao sensor. Conforme a temperatura aumenta, essa sensibilidade é reduzida e o *offset* do sensor aumenta.

Esse comportamento encontrado no sensor de pressão comercial, apresentado pelo gráfico da figura 90, é o mesmo identificado no sensor de pressão proposto pelo trabalho. Ambos apresentam redução de sensibilidade e aumento da tensão de *offset* quando eleva-se a temperatura de operação. Portanto, nota-se que esse é um comportamento típico para essa tecnologia de sensores de pressão. Além disso, o sensor MPX100 possui uma característica construtiva que é diferente da do sensor de pressão proposto por esse trabalho. O MPX100 possui a membrana de deformação fabricada no próprio silício, eliminando o processo de fixação do sensor de deformação através de adesivos. Isso elimina os efeitos indesejados relacionados ao adesivo de fixação, como por exemplo o *creeping*, fazendo com que somente os efeitos intrínsecos do material piezoresistivo se manifestem.

De acordo com estudo apresentado por Richter et al. (2008), o efeito piezoresistivo em silício tipo P apresenta um modelo que é definido pela concentração de portadores e pela temperatura de operação. Esse modelo expõe que os coeficientes de acoplamento piezoresistivo são estabelecidos através da temperatura e de sua concentração de portadores. A sua relação com a temperatura se estabelece de forma inversa, ou seja, quanto maior a temperatura, menor é o coeficiente de acoplamento piezoresistivo do material. Esse coeficiente estabelece a razão entre a mudança de resistência para uma dada deformação do material piezoresistivo. Logo, quanto menor for esse valor, menor será a variação de resistência para uma determinada deformação do piezoresistor. Consequentemente, menor é a sensibilidade do material piezoresistivo. Esse efeito está de acordo com o observado no sensor MPX100 e os fatos observados durante a

caracterização do sensor proposto. Logo, é de se esperar que ocorra essa correlação e que a sensibilidade do sensor de pressão seja afetada pela temperatura.

5 CONCLUSÃO

A partir da fundamentação teórica apresentada no início do trabalho, somado aos resultados experimentais encontrados durante o seu desenvolvimento, é possível concluir que os objetivos elencados para esta pesquisa foram atingidos. O trabalho envolveu a avaliação da dinâmica de funcionamento de um sensor de pressão piezoresistivo, bem como das propriedades físicas relevantes para a sua operação. Além disso, foram investigados alguns processos de encapsulamento e técnicas de fabricação de sensores de pressão, que foram fundamentais para tornar possível a realização do projeto e, principalmente, a construção dos protótipos dos sensores de pressão.

Ao longo da revisão bibliográfica foram abordadas algumas tecnologias disponíveis atualmente para a construção de sensores de pressão, sendo que no setor industrial, o sensor de pressão com base no efeito piezoresistivo mostrou ter potencial de crescimento na participação de mercado. O projeto de sensor de pressão desenvolvido no trabalho pode ser utilizado em aplicações industriais e possui um aspecto interessante, por utilizar como elemento piezoresistivo de deformação um componente de silício, que possui alta sensibilidade à deformação, fabricado utilizando tecnologia nacional. Tendo como base para o trabalho esse sensor de deformação, foi desenvolvida a etapa de projeto do sensor de pressão, para posterior teste e avaliação em ambiente de simulação.

Após definir algumas características de projeto foi desenvolvida uma sequência de testes e verificações com relação ao funcionamento do sensor através do *software* COMSOL. Os testes e análises elaboradas no COMSOL não só validaram o conceito de funcionamento do sensor de pressão, mas também a simulação foi essencial para o entendimento das grandezas físicas envolvidas em seu funcionamento. Além disso, ela foi indispensável para o projeto do sensor, visto que algumas de suas características, como por exemplo, a disposição dos piezoresistores sobre a membrana de deformação, foram definidas através de análises de simulações.

Através de experimentos práticos foram determinados alguns dos materiais e processos de construção do sensor de pressão, como por exemplo, o adesivo para fixação dos piezoresistores. Esses testes também foram fundamentais na escolha de materiais que melhor contribuem para o desempenho do sensor de pressão.

Quanto à forma de conexão elétrica dos piezoresistores, duas formas distintas foram analisadas: solda de fios e adesivo condutivo. Através dos testes verificou-se que a construção do sensor é possível utilizando ambos os conceitos. No entanto, a utilização de adesivo condutivo introduz características de desempenho que limitam o funcionamento do sensor, como por exemplo, a sua menor sensibilidade e grande variação com a temperatura. Ainda com relação ao sensor de pressão construído através da utilização do ACA, a não utilização de *stud bump*

nos terminais do piezoresistores demonstrou um elevado nível de ruído no sinal de resposta do sensor. Percebeu-se também que o próprio processo de construção do sensor de pressão que utiliza ACA acaba introduzindo variação nas características do sensor de pressão, como por exemplo, a variação de altura e/ou inclinação na cura do adesivo condutivo, fazendo com que a fixação dos sensores na membrana de deformação cause alterações de espessura do adesivo. Além disso, pode provocar deformações nos piezoresistores, causando o desbalanceamento da ponte de Wheatstone sem a correspondente aplicação de pressão.

A caracterização utilizada no trabalho foi capaz de obter as principais características de funcionamento do sensor de pressão proposto, tornando possível a observação e confirmação do impacto da temperatura sobre o funcionamento do sensor. O método de compensação térmica proposto no trabalho também se mostrou eficaz quanto a sua proposta, visto que reduziu significativamente, em torno de 83 %, o erro do sensor de pressão. Ou seja, ao não utilizar a compensação térmica, o erro do sensor é 5,5 vezes superior se comparado com o resultado obtido por meio do método de compensação térmica, apesar de utilizar uma simples abordagem matemática.

Ainda relacionado ao comportamento observado do sensor de pressão frente a diferentes temperaturas de trabalho, verificou-se que essa é uma reação que não é específica do sensor projetado, mais sim uma característica também presente nos sensores de pressão piezoresistivos comerciais.

Avaliando os dois métodos de conexão elétrica empregados na construção dos sensores de pressão, verificou-se que o uso do processo de solda de fios produz um sensor de pressão com melhor desempenho se comparado ao uso de adesivo condutivo. Os resultados do sensor construído com ACA apresentaram menor sensibilidade à pressão, maior sensibilidade à temperatura e a presença de um maior nível de ruído em seu sinal. No entanto, isso não é um impeditivo quanto ao seu uso. Essas limitações são importantes e devem ser avaliadas de acordo com a aplicação na qual o sensor de pressão será implementado. Dependendo dessa aplicação, o método de construção do sensor utilizando adesivo condutivo como forma de conexão elétrica pode se tornar uma alternativa viável.

Enfim, os objetivos específicos deste trabalho foram plenamente atendidos e as questões relevantes relacionadas ao tema definido foram respondidas.

5.1 Trabalhos futuros

Como perspectiva para a realização de futuros trabalhos relacionados ao tema estudado, pode-se elencar alguns itens que, além de contribuir com o projeto em questão, também podem aprimorar a tecnologia de sensores de pressão:

- Estudar e desenvolver novos materiais para a realização de fixação dos piezoresistores de deformação, buscando a melhor transferência de deformação ao piezoresistor possível,

tendo em vista que há uma grande gama de adesivos disponíveis atualmente no mercado, levando em consideração também a aplicação à qual o sensor é destinado;

- Estudar e propor alternativas de materiais e formas para a membrana de deformação;
- Estudar e propor novas técnicas e metodologias para a compensação térmica para sensores de pressão piezoresistivo, buscando minimizar o erro causado por variações térmicas;
- Projetar e desenvolver um sensor de pressão baseado na tecnologia de deposição de filmes finos metálicos;
- Estudar os custos envolvidos para cada processo de fabricação do sensor de pressão, verificando a sua viabilidade de acordo com a aplicação desejada.

REFERÊNCIAS

Åsmund Sandvand. *High-stability piezoresistive pressure sensors*. [S.l.]: University College of Southeast Norway, 2017. ISBN 9788278603048.

ANDOLFATO, R.; CAMACHO, J.; BRITO, G. Extensometria básica. *Ilha Soleira. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural*, 2004. Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometriabasica.pdf>>.

Arora, N. D.; Hauser, J. R.; Roulston, D. J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 29, n. 2, p. 292–295, Feb 1982. ISSN 1557-9646.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas. Volume 2*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. ISBN 8521621299.

BARLIAN, A. A. et al. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 3, p. 513–552, 2009. ISSN 00189219.

BAZILCHUK, M. et al. Electromechanical characterization of individual micron-sized metal coated polymer particles. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 119, n. 24, p. 245102, 2016.

BECKWITH, T. G.; MARANGONI, R. D.; LIENHARD, V. J. H. *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley. Reading, MA, 1995.

CAMPBELL, S. A. *Fabrication Engineering at the Micro-and Nanoscale (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*. Oxford University Press Oxford, 2012.

CASSIOLATO, C. *Medição De Pressão : tudo o que você precisa conhecer. Smar Equipamentos*, p. 1–29, 2008.

CHAN, Y.; LUK, D. Effects of bonding parameters on the reliability performance of anisotropic conductive adhesive interconnects for flip-chip-on-flex packages assembly ii. different bonding pressure. *Microelectronics Reliability*, Elsevier, v. 42, n. 8, p. 1195–1204, 2002.

FRADEN, J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2014. ISBN 0387007504.

GARCIA, V. Sensor de pressão microeletrônico baseado no efeito piezomos. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, p. 107, 2006.

GLEITCH H HVIMS, R. R. J. V. O. R. T. J. J. L. T. *The nordic electronics packaging guideline*. The Swedish Institute of Production Engineering Research, 2000. Disponível em: <<http://extra.ivf.se/ngl/>>.

HAM, S. et al. Design, fabrication, and characterization of piezoresistive strain gage-based pressure sensors for mechatronic systems. *Proceedings of the 2015 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2015*, p. 3–7, 2015.

- HOFFMANN, K. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. 2012.
- JCGM. *Uncertainty of Measurement: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM: 1995). Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method*. [S.l.]: International Organisation for Standardization, 2008.
- JCGM. *International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms*. [S.l.]: VIM, 2012.
- JEDEC STANDARD. Temperature cycling. *JESD22-A100D*, 2013.
- JEDEC STANDARD. Highly-accelerated temperature and humidity stress test. *EIA/JESD22-A110E*, 2015.
- JOHARI, H. Development of Mems Sensors for Measurements of Pressure , Relative Humidity , and Temperature. *Sensors (Peterborough, NH)*, p. 213, 2003.
- KENKYUJO, T. S. TML Strain gauges 2017. *Tech Note*, 2017.
- KRISTIANSEN, H. et al. Study of electrical and thermal conduction mechanisms in novel isotropic conductive adhesive. In: IEEE. *CPMT Symposium Japan (ICSJ), 2016 IEEE*. [S.l.], 2016. p. 43–46.
- Kulite Semiconductor. Kulite Semiconductor Strain Gage Manual. p. 1–67, 2009. Disponível em: <http://www.kulite.com/docs/products_overview/StrainGageManualDigital-01262012.pdf>.
- LEASURE, W. A.; WOODRUFF, N.; GRAVEL, C. Glass-bonding techniques for semiconductor strain gages. *Experimental Mechanics*, v. 11, n. 5, p. 235–240, 1971. ISSN 0014-4851. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02324223>>.
- LI, L.; MORRIS, J. An introduction to electrically conductive adhesives. *International Journal of Microelectronic Packaging*, v. 1, n. 3, p. 159–175, 1998.
- LI, Y.; WONG, C. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Elsevier, v. 51, n. 1-3, p. 1–35, 2006.
- LIN, L.; CHU, H.-C.; LU, Y.-W. A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors. *J. Microelectromech. Syst*, Citeseer, v. 8, n. 4, p. 514–522, 1999.
- MARKETS; RESEARCH. Global piezoresistive pressure sensors market outlook to 2023 - researchandmarkets.com. *Business Wire (English)*, 2018. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bwh&AN=bizwire.c86076495&lang=pt-br&site=eds-live>>.
- METI, S.; BALAVALD, K. B.; SHEEPARMATTI, B. G. OPEN ACCESS MEMS Piezoresistive Pressure Sensor : A Survey. *Int. J. Engin. Res. App.*, v. 6, n. 4, p. 23–31, 2016.
- MORRIS, J. E.; LIU, J. Electrically conductive adhesives (ecas). In: *update of Proc. Workshop Polymeric Materials for Microelectronics & Photonics Applications, EEP*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 27, p. 259–281.
- MOTOROLA. Mpx100 series 100 kpa uncompensated silicon pressure sensors. 1998.

- Omega Engineering Inc. Force-Related Measurements. *Transactions in Measurement and Control*, v. 3, 1998.
- PFANN, W. G.; THURSTON, R. N. Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 32, n. 10, p. 2008–2019, 1961. ISSN 0021-8979.
- RESEARCH, G. V. Pressure sensor market size, share, trends analysis 2018 - 2025. 2018. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/pressure-sensors-industry>>.
- RICHTER, J. et al. Piezoresistance in p-type silicon revisited. *Journal of Applied Physics*, v. 104, p. 023715 – 023715, 08 2008.
- SANTOS, S. L. Uma aplicação de modelos de simulação em sistemas de apoio à decisão. 1992.
- SCHOMBURG, W. K. Membranes. In: *Introduction to Microsystem Design*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 29–52.
- SG, W.; CONNECTION, D. S. Selecting strain gages (SG). p. 1–3, 2008.
- SHABY, S. M. DESIGN AND ANALYSIS OF SILICON DIAPHRAGM OF A MEMS PRESSURE SENSOR. 2006.
- SHABY, S. M.; PREMI, M. G.; MARTIN, B. Enhancing the Performance of MEMS Piezoresistive Pressure Sensor Using Germanium Nanowire. *Procedia Materials Science*, Elsevier B.V., v. 10, n. Cnt 2014, p. 254–262, 2015. ISSN 22118128.
- SINGH, J.; NAYAK, M.; NAGACHENCHIAIAH, K. Linearity and sensitivity issues in piezoresistive pressure sensor. In: *Proc. ICST*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 2, p. 404–409.
- SMITH, H. B. *Design Consideration For Strain Gage Transducers*. Tese (Doutorado) — Oregon State University, 1972.
- STOETZLER, A. et al. A small size high pressure sensor based on metal thin film technology. *Proceedings of IEEE Sensors*, p. 825–827, 2007.
- TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. 1959. 591 p.
- TRAN, A. V.; ZHANG, X.; ZHU, B. The Development of a New Piezoresistive Pressure Sensor for Low Pressures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 65, n. 8, p. 6487–6496, 2018. ISSN 02780046.
- TUFTE, O. N.; CHAPMAN, P. W.; LONG, D. Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms. *Journal of Applied Physics*, v. 33, n. 11, p. 3322–3327, 1962. ISSN 00218979.
- VISHAY. Optimizing Strain Gage Excitation Levels TN-502. *Tech Note*, TN-502, p. 11–18, 2010.
- WANG, L.; MCDONALD, J. F. Modeling of high speed metal-insulator–semiconductor inter connections: The effect ild on slow–wave attenuation. Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.
- WILSON, E. J. Chapter 17 Strain-Gage Instrumentation. *Shock and Vibration Handbook*, p. 17.1 – 17.15, 1988. ISSN 0749-0739.

ZHANG, Z. et al. A steel pressure sensor based on micro-fused glass frit technology. *ICEPT-HDP 2012 Proceedings - 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, p. 1582–1585, 2012.