

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Lidiani Cristina Pierri

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO
APLICÁVEL EM CÂMARAS DE COMPRESSÃO DE PEQUENO
VOLUME**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Saulo Güths, Dr.

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Pierri, Lidiani Cristina
DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO APLICÁVEL EM
CÂMARAS DE COMPRESSÃO DE PEQUENO VOLUME [dissertação] /
Lidiani Cristina Pierri ; orientador, Carlos Alberto
Flesch ; co-orientador, Saulo Gúths. - Florianópolis, SC,
2012.
113 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. 1. Medição de Pressão. 3. 2.
Pressão e Deriva Térmica de Instrumentos de Medição. . 4.
3. Transdutores Extensométricos.. 5. 4. Efeito da
Temperatura em Pontes de Extensômetros.. I. Flesch, Carlos
Alberto. II. Gúths, Saulo . III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Lidiani Cristina Pierri

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO
APLICÁVEL EM CÂMARAS DE COMPRESSÃO DE PEQUENO
VOLUME**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 21 de dezembro de 2012.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Saulo Güths, Dr.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, PhD
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Marco Aurélio de Oliveira, Dr.
Whirlpool S/A

Aos meus pais Edson Rogério Pierri
e Maria de Fátima da Silva Pierri.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edson e Maria de Fátima, e aos demais membros da família, pelo carinho e apoio dado em todas as etapas da minha vida.

Ao meu orientador, Carlos Alberto Flesch, por estar sempre disponível para ajudar, orientar e, pela enorme compreensão durante todo o período do mestrado. Da mesma forma, agradeço ao meu coorientador, Saulo Güths, pela atenção e por toda ajuda prestada.

Aos colegas de trabalho, em especial: Carlos Adriano da Luz, Cesar Alberto Penz, Cícero Borba Walendowsky, Miguel Burg Demay, Tobias Andreas Weege, Artur Antonio Seibert, Julio Scussel, e demais colaboradores do LIAE, que ajudaram muito neste trabalho.

Às amigadas que conquistei, em especial: Aarão Foinquinos, Cíntia Alves, Fernando Rampinelli Jeremias, James Schipmann Eger, Luiz Antonio Schalata Pacheco, Maryah Elisa Morastoni Haertel, Rafael Pacheco dos Santos, Rosana Vieira. E às amigadas que se fortaleceram ao passar dos anos, em especial: Antonio Luiz Schalata Pacheco, Clarissa Ferreira Martins de Souza, João Paulo Ferreira Martins de Souza, Livia Rodrigues Lothhammer Venturini, Nilda Martins, pelos momentos de alegrias que passamos juntos. Aos demais colaboradores do Labmetro, pela simpatia e pelo ótimo ambiente de trabalho.

Ao professor Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, a Matias Viotti e, aos funcionários da fundação CERTI, pelo empréstimo de equipamentos.

À empresa Embraco, pelo financiamento do projeto. Aos funcionários da empresa que de alguma forma contribuíram com o trabalho, em especial Marcelo Knies, que acompanhou e ajudou na etapa de desenvolvimento do protótipo, e a André Paz Rosa, pela confiança.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento. Conhecimento auxilia por fora, mas só o amor socorre por dentro. Conhecimento vem, mas a sabedoria tarda”

Albert Einstein

RESUMO

Compressores de refrigeração cada vez menores vêm sendo desenvolvidos e fabricados. Em função disso, as câmaras de compressão também diminuem de tamanho. Para garantir a qualidade do projeto e da fabricação de compressores, ensaios para a verificação de desempenho são realizados. Um dos mais importantes é o levantamento do diagrama pressão-volume, com o qual se pode determinar a eficiência do compressor. Os transdutores de pressão atualmente empregados para determinar a grandeza pressão do interior da câmara do compressor provocam o aumento do que é chamado de volume morto, alterando o volume final da câmara e, conseqüentemente, introduzindo erro no processo. Sendo assim, quanto menor o volume da câmara, menos adequados são os transdutores atuais. Um trabalho anterior a este analisou possíveis tecnologias e procedimentos de construção de transdutores adequados para tal finalidade e apontou como mais promissora a utilização de extensômetros resistivos metálicos. Este trabalho avança nessa linha, desenvolvendo um transdutor e fazendo uma avaliação preliminar do seu comportamento metrológico. Alternativas para melhorias de vedação são apresentadas, assim como um estudo, via elementos finitos, da influência da deformação da placa-válvula no transdutor. Além disso, diversos ensaios foram realizados com protótipos e estes apresentaram baixo erro de linearidade e boa repetibilidade. Análises em diferentes temperaturas indicaram comportamentos diferentes em ciclos de aquecimento e resfriamento do transdutor, mostrando um grande desafio ainda a ser vencido. Passos no sentido da solução foram dados neste trabalho e propostas de ações futuras são apresentadas.

Palavras-chave: Medição de Pressão. Deriva Térmica de Instrumentos de Medição. Transdutores Extensométricos. Efeito da Temperatura em Pontes de Extensômetros.

ABSTRACT

Market and application requirements are inducing refrigeration compressors industries to develop and manufacture compressors with reduced dimensions. As a consequence, the compression chambers are also reducing in volume. For ensuring quality to the compressors design and production, tests for performance verifications must be carried out. One of the most important tests is the evaluation of the pressure-volume diagram that is directly related to the compressor efficiency assessment. A drawback of the transducers currently used for measuring the pressure in compressor chambers is the dead volume associated to their assembly. This dead volume changes the chamber volume and affects the pressure during the compression cycle. In a previous dissertation were examined suitable technologies and procedures for constructing pressure transducers. It was pointed out that metallic resistive strain gages is the most promising technology. The current dissertation presents the use of this technology for developing a transducer and preliminary assessments of its metrological behavior. Moreover, alternative techniques are presented for sealing improvement, as well as finite element simulations for evaluating the influence of the transducer seat deformation. Furthermore, several tests were performed and low linearity error and good repeatability could be observed. Analysis at different temperatures indicated unlike behaviors at heating and cooling cycles of the transducer, these results shown that there still is a great challenge to be overcome. Steps towards the solution were given in this dissertation and proposals for future actions are presented.

Keywords: Pressure Measurement. Thermal Drift of Measurements Instruments. Strain Gage Transducer. Temperature Effect on Strain Gage Bridges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo ideal de refrigeração.	26
Figura 2 - Compressor alternativo hermético e seus principais componentes.	27
Figura 3 - Funcionamento das válvulas de compressores.	28
Figura 4 - Diagrama pressão-volume ideal e real	29
Figura 5 – Esquema da instrumentação de pressão normalmente utilizada. ...	30
Figura 6 - Variação da deformação aparente em função da temperatura.	35
Figura 7 - Desvio da curva se o coeficiente de expansão térmica do extensômetro não combinar com o do material no qual ele será colado.	38
Figura 8 - Princípio de funcionamento da técnica de compensação de Bruyker et al.	39
Figura 9 - Compensação de temperatura, para extensômetro colado em suporte de alumínio.	40
Figura 10 - Tensão de saída versus temperatura, sem compensação de temperatura.	41
Figura 11 - Comparação entre o sinal de saída compensada e não compensada em várias temperaturas.	42
Figura 12 - Primeiro protótipo de transdutor de pressão desenvolvido por Weege (2009).	43
Figura 13 - Extensômetro tipo roseta.	44
Figura 14 - Transdutor de pressão, em vermelho, na placa-válvula.	44
Figura 15 - Canal de saída dos fios.	45
Figura 16 - Protótipo encapsulado com filme de PEEK.	46
Figura 17 - Rebarba do filme de PEEK.	47
Figura 18 - Desenho da base, local de instalação do extensômetro.	48
Figura 19 - Desenho da tampa.	48
Figura 20 - Desenho da montagem do diafragma com a base.	49
Figura 21 - Protótipo com o modelo anterior.	49
Figura 22 - Protótipo com o novo modelo.	50
Figura 23 - Modelo inicial para análise por elementos finitos.	51
Figura 24 - Deformação no transdutor de pressão com componentes flexíveis.	52
Figura 25 - Deformação no transdutor de pressão com componentes rígidos.	52
Figura 26 - Rebaixo na parte posterior da placa-válvula.	53
Figura 27 - Simulação sem rebaixo inferior.	54
Figura 28 - Deformação na válvula de sucção.	54
Figura 29 - Deformação na placa-válvula.	55
Figura 30 - Peças usinadas para posicionamento do protótipo.	59
Figura 31 - Configuração do ensaio de bancada à temperatura ambiente.	59
Figura 32 - Ciclos de carregamentos e descarregamentos.	60
Figura 33 - Diferença de sinais no carregamento e no descarregamento.	61

Figura 34 - Desvio padrão dos seis ciclos.	61
Figura 35 - Configuração do ensaio de bancada com variação de temperatura.	63
Figura 36 - Carregamentos e descarregamentos em todas as temperaturas ensaiadas.	64
Figura 37 - Desvio entre sinais a 25 °C e 21 °C.	65
Figura 38 - Desvio entre sinais de 85 °C e 21 °C.	66
Figura 39 - Desvio entre sinais de 155 °C e 21 °C.	67
Figura 40 - Variação da pressão em função da temperatura.	69
Figura 41 - Resumo dos ensaios.	70
Figura 42 - (A) Protótipo e Pt-100. (B) Protótipo na estufa.	71
Figura 43 - Tempo de aquecimento e resfriamento dos três testes.	71
Figura 44 - Variação do sinal em função da temperatura em três etapas.	72
Figura 45 - Posicionamento do transdutor no bloco de aço.	73
Figura 46 - À direita, bloco envolto por lã de vidro. À esquerda, protótipo posicionado na estufa.	74
Figura 47 - Tempo de aquecimento e resfriamento com isolamento.	74
Figura 48 - Sinal de saída em função da temperatura com isolamento.	75
Figura 49 - Esquema do circuito proposto para compensação da deriva térmica.	76
Figura 50 - Tensão no resistor <i>shunt</i> em função da temperatura.	77
Figura 51 - Sinal de saída em função da temperatura com etapas de aquecimento e resfriamento.	78
Figura 52 - Sinal de saída em função da temperatura com isolamento e protótipo fechado.	79
Figura 53 - Foto do acoplamento do protótipo.	80
Figura 54 - Sinal de saída em função da temperatura do protótipo confinado.	80
Figura 55 - Tensão de realimentação do protótipo.	81
Figura 56 - Variação da tensão em função do tempo.	82
Figura 57 - Desvio entre sinais a 35 °C e 21 °C.	95
Figura 58 - Desvio entre sinais a 45 °C e 21 °C.	96
Figura 59 - Desvio entre sinais a 55 °C e 21 °C.	97
Figura 60 - Desvio entre sinais a 65 °C e 21 °C.	98
Figura 61 - Desvio entre sinais a 75 °C e 21 °C.	99
Figura 62 - Desvio entre sinais a 95 °C e 21 °C.	100
Figura 63 - Desvio entre sinais a 105 °C e 21 °C.	101
Figura 64 - Desvio entre sinais a 115 °C e 21 °C.	102
Figura 65 - Desvio entre sinais a 125 °C e 21 °C.	103
Figura 66 - Desvio entre sinais a 135 °C e 21 °C.	104
Figura 67 - Desvio entre sinais a 145 °C e 21 °C.	105
Figura 68 - Distribuição homogênea da temperatura.	107
Figura 69 - Distribuição da tensão térmica em sólido simétrico.	108
Figura 70 - Distribuição da temperatura no sólido estudado.	109
Figura 71 - Distribuição da tensão térmica no sólido estudado.	109

Figura 72 - Classe de extensômetros.....	111
Figura 73 - Processo de colagem de extensômetros.....	112
Figura 74 - Posição correta para a etapa de brasagem dos fios.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista dos coeficientes de expansão térmica de alguns materiais de engenharia e seus respectivos números para autocompensação de temperatura.	37
Tabela 2 - Erro de linearidade a 21 °C.	62
Tabela 3 - Erro de linearidade a 25 °C.	65
Tabela 4 - Erro de linearidade a 85 °C.	67
Tabela 5 - Erro de linearidade a 155 °C.	68
Tabela 6 - Erro de linearidade a 35 °C.	95
Tabela 7 - Erro de linearidade a 45 °C.	96
Tabela 8 - Erro de linearidade a 55 °C.	97
Tabela 9 - Erro de linearidade a 65 °C.	98
Tabela 10 - Erro de linearidade a 75 °C.	99
Tabela 11 - Erro de linearidade a 95 °C.	100
Tabela 12 - Erro de linearidade a 105 °C.	101
Tabela 13 - Erro de linearidade a 115 °C.	102
Tabela 14 - Erro de linearidade a 125 °C.	103
Tabela 15 - Erro de linearidade a 135 °C.	104
Tabela 16 - Erro de linearidade a 145 °C.	105

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	45
1. INTRODUÇÃO	23
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO	23
1.2. OBJETIVOS	24
2. DETALHAMENTO DO PROBLEMA	25
2.1. CICLO DE REFRIGERAÇÃO	25
2.2. VOLUME MORTO	29
2.3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA OPERAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO	30
3. EFEITO DA TEMPERATURA NO TRANSDUTOR DE PRESSÃO EXTENSOMÉTRICO	33
3.1. DERIVA TÉRMICA.....	33
3.2. MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA	38
4. APRIMORAMENTO DO PROJETO MECÂNICO	43
4.1. INTRODUÇÃO	43
4.2. VEDAÇÃO.....	45
4.2.1. Propriedades do PEEK.....	46
4.2.2. Alterações no projeto mecânico	47
4.3. ESTUDO DE DEFORMAÇÃO DA PLACA-VÁLVULA VIA ELEMENTOS FINITOS.	50
5. ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	57
5.1. ENSAIO À TEMPERATURA AMBIENTE.....	58
5.1.1. Preparação do ensaio	58
5.1.2. Resultados	60
5.2. ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA.....	62
5.2.1. Preparação para ensaio a diferentes temperaturas.....	62
5.2.2. Resultados	63
5.2.3. Pressão x Temperatura.....	68
5.3. ESTUDO DO SINAL DE SAÍDA DO PROTÓTIPO	69
5.3.1. Introdução.....	69
5.3.2. Configuração 1	70
5.3.3. Configuração 2	73
5.3.4. Configuração 3	78
5.3.5. Configuração 4	79
5.4. DISCUSSÕES DOS ENSAIOS	82
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
6.1. CONCLUSÕES	85
6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	89

APÊNDICE A - DESVIOS E ERRO DE LINEARIDADE DAS DEMAIS TEMPERATURAS.....	95
APÊNDICE B - ESTUDO DE DILATAÇÃO EM SÓLIDOS ...	107
APÊNDICE C - MONTAGEM DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO EXTENSOMÉTRICO	111

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO

O compressor é o principal componente de circuitos de refrigeração por compressão de gases, empregados em equipamentos que produzem frio, como: refrigeradores, condicionadores de ar, *freezers*, dentre outros. Muitos desenvolvimentos tecnológicos foram realizados visando à redução de custos e melhoria do rendimento. É comum que se analise o rendimento de subsistemas do compressor, chamando-os de rendimento elétrico, mecânico e de compressão. Porém existe o rendimento global, que pode ser tomado como parâmetro da máquina completa, que é a razão da potência elétrica entregue nos bornes de alimentação do compressor, pela capacidade de refrigeração do mesmo, o que, em essência, é a quantidade de massa deslocada a uma dada pressão.

Para obtenção desses parâmetros, o diagrama pressão-volume é um dos principais ensaios realizados. A variação de volume é obtida por relações geométricas e medições da posição do eixo e a pressão deve ser medida diretamente na câmara de compressão, pois é por meio dela que podem ser conhecidas variáveis como pressão mínima de sucção, curvas de aumento e diminuição de pressão, tempo de abertura de válvulas, perdas de carga nas válvulas, vazamentos etc.

Seguindo uma forte tendência no mercado para redução do tamanho de equipamentos e seus componentes, os compressores também têm sido desenvolvidos com dimensões reduzidas.

Os métodos tradicionais utilizados para medições de pressão no interior da câmara de compressores não são adequados para cilindros de pequeno volume. Weege (2009) descreveu em sua dissertação princípios de medição de pressão passíveis de emprego na resolução do problema em questão. O trabalho foi dividido em duas abordagens, sendo a primeira a análise de disponibilidade de dispositivos comerciais que atendessem os requisitos para medição de pressão no interior do cilindro de compressores de pequenos volumes. Entretanto, a busca resultou infrutífera.

A segunda abordagem foi a análise de viabilidade de desenvolvimento de um dispositivo para medição de pressão específico para o problema em questão. Dentre os diversos princípios analisados, os que se mostraram mais plausíveis de se obter êxito no

desenvolvimento de um transdutor específico foram os princípios piezoelétrico e extensométrico.

Em função da maior disponibilidade de recursos instrumentais e experiência do grupo de pesquisa envolvido, optou-se pelo extensométrico. Foi finalizado, inclusive, o projeto mecânico de um protótipo que, devido a problemas técnicos não puderam ser contornados em tempo hábil e inviabilizaram a obtenção de um protótipo funcional. Este possui um perfil plano possibilitando a instalação do mesmo na placa-válvula e sendo assim, necessita um estudo para se determinar possível interferência da deformação da placa-válvula sobre o dispositivo. Além disso, o protótipo desenvolvido por Weege (2009) possui espessura maior que a permitida para a instalação na placa-válvula, o que exige melhorias no projeto mecânico.

Pela importância do tema, a empresa líder mundial no mercado de compressores de refrigeração se dispôs a apoiar financeiramente e a servir de estudo de caso para o trabalho de Weege (2009) e para esta dissertação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um transdutor para medição de pressão em câmaras de compressores de refrigeração de pequeno volume.

São objetivos específicos:

- analisar questões relativas à melhorias de projeto mecânico e de localização para a instalação do dispositivo no compressor;
- estudar acerca do material mais apropriado para a fabricação do transdutor, para que este tenha propriedades mecânicas adequadas ao projeto e que minimize efeitos causados por variações de temperatura no local de instalação;
- identificar e apresentar formas de correção da influência da temperatura sobre o comportamento metrológico do transdutor;
- analisar e propor soluções para problemas de vedação;
- avaliar e propor alternativas para amenizar possíveis interferências da deformação da placa-válvula no dispositivo.

O sistema almejado possibilitará que ensaios que envolvam a medição de pressão em pequenos volumes sejam mais confiáveis.

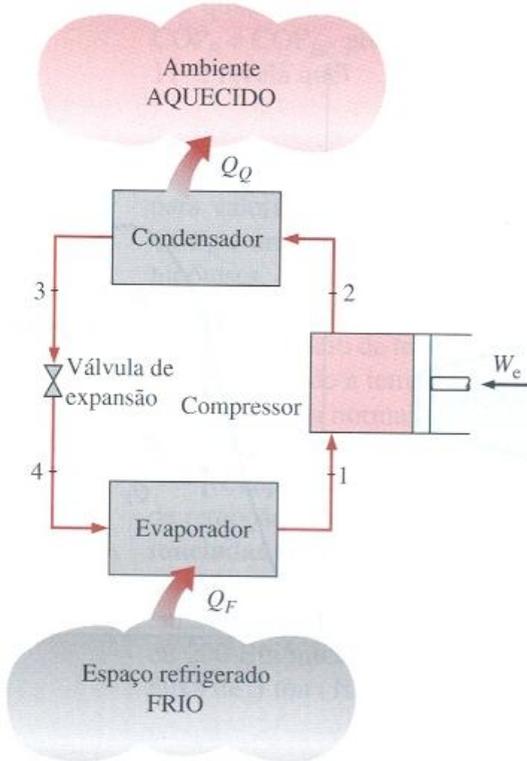
2. DETALHAMENTO DO PROBLEMA

O ponto de partida no desenvolvimento de um transdutor é o estabelecimento de seus requisitos metrológicos e operacionais. Um aspecto importante é conhecer as condições de contorno do local onde o transdutor será instalado. Uma breve descrição do ciclo de refrigeração será apresentada, seguido por uma breve apresentação sobre a pressão no interior da câmara de compressão responsável pela formação do diagrama pressão-volume. Além disso, será descrita a problemática do volume morto. Por fim, são definidas as condições de contorno exigidas para a operação do transdutor.

2.1. CICLO DE REFRIGERAÇÃO

O ciclo de refrigeração consiste de quatro etapas principais: evaporação, compressão, condensação e expansão, representado na Figura 1 (ÇENGEL, 2006). Através de um ciclo termodinâmico, calor é extraído do ambiente a ser refrigerado e é enviado para o ambiente externo. O frio produzido pode ser utilizado para o conforto térmico, ou para o resfriamento ou congelamento de produtos. O calor do condensador também pode ser utilizado para climatização de ambientes, secagem de produtos, entre outros, quando o circuito é empregado como bomba de calor.

Figura 1 - Ciclo ideal de refrigeração.



W_e – entrada de trabalho no compressor

Legenda: Q_Q – quantidade de calor rejeitado para o ambiente

Q_F – quantidade de calor removido do ambiente

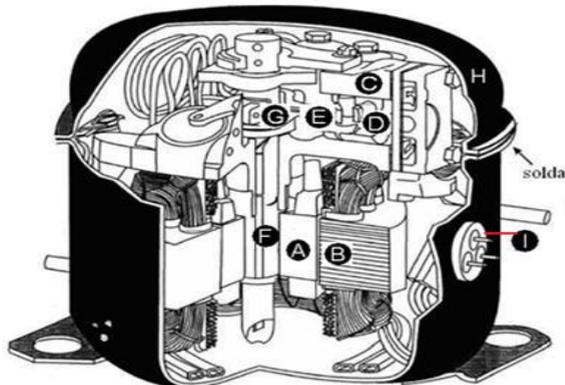
Fonte: Çengel, 2006

Evaporação (1) é a etapa em que o fluido refrigerante entra na serpentina com predomínio da fase líquida e absorve calor durante a evaporação. Ao receber calor, o fluido vaporiza-se e segue para a fase de compressão (2). Na compressão, o fluido refrigerante é comprimido e a pressão do fluido é elevada. A condensação (3) é a etapa caracterizada pela rejeição de calor do ciclo para a fonte quente. No condensador, o fluido na forma de gás é condensado ao longo do trocador de calor, que em contato com outro fluido a uma pressão constante, cede calor ao ambiente. Na expansão (4) ocorre a redução da pressão do fluido da pressão de condensação para a pressão de evaporação completando o ciclo (ÇENGEL, 2006).

O compressor é um dispositivo que realiza trabalho sobre o fluido refrigerante para que a troca de calor seja realizada. Basicamente a função do compressor é promover desequilíbrios de pressão para que as mudanças de fase ocorram e concomitantemente ocorra o deslocamento do fluido dentro do circuito (STOECKER, 2002).

Existem diversos tipos de compressores sendo o tipo alternativo o mais usado. Compressores alternativos consistem em um êmbolo movendo-se alternadamente no interior de um cilindro, com válvulas de sucção e descarga dispostas convenientemente para permitir a compressão. A Figura 2 apresenta os principais componentes de um compressor.

Figura 2 - Compressor alternativo hermético e seus principais componentes.



Legenda:

A – Rotor	B – Estator	C – Cilindro
D – Pistão	E – Biela	F – Eixo
G – Manivela	H – Carcaça	I – Conector elétrico

Fonte: Pentead, 2009.

O processo de compressão pode ser diferenciado em três etapas pelas quais o fluido refrigerante passa pela câmara de compressão do compressor.

A primeira etapa se chama sucção, ou admissão. Ela inicia quando o pistão começa a se afastar do cabeçote, provocando diferença de pressão que abre a válvula de admissão, forçando o gás a entrar na câmara. Esta fase termina quando o pistão chega ao ponto morto inferior.

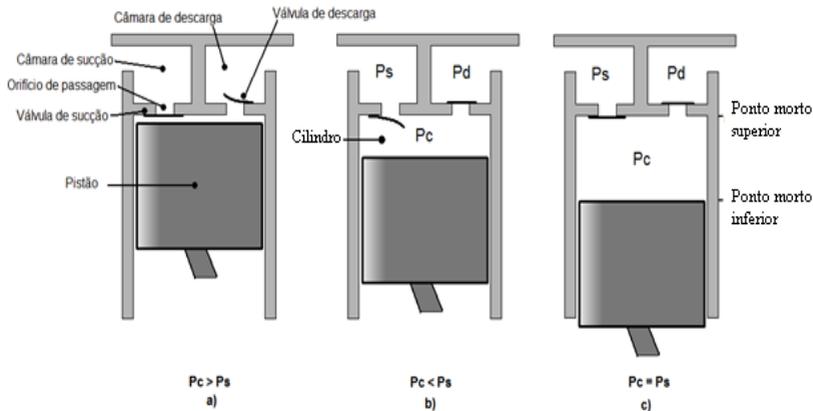
Finalizada esta primeira etapa, começa a segunda etapa, de compressão do gás, que se caracteriza pelo avanço do pistão,

provocando aumento de temperatura e pressão no gás até a abertura da válvula de descarga.

A terceira e última etapa se inicia no momento em que a pressão na câmara de compressão atinge o limite estabelecido pela válvula de descarga. Esta se abre, permitindo o escoamento do gás para uma câmara de descarga do compressor a alta temperatura e pressão. Esta etapa termina quando a válvula de descarga se fecha (PENTEADO, 2009).

A Figura 3 representa o funcionamento das válvulas do compressor e a Figura 4 representa o diagrama pressão-volume para ciclos de compressão ideal, à esquerda, e o real, à direita.

Figura 3 - Funcionamento das válvulas de compressores.

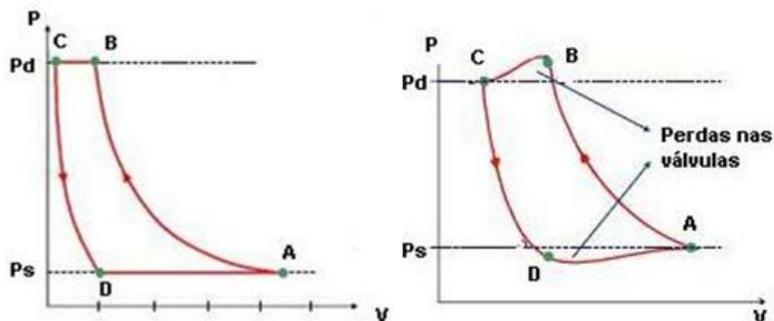


Legenda:

- P_s – Pressão de sucção
- P_d – Pressão de descarga
- P_c – Pressão no cilindro

Fonte: Penteado, 2009.

Figura 4 - Diagrama pressão-volume ideal e real .



Legenda:

- A – fechamento da válvula de sucção;
- B – abertura da válvula de descarga;
- C – fechamento da válvula de descarga;
- D – abertura da válvula de sucção;
- Pd – pressão de descarga;
- Ps – pressão de sucção.

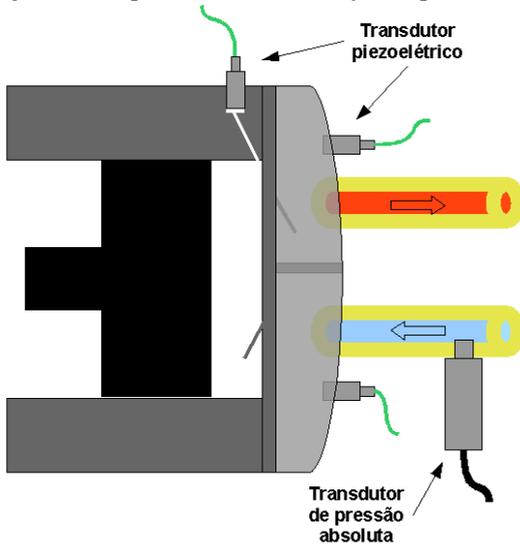
Fonte: Edinei, 2010, p. 26.

2.2. VOLUME MORTO

Os compressores alternativos são projetados com uma pequena folga entre o topo do pistão e a placa-válvula, evitando o choque entre eles (STOECKER, 2002). O termo “volume morto” é comumente utilizado por profissionais da área para definir essa folga existente.

A maioria dos métodos utilizados para medição de pressão em cilindro de compressores causa alterações no volume morto, como pode ser visualizado na Figura 5, o que é prejudicial à caracterização do desempenho do compressor.

Figura 5 – Esquema da instrumentação de pressão normalmente utilizada.



Fonte: Weege, 2009, p. 28.

A existência de volume morto faz com que uma certa quantidade de vapor de alta pressão, que deveria sair através das válvulas de escape, permaneça no cilindro dentro da câmara de compressão entre o pistão e a placa-válvula (DOSSAT, 1980) e portanto, para que se obtenha uma máxima eficiência volumétrica, o volume morto deve ser o menor possível.

2.3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA OPERAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO

São apresentadas nesta seção informações que descrevem o cenário em que se insere a medição da pressão em cilindros de compressores.

Segundo dados levantados por Weege (2009), o gás refrigerante R134a é um dos mais comumente utilizados em refrigeração doméstica, sendo que o limite usual da temperatura de condensação em ensaios pode chegar a 70 °C. Sabendo-se que esse valor de temperatura é relativo ao estado de líquido saturado no condensador, e consultando-se a tabela intitulada “Refrigerante-134a saturado” (WEEGE, 2009), obtém-se o valor de pressão correspondente: 21,2 bar. Entretanto, considerando-se as não-idealidades inerentes ao ciclo real de

refrigeração e as particularidades inerentes à pressão no interior do cilindro, sabe-se que a temperatura no interior do cilindro excede esse valor de pressão teórico em determinados instantes do ciclo de compressão. Weege (2009) obteve, portanto, o dado de que o valor de pressão no cilindro pode exceder em até 5 bar o valor da pressão no condensador. Considerando-se uma margem de segurança para eventuais particularidades que venham a ocorrer, definiu-se como 35 bar o valor máximo de pressão a ser medido.

Quanto à temperatura, têm-se informações de que ela pode chegar a 140°C no interior da câmara. A aprovação de materiais, realizada pelo laboratório químico da empresa, impõe resistência à temperaturas de 150 °C. Portanto, esse também será o valor de temperatura máxima de operação exigido do transdutor. Além disso, o rebaixo máximo permitido para a usinagem na placa-válvula é de 1 mm devido à presença de outras partes envolvidas, podendo fragilizá-las. Sendo assim, o protótipo deve ter no máximo 1 mm de espessura, visto que o mesmo será instalado na placa.

Quanto a frequência de medição da pressão em cilindros, deve-se partir do fato de que compressores convencionais operam a uma frequência de 50 Hz ou 60 Hz. No caso dos desenvolvimentos mais recentes essa frequência chega a quase 250 Hz. Segundo Weege (2009, p. 27), é comum, em ensaios práticos, adquirir os sinais com um mínimo de 800 pontos por ciclo, o que, neste caso, implicaria uma frequência de medição de 200 kHz.

Em suma, o transdutor de pressão ideal, para a medição em compressores domésticos que utilizam o R134a como fluido, deve ser capaz de medir pressões de até 35 bar, operar satisfatoriamente sob temperaturas de até 150°C e possibilitar medição a uma frequência de, pelo menos, 200 kHz, além de resistir a vibração mecânica. Além disso, lembrando-se das questões expostas na seção 2.2, a instalação do transdutor deve provocar mínima alteração no volume morto da câmara de compressão. Ademais, o transdutor de pressão deve apresentar um valor máximo de erro combinado em 0,5%, ou menor, que é comparado ao erro máximo de transdutores de pressão comerciais (WEEGE, 2009).

A tecnologia extensométrica foi a selecionada em função da maior quantidade de informações disponíveis e experiência do grupo de trabalho. Quando extensômetros são utilizados em ambientes onde existe variação de temperatura deve-se levar em consideração o efeito desta no sinal de saída. Técnicas para redução desses efeitos são apresentadas no próximo capítulo.

3. EFEITO DA TEMPERATURA NO TRANSDUTOR DE PRESSÃO EXTENSOMÉTRICO

Propõe-se neste trabalho de dissertação desenvolver um transdutor de pressão para aplicações em câmara de compressão de pequeno volume. Weege (2009, p. 81), em seu estudo inicial, mostrou que os extensômetros são os mais indicados para tal fim.

A tecnologia extensométrica é amplamente difundida e utilizada na medição de pressão (LIM, 2005). Há muita informação disponível nessa área fornecida por fabricantes (VISHAY, OMEGA, HBM, EXCEL) e existe também uma grande disponibilidade de equipamentos de processamento de sinais para essa tecnologia.

O princípio físico para conversão da pressão em um sinal de saída elétrico utilizado por essa tecnologia é a alteração de resistência elétrica. O extensômetro é colado ao elemento elástico sobre o qual a pressão é aplicada e a deformação deste é transmitida ao extensômetro, que sofre uma variação de resistência. Consequentemente, a variação da resistência é proporcional à pressão aplicada ao elemento elástico (DOEBELIN, 1990; GAO, 2004).

No desenvolvimento de um transdutor de pressão extensométrico deve-se levar em conta os efeitos da temperatura. Alguns destes serão explicados a seguir.

3.1. DERIVA TÉRMICA

Quando se utilizam extensômetros para medir pressão sempre há influência indesejável da temperatura (LEE, 1999; WANG, 2005; BRUYKER, 2000). Os efeitos da temperatura sobre extensômetros são devido a dois fatores básicos: variação da resistividade e diferença entre os coeficientes de expansão térmica da grade, do substrato e do material da peça ao qual o extensômetro é colado (VISHAY, 2007b). Essa variação do comportamento ideal pode causar erros significativos se não levada em consideração. Esse efeito devido à variação da temperatura é chamado de deformação aparente.

Assim que ocorrer uma mudança na temperatura, ocorrerá uma variação na resistência do extensômetro. Essa variação da resistência com a temperatura é independente da deformação mecânica no corpo elástico no qual o extensômetro está colado. A deformação aparente é uma fonte de erro na medição com extensômetros. A qualquer temperatura, ou em qualquer faixa de temperatura, essa fonte de erro

requer considerações cuidadosas e exige uma compensação para a correção da deformação aparente (VISHAY, 2007b).

Com a variação da temperatura o substrato expande ou contrai e, se o extensômetro estiver firmemente colado, a grade é forçada a sentir a mesma expansão ou contração. Na medida em que os coeficientes de expansão térmica da grade e do substrato diferem, a grade é mecanicamente deformada conforme a expansão ou contração do substrato. Cada uma das mudanças de resistência devido à variação da temperatura pode ser positiva ou negativa, dependendo da variação da temperatura. A deformação aparente pode ser calculada conforme equação (1) (VISHAY, 2007b).

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/O} = \left[\beta_G + F_G \left(\frac{1 + K_t}{1 - \nu_0 K_t} \right) (\alpha_S - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (1)$$

onde:

$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/O}$ = Variação da resistência de referência, R_0 , causada pela variação de temperatura, resultando na deformação aparente;

β_G = Coeficiente de temperatura da resistência da grade;

F_G = Fator de correção do extensômetro;

K_t = Sensibilidade transversal do extensômetro;

ν_0 = Coeficiente de Poisson do substrato;

$(\alpha_S - \alpha_G)$ = Diferença de coeficiente de expansão térmica do substrato e da grade, respectivamente;

ΔT = Variação da temperatura em relação à da referência inicial.

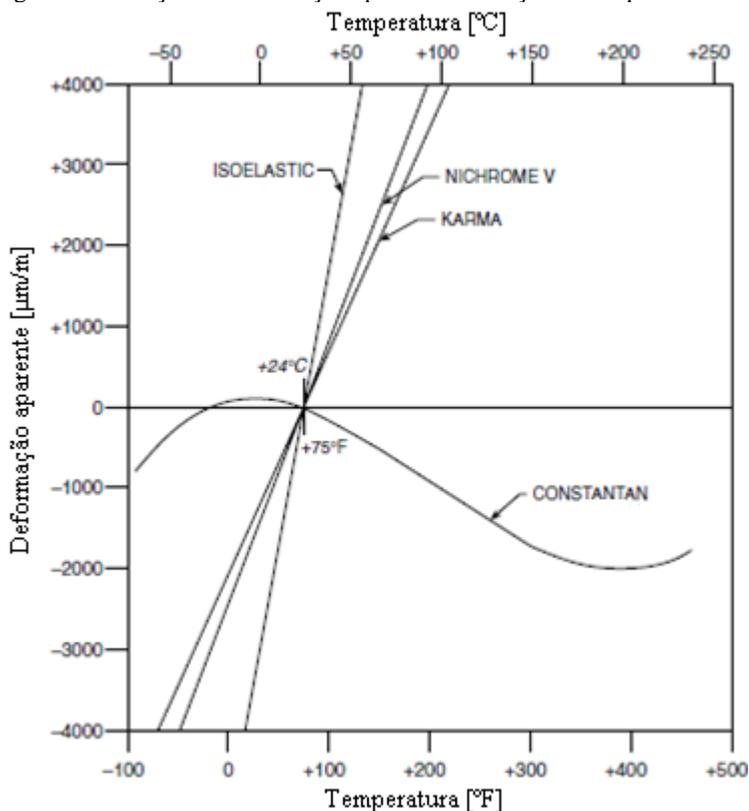
Pela equação (1) não se pode afirmar que a deformação aparente tem variação linear, pois todos os coeficientes são dependentes da temperatura. A equação demonstra claramente, entretanto, que a deformação aparente depende não somente da natureza do extensômetro, mas também do material no qual ele está colado. Devido a isso, os dados de deformação aparente são significativos apenas quando referidos a um tipo particular de extensômetro ligado a um material de substrato específico.

Nem sempre é possível prever exatamente qual será a deformação aparente numa dada aplicação, nem mesmo em casos onde a aplicação envolve o mesmo material usado pelo fabricante em seus testes. Diferenças podem ser esperadas, pois as características de expansão térmica variam de lote para lote. A melhor maneira é sempre avaliar um

ou mais extensômetros nas mesmas condições térmicas (VISHAY, 2007b).

A Figura 6 mostra a variação da deformação aparente em função da temperatura para algumas ligas de extensômetro coladas no aço SAE 1018. Os materiais normalmente aumentam com a temperatura, sendo o Constantan uma exceção, apresentando um coeficiente de expansão térmica muito baixa.

Figura 6 - Variação da deformação aparente em função da temperatura.



Fonte: VISHAY, 2007b.

Ressalta-se que esses dados são apenas ilustrativos e não podem ser usados para fazer correções. Com a auto-compensação de temperatura, as características da deformação aparente serão ajustadas para minimizar o erro nas temperaturas de trabalho. Os erros devido à deformação aparente podem ser significativas quando a temperatura do

extensômetro desviar da temperatura de referência (geralmente a ambiente). Esse efeito mostra claramente a necessidade de uma compensação, se a medição com extensômetro envolver variações de temperatura ou ocorrer em uma temperatura diferente da referência.

Deve-se notar que, se for possível manter a peça testada numa dada temperatura, ou seja, numa temperatura na qual o sistema encontra-se calibrado, não existirá deformação aparente. Em outras palavras, quando não há mudança de temperatura, as medições de deformação podem ser feitas sem a necessidade de compensação. Na prática é raro que essas condições sejam satisfeitas, e então se torna necessário a correção da temperatura. Adicionalmente, no caso da avaliação do comportamento puramente dinâmico, pode a deformação aparente não ter nenhuma consequência. Isso é devido à frequência do sinal de deformação dinâmica ser usualmente muito maior que a frequência da variação da temperatura, e ao fato dos dois sinais serem lidos separadamente. Se, entretanto, existir a combinação de medição dinâmica e estática, e a componente estática for a de interesse, ou se a frequência da variação da temperatura for da mesma ordem da frequência da deformação, o efeito da deformação aparente deve ser considerado (VISHAY, 2007b).

As propriedades metalúrgicas de certas ligas, em particular, Contantan e Karma, denominadas pela Vishay Micro-Measurements como ligas A e K, respectivamente, são tais que possuem uma redução da deformação aparente sobre uma larga faixa de temperatura, quando testadas em materiais cujo coeficiente de expansão térmica é muito similar ao das ligas. Extensômetros que empregam ligas com esse processamento especial são denominados extensômetros auto-compensadores de temperatura.

Alguns extensômetros possuem autocompensação de temperatura para materiais específicos, porém, em temperaturas específicas (POUSSIER, 2004).

Os extensômetros são projetados para minimizar a deformação aparente numa determinada faixa de temperatura. Quando esse tipo de extensômetro é colado em um material que tem o coeficiente de expansão térmica similar conforme pretendido e, quando estiverem operando dentro de uma faixa de temperatura de compensação, as medições de deformação, em geral, podem ser feitas sem a necessidade de correção (VISHAY, 2007b).

A designação de extensômetros com autocompensação de temperatura pela Vishay MM inclui números de dois dígitos

identificando o coeficiente de expansão térmica nominal do material (em ppm/°C), conforme apresentado na Tabela 1 (VISHAY, 2007b).

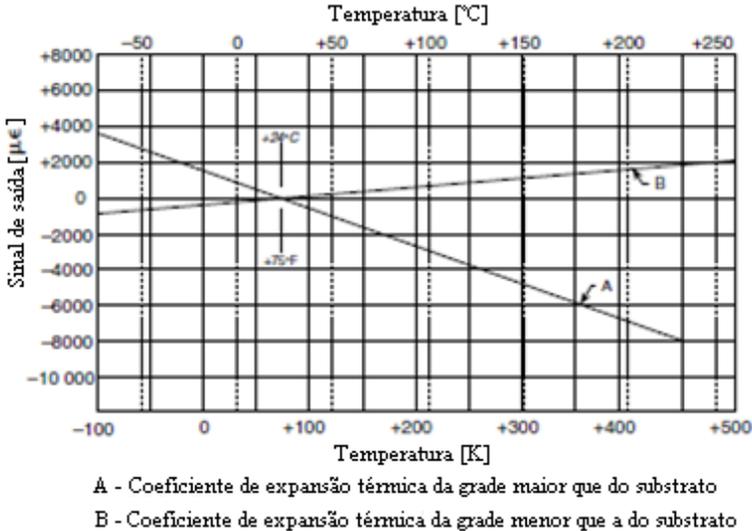
Tabela 1 - Lista dos coeficientes de expansão térmica de alguns materiais de engenharia e seus respectivos números para autocompensação de temperatura.

Coeficiente de expansão térmica de alguns materiais		
Material	Coeficiente [ppm/°C]	Número de compensação
Alumina	5,4	03
Berílio	11,5	09
Bronze	18,4	09
Cobre	16,5	09
Aço Carbono	12,1	06
Aço inoxidável martensítico	10,8	06
Aço inoxidável austenítico	17,3	09
Aço inoxidável ferrítico	9,9	05

Fonte: VISHAY, 2007b.

Se os coeficientes de expansão térmica de um extensômetro e do substrato onde aquele for colado não combinarem, a curva característica da deformação aparente será alterada, conforme mostra a Figura 7, por uma rotação na curva em torno da temperatura de referência.

Figura 7 - Desvio da curva se o coeficiente de expansão térmica do extensômetro não combinar com o do material no qual ele será colado.



Fonte: VISHAY, 2007b.

Como visto, o efeito da temperatura no sinal de saída de um transdutor extensométrico pode ser muito prejudicial e requer métodos de compensação.

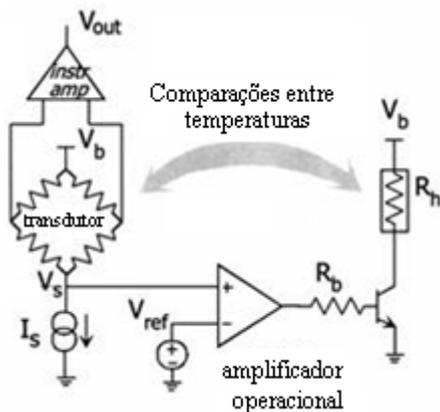
3.2. MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA

Alguns métodos para compensação da deriva térmica consistem basicamente em adicionar um resistor na saída da ponte (MELVAS, 2003; WANG, 2005; SCOTT, 2011), enquanto outros usam informações de transdutores de temperatura e eletrônica adicionais (GAKKESTAD, 1994; LEE, 1999; BRUYKER, 2000). Esses métodos demandam conhecimento exato a respeito da compensação de temperatura e da sensibilidade do transdutor requerendo calibração.

Bruyker et al. (2000) apresentaram uma técnica de compensação térmica que não requer conhecimento da deriva térmica do transdutor. O princípio é baseado na comparação do sinal da temperatura do transdutor com a temperatura de referência e o resultado é levado a um eletrodo aquecedor. Devido ao acoplamento térmico entre o eletrodo e o

transdutor, qualquer diferença de temperatura entre o transdutor e a referência será eliminada, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Princípio de funcionamento da técnica de compensação de Bruyker et al.



Legenda:

- V_{ref} – tensão referencial;
- V_b – tensão na base do transistor;
- V_{out} – tensão de saída;
- V_s – tensão de alimentação da ponte;
- I_s – corrente de alimentação;
- R_b – Resistência de base do transistor;
- R_h – Resistência do aquecedor.

Fonte: Bruyker, 2000.

O sinal de temperatura é comparado à tensão referencial, que representa a temperatura de referência. Quando a temperatura do transdutor fica abaixo da temperatura de referência, a corrente do aquecedor aumenta a fim de manter a temperatura do elemento sensor na referência. A resistência base (R_b) é usada para ajustar a máxima corrente do aquecedor.

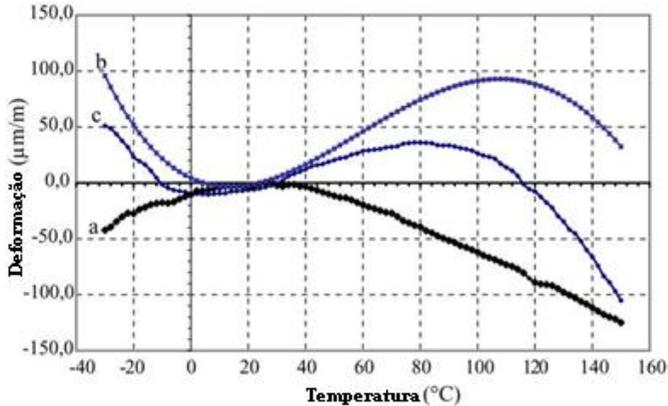
Esse método é dependente da máxima corrente fornecida à resistência do aquecedor. Entre o transdutor e a referência, a diferença de temperatura máxima alcançada no trabalho de Bruyker et al. (2000) foi de 40 °C, considerando uma incerteza de medição de 0,2 % do intervalo de medição. Portanto, ao se ter maiores diferenças de temperatura, o método torna-se ineficiente.

Poussier et. al. (2004) estudaram um sistema de compensação térmica para transdutores extensométricos envolvendo computações

complexas. Partes do algoritmo foram implantadas em *hardware* e outras em *software*. Essa nova arquitetura consiste de funcionalidades de *hardware* e *software* implantados num FPGA (incluindo um processador core). FPGA é um componente eletrônico reprogramável que usa blocos lógicos programáveis pré-construídos, que podem ser configurados para implementar funcionalidades personalizadas de hardware (PEDRONI, 2007; NATIONAL INSTRUMENTS, 2011; MEYER, 2006). A temperatura durante os experimentos varia de (-30 a +150) °C e a compensação é feita com o uso de um extensômetro que sofre a mesma variação de temperatura, porém sem sofrer deformações. O sistema é composto por transdutores de temperatura e de força e *hardware* analógico digital.

No experimento testado por Poussier et al. (2004) o extensômetro foi colado numa superfície de alumínio com adesivo Mbond 610 (VISHAY, 2007d). Seu fabricante fornece uma curva característica, conforme mostrado na Figura 9, onde também são apresentadas as curvas das medições realizadas e da correção. A diferença nas curvas, conforme observado na Figura 9, é devido essencialmente à técnica de colagem e diferenças entre o material apresentado pelo fabricante e o usado no teste.

Figura 9 - Compensação de temperatura, para extensômetro colado em suporte de alumínio.



Legenda:

- a – curva característica da deformação do extensômetro em função da temperatura fornecida pelo fabricante;
- b – curva das medições realizadas com o extensômetro;
- c – curva de compensação.

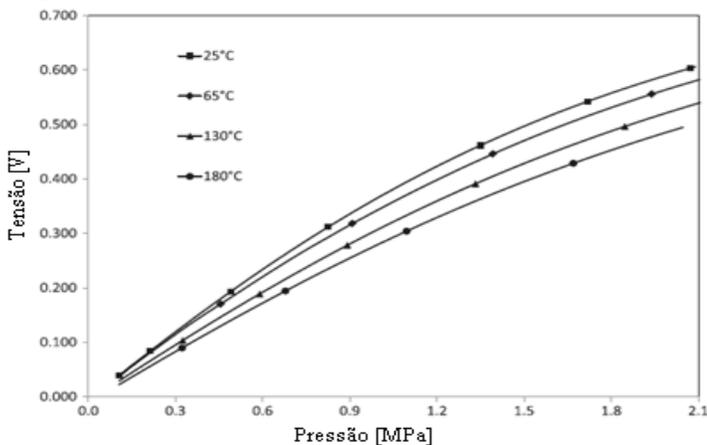
Fonte: Poussier, 2004.

Esse método é muito utilizado para compensar o efeito da temperatura em transdutores extensométricos. Entretanto, não é aplicável ao trabalho presente, pois o segundo extensômetro deveria sentir apenas a influência da temperatura, mas se colocado na placa-válvula terá também a influência da deformação desse componente.

Mohammadi et al. (2011), desenvolveram um transdutor de pressão para aplicação onde a temperatura pode atingir 180 °C e pressão de 20 bar. O transdutor de pressão utiliza como elemento sensor extensômetros na configuração de ponte de Wheatstone. Para a compensação utilizaram-se extensômetros apenas como sensor de temperatura.

Por ter apresentado um comportamento linear em todas as temperaturas, foram tomados apenas dois pontos para a calibração do transdutor. Na Figura 10 nota-se a diferença de sinal de saída do transdutor quando a temperatura é aumentada.

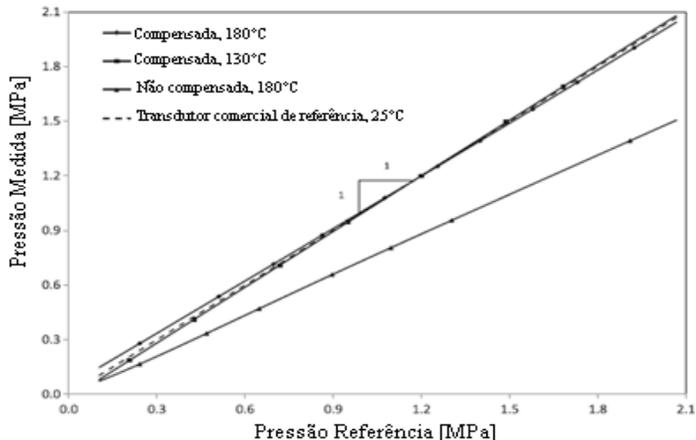
Figura 10 - Tensão de saída versus temperatura, sem compensação de temperatura.



Fonte: Mohammadi, 2011.

Na Figura 11 observa-se que as curvas estão sobrepostas devido à compensação de temperatura.

Figura 11 - Comparação entre o sinal de saída compensada e não compensada em várias temperaturas.



Fonte: Mohammadi, 2011.

Algumas soluções para compensação de temperatura foram apresentadas. Dentre elas, destacam-se métodos que utilizam como forma de compensação dispositivos eletrônicos adicionais, que fazem automaticamente as devidas correções. Existem outros métodos que adicionam componentes, como resistores, que sentem a mesma variação de temperatura que a do transdutor, sem sofrer qualquer tipo de deformação.

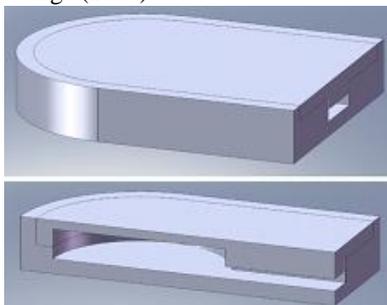
Para o problema em questão estas soluções podem ser inviáveis devido às dimensões do protótipo e ao local onde o mesmo será instalado, impossibilitando que, por exemplo, um componente seja adicionalmente instalado para que sofra apenas a influência da temperatura.

4. APRIMORAMENTO DO PROJETO MECÂNICO

4.1. INTRODUÇÃO

Conforme observado por Weege (2009, p. 98), o transdutor de pressão para aplicação em câmaras de pequeno volume deve possuir um perfil plano para evitar a criação de volume morto, prejudicial a eficiência do compressor, segundo apresentado na seção 2.2. Weege (2009) desenvolveu um protótipo de transdutor de pressão, mostrado na Figura 12.

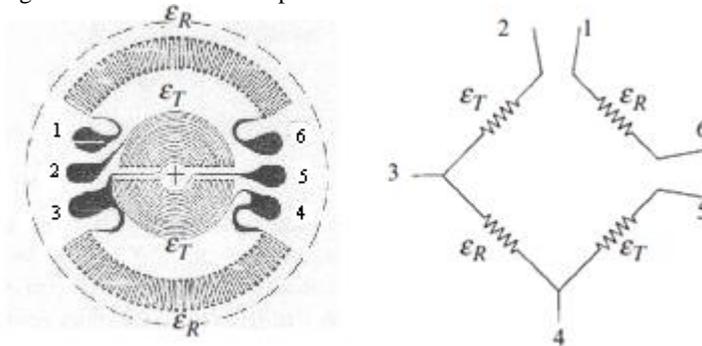
Figura 12 - Primeiro protótipo de transdutor de pressão desenvolvido por Weege (2009).



Fonte: Weege, 2009, p. 98.

Este protótipo foi fabricado em aço inoxidável com dimensões de 7,30 mm, 9,50 mm e 1,80 mm (largura, comprimento e espessura, respectivamente). O problema é que a espessura do protótipo está acima da espessura máxima permitida para usinar um rebaixo na placa-válvula. O protótipo utiliza como elemento sensor um extensômetro tipo roseta, do fabricante Vishay Micro-Measurements (MM) (VISHAY, 2007a), em ponte de Wheatstone completa, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Extensômetro tipo roseta.



Legenda:

ϵ_R – Deformação radial

ϵ_T – Deformação tangencial

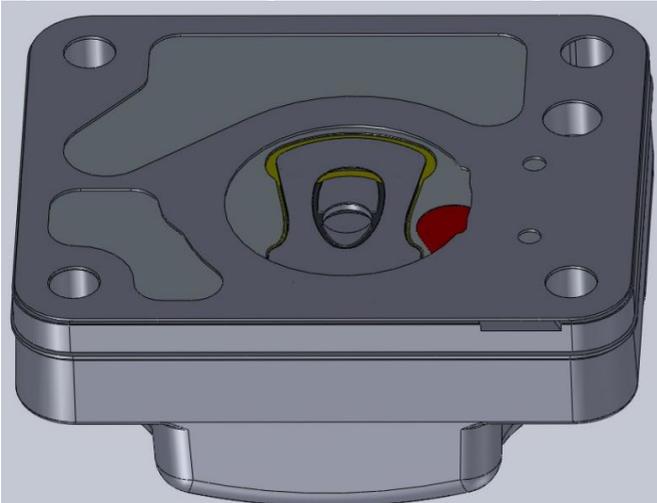
1, 2 e 4 – Alimentação

3, 5 e 6 - Leitura

Fonte: Weege, 2009, p. 101.

Por apresentar um perfil plano, o transdutor poderá ser instalado diretamente sobre a placa-válvula, conforme a Figura 14, onde será capaz de fornecer valores mais confiáveis de pressão.

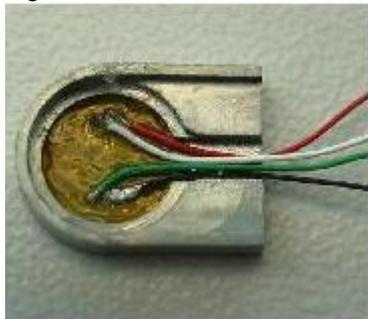
Figura 14 - Transdutor de pressão, em vermelho, na placa-válvula.



Fonte: Autor.

Algumas questões foram levantadas a respeito do protótipo desenvolvido por Weege (2009). Uma delas diz respeito à vedação, chamando a atenção para a saída dos fios, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Canal de saída dos fios.



Fonte: Weege, 2009, p. 101.

Outra questão importante refere-se à possível interferência no sinal de saída do transdutor causada pela deformação da placa-válvula. Neste capítulo serão apresentadas algumas alternativas para solucionar o problema de vedação do transdutor, assim como serão apresentados estudos, via elementos finitos, da deformação da placa-válvula e da interferência desta no transdutor.

4.2. VEDAÇÃO

Duas partes metálicas foram projetadas para encapsular o transdutor de pressão extensométrico: uma base, na qual o extensômetro é colado e, sendo assim, responsável pela transferência da força do substrato para o sensor (SHOMBURG, 2004), e uma tampa, que é a parte em contato na placa-válvula e que também tem a função de vedar o transdutor.

Na base existe um canal para a saída dos terminais do extensômetro e é esta saída o ponto crítico na vedação do transdutor. Para resolver esse problema duas alternativas foram propostas. A primeira sugere o uso de filmes de PEEK [poli(éter-éter-cetona)] (VICTREX, 2009) e a segunda sugere modificações no projeto mecânico proposto por Weege (2009). As duas alternativas serão discutidas a seguir.

4.2.1. Propriedades do PEEK

PEEK é um polímero de alta resistência mecânica e química, excelente resistência à abrasão e ao desgaste, e um bom isolante elétrico. Sua temperatura de trabalho pode variar de (-200 a +260) °C, e as espessuras dos filmes variam de 25 a 125 µm. Este material possui ainda baixa emissão de gases tóxicos e fumaças, baixa permeabilidade e módulo de elasticidade de aproximadamente 100 MPa, que pode ser aumentado com a adição de cargas, reforços e aditivos. Além disso, possui boa estabilidade térmica, sendo que sua degradação inicia acima de 550 °C. Ele está disponível no mercado em pó, pellet e em filme, e pode ser processado por extrusão, injeção, entre outros (VICTREX, 2009).

Este material é aplicado em diversos setores na indústria, como por exemplo em engrenagens de impressoras e copiadoras. Estas eram feitas de metal e foram substituídas por poliamidas para redução de ruído; entretanto, as mesmas derretiam com elevadas temperaturas. Atualmente as engrenagens são fabricadas em PEEK, que além de apresentarem alta resistência à temperatura, não causam ruídos. Filmes de PEEK também são utilizados para proteção de circuitos impressos, uma vez que podem ser depositados sobre metais ou sobre polímeros (VICTREX, 2009; MURARI, 2003).

Pensando nessas propriedades utilizou-se o filme de PEEK para garantir a completa vedação do protótipo, conforme pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 - Protótipo encapsulado com filme de PEEK.

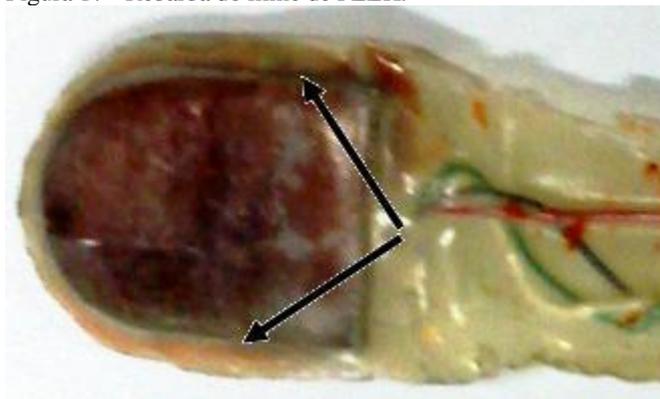


Fonte: Autor.

PEEK é um polímero termoplástico que requer preparação superficial para garantir a aderência entre outros materiais. A junção dos materiais se dá por processos de laminação, soldagem, ou por adesivos (VICTREX, 2009). Esses processos requerem temperaturas acima do

ponto de fusão do estanho, material usado na brasagem dos terminais dos extensômetros (SANTANA, 2010; VICTREX, 2009; CALLISTER, 2002), o que pode acarretar o desprendimento de um deles. Uma alternativa seria unir as partes com o uso de resina epóxi, conforme sugestão do fabricante. Sendo assim, foi utilizada a resina epóxi Treebond 2273 (TREEBOND, 2009) para a experiência, entretanto nota-se um excesso de rebarba na lateral do transdutor, indicado pelas setas na Figura 17.

Figura 17 - Rebarba do filme de PEEK.



Fonte: Autor.

Essa rebarba inviabiliza a instalação do protótipo na placa-válvula devido à diminuição da área de contato entre ambos, sendo esta a maior limitação do uso de filme de PEEK para vedação.

Portanto, outra alternativa proposta foi com relação à modificação do projeto mecânico do transdutor de pressão, a fim de aumentar a área de contato e, assim, aumentar a adesão entre as partes. Este estudo será apresentado na seção seguinte.

4.2.2. Alterações no projeto mecânico

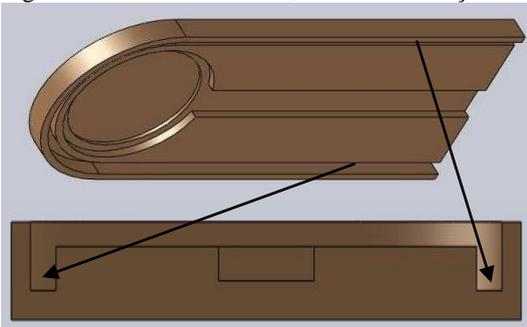
Como visto, o rebaixo máximo permitido para a usinagem na placa-válvula é de 1 mm, por isso o protótipo deve ter no máximo 1 mm de espessura. Weege (2009), em sua dissertação, apresentou um protótipo com 7,30 mm, 9,50 mm e 1,80 mm (largura, comprimento e

espessura, respectivamente), ou seja, 0,80 mm acima do máximo permitido para usinagem na placa-válvula.

Um novo protótipo foi desenvolvido neste trabalho, com modificações na largura, no comprimento e também na espessura. Esta foi reduzida enquanto que o comprimento e a largura foram aumentados.

Para garantir a vedação do transdutor foi projetado um rebaixo na peça onde o sensor é colado, chamada base, conforme se pode observar na Figura 18. A ideia do rebaixo foi para que a outra peça, denominada tampa, Figura 19, venha a se encaixar na base, conforme ilustrado na Figura 20.

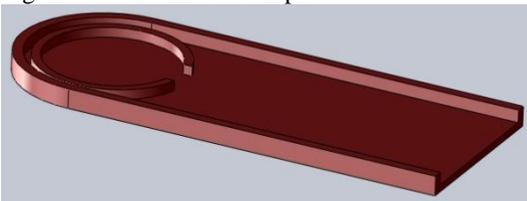
Figura 18 - Desenho da base, local de instalação do extensômetro.



Fonte: Autor.

A tampa possui um ressalto que encaixa no rebaixo da base, conforme mostrado na Figura 20.

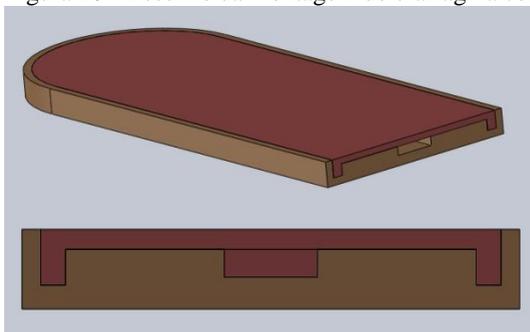
Figura 19 - Desenho da tampa.



Fonte: Autor.

Para a união das duas partes foi utilizado o adesivo treebond 2273 (TREEBOND, 2009). Esse adesivo é um monocomponente, curado a temperaturas entre (100 a 200)°C que, após a cura, possui boas resistências mecânica e térmica, além de ser um excelente isolante elétrico (TECHSIL, 2009).

Figura 20 - Desenho da montagem do diafragma com a base.



Fonte: Autor.

Na Figura 21 nota-se que o protótipo do modelo anterior (WEEGE, 2009) apresenta uma altura maior que o máximo do rebaixo permitido usinado na placa-válvula.

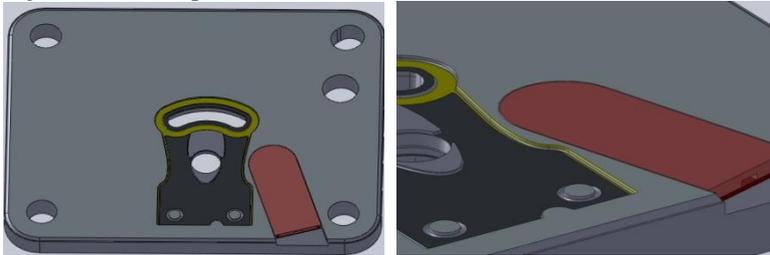
Figura 21 - Protótipo com o modelo anterior.



Fonte: Autor.

Por outro lado, na Figura 22 pode-se verificar que o novo protótipo proposto apresenta a espessura no mesmo plano da placa-válvula. Além disso, sugere-se deixar um espaço entre a placa-válvula e o protótipo. Esse espaço foi determinado por simulações, via elementos finitos, que identificou a melhor distância entre a lateral do protótipo e a placa-válvula para que ocorra a menor interferência possível entre ambos. Esse espaço foi de 0,30 mm. Assim, a instalação pode ser feita através do preenchimento desse espaço por meio do adesivo Treebond 2273.

Figura 22 - Protótipo com o novo modelo.



Fonte: Autor.

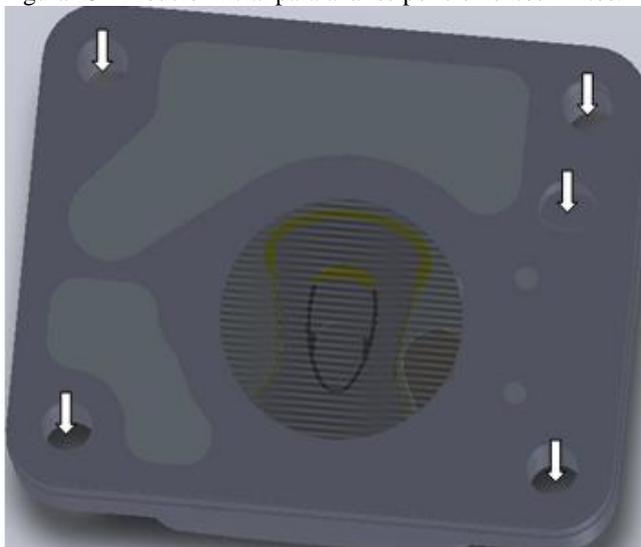
Foi realizado um estudo com os dois tipos de instalação usando o método de elementos finitos, onde também se pode verificar a deformação da placa-válvula e do protótipo, e a possível interferência da deformação entre eles. Essa análise será discutida a seguir.

4.3. ESTUDO DE DEFORMAÇÃO DA PLACA-VÁLVULA VIA ELEMENTOS FINITOS.

O método de elementos finitos tem como objetivo principal a análise do estado de tensões e deformações em um sólido sujeito a ação de forças externas numa geometria arbitrária (AZEVEDO, 2003; ORHAN, 2001; HASENKAMP, 2012; CAO, 2000; HO, 2002; LI, 2010).

Simulações foram realizadas, pelo método de elementos finitos, através do software comercial ANSYS 13.0 (ANSYS, 2010) com o objetivo de identificar possíveis influências no desempenho do transdutor de pressão, assim como no comprometimento do desempenho da placa-válvula. As análises realizadas consideraram a deformação do conjunto composto pela placa-válvula, placa de sucção, de descarga, batente e cabeçote.

Figura 23 - Modelo inicial para análise por elementos finitos.

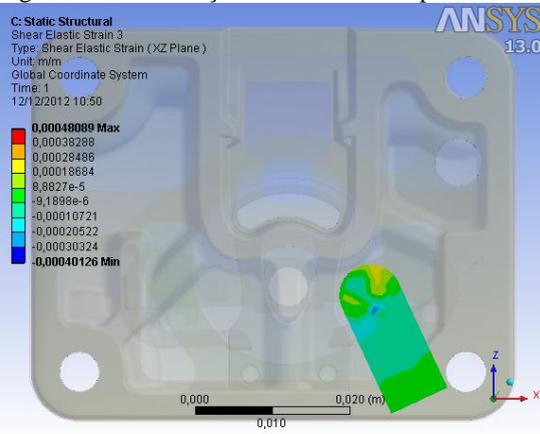


Fonte: Autor.

A área representada pela área hachurada na Figura 23 refere-se ao local onde a pressão de 35 bar é aplicada. As regiões dos parafusos apontadas com as setas brancas foram fixadas com torque infinito. A placa-válvula e o cabeçote foram consideradas soldadas, enquanto que as demais foram consideradas simplesmente apoiadas. Não foram consideradas na análise as juntas de vedação. O material da placa-válvula é o aço carbono sinterizado com módulo de elasticidade de 135 GPa; massa específica de 6900 kg/m^3 e coeficiente de Poisson de 0,27. As propriedades da válvula de sucção consideradas foram: módulo de elasticidade de 350 GPa, massa específica de 4620 kg/m^3 , e coeficiente de Poisson de 0,36. O cabeçote foi definido como sendo de aço SAE 1020, assim como o restante das peças com módulo de elasticidade de 207 GPa, massa específica de 7800 kg/m^3 , e coeficiente de Poisson de 0,29. O transdutor de pressão foi considerado de aço inoxidável AISI 304 com módulo de elasticidades de 190 GPa, massa específica de 7900 kg/m^3 , e coeficiente de Poisson de 0,29 (CALLISTER, 2002).

Para a primeira simulação todos os componentes foram considerados flexíveis, tendo como objetivo identificar o efeito da deformação no transdutor. O resultado está apresentado na Figura 24, sendo observado uma deformação de $480 \text{ }\mu\text{m/m}$.

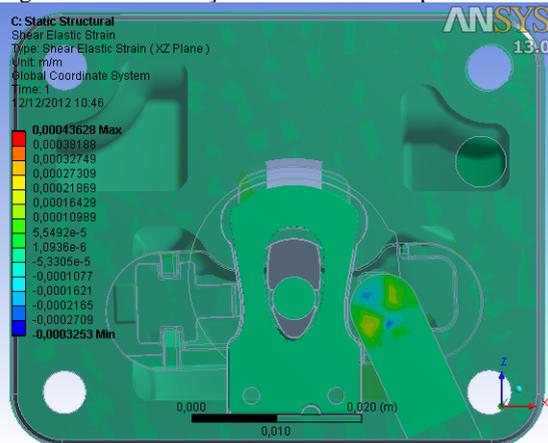
Figura 24 - Deformação no transdutor de pressão com componentes flexíveis.



Fonte: Autor.

Para a segunda simulação todos os componentes foram considerados rígidos, tendo como objetivo identificar o efeito da deformação no transdutor e calcular a diferença entre a placa-válvula rígida e a não rígida.

Figura 25 - Deformação no transdutor de pressão com componentes rígidos.

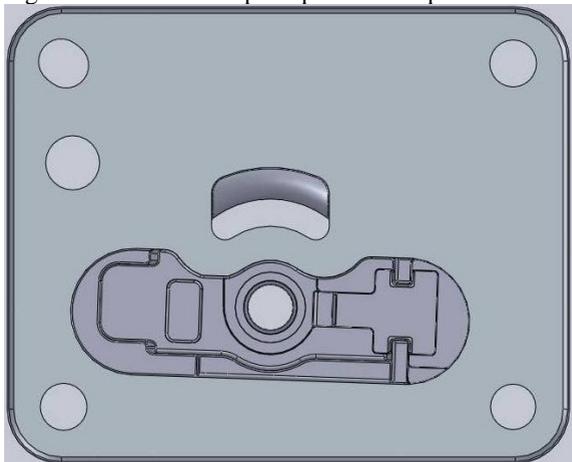


Fonte: Autor.

Nota-se, na Figura 25 que a deformação agora foi de $430 \mu\text{m/m}$ e a diferença entre os dois modelos é uma deformação no transdutor de $50 \mu\text{m/m}$.

Uma terceira análise foi realizada sem o rebaixo (Figura 26) da parte posterior da placa-válvula rígida, com o objetivo de identificar as deformações na mesma.

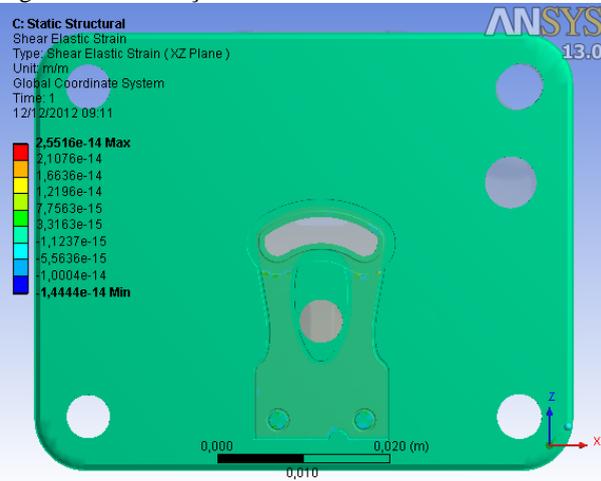
Figura 26 - Rebaixo na parte posterior da placa-válvula.



Fonte: Autor.

Nota-se, na Figura 27, que a deformação é considerada desprezível, mesmo com a presença do rebaixo para a instalação do transdutor de pressão. Portanto, a presença do rebaixo na parte trazeira da placa é um ponto importante a ser avaliado para a definição das dimensões do transdutor.

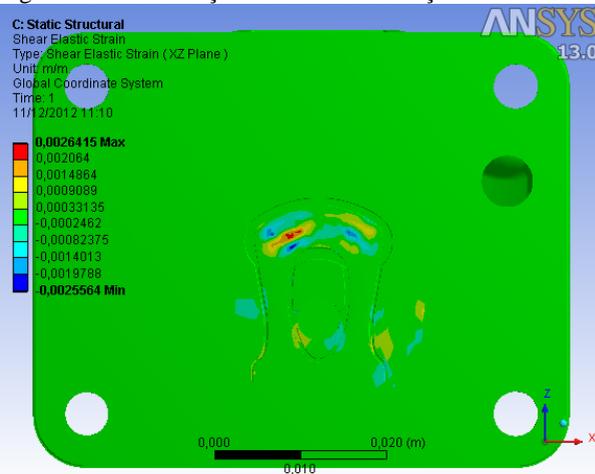
Figura 27 - Simulação sem rebaixo inferior.



Fonte: Autor.

A quarta simulação foi realizada considerando os componentes flexíveis com o objetivo de identificar a deformação na placa-válvula. Essa simulação foi executada com o rebaixo usinado na placa-válvula para a instalação do protótipo mas sem a presença do mesmo. Além disso, o rebaixo na parte posterior também foi considerado.

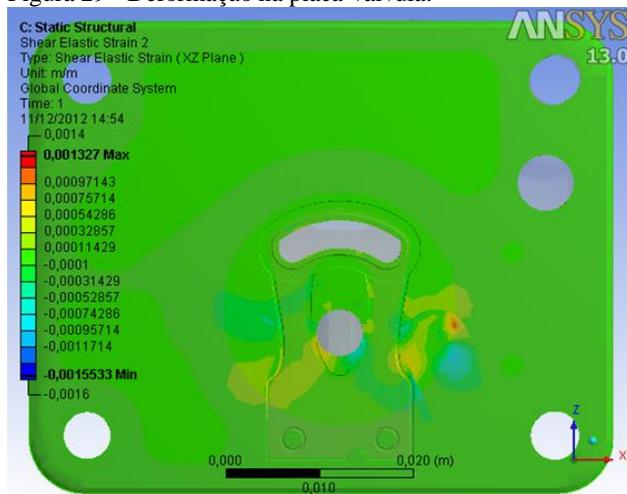
Figura 28 - Deformação na válvula de sucção.



Fonte: Autor.

Percebe-se que na Figura 28 a máxima deformação encontrada foi de aproximadamente 2600 $\mu\text{m}/\text{m}$ na válvula de sucção, sendo essa uma parte estruturante de resistência à pressão. A assimetria de deformação pode ser devido a não simetria das ranhuras no cabeçote em relação ao local de aplicação da pressão.

Figura 29 - Deformação na placa-válvula.



Fonte: Autor.

Ao analisar apenas a deformação na placa-válvula, conforme apresentado na Figura 29, percebe-se que a máxima deformação é de aproximadamente 600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Nota-se também que a deformação da placa-válvula, quando removido o rebaixo que aloja o batente, foi desprezível.

Visto isso, pode-se concluir que, a deformação da placa-válvula pode comprometer o comportamento do transdutor de pressão. Para amenizar esse efeito, uma das opções é deixar um espaço entre a placa-válvula e o transdutor. Simulações verificaram que a mínima distância entre eles será de 0,30 mm conforme visto na seção 4.2.2. O preenchimento desse vão pode ser feito com o uso de resina epóxi, com o intuito de evitar o movimento relativo entre transdutor e placa, e centralizar o transdutor em relação ao rebaixo.

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O projeto desenvolvido neste trabalho foi executado e vários testes com protótipos de transdutor de pressão foram realizados. Primeiramente um dos protótipos foi submetido a ciclos de carregamentos de (0 a 35) bar e descarregamentos de (35 a 0) bar, a fim de identificar o comportamento do seu sinal à temperatura ambiente. O próximo passo foi testar o protótipo com variações de pressão e temperatura e verificar o quanto a temperatura influenciava no seu sinal. Ao completar esta etapa, verificou-se a necessidade de analisar mais detalhadamente a influência da temperatura no sinal do protótipo e outros ensaios foram realizados.

Para a execução dos ensaios alguns instrumentos de medição foram usados. Para a etapa onde o protótipo está sujeito a variações de pressão e temperatura os equipamentos usados foram: o aparato para calibração de pressão (BIMETAL, 2010), responsável pela geração de pressão hidráulica; o Eurotherm 2216e (EUROTHERM, 2007), responsável pelo controle da temperatura no forno; a ponte amplificadora MGCplus (HBM, 2002), responsável pela alimentação, amplificação e leitura do sinal do transdutor de pressão; e o transdutor de pressão de referência modelo P3M (HBM), responsável pela identificação do valor de pressão aplicada no protótipo.

Cada um deles possui um valor de incerteza que deve ser levado em consideração no valor medido. Para o eurotherm 2216e o valor de incerteza é de $\pm 0,25\%$ do valor lido, estabelecido pelo fabricante. O aparato para calibração de pressão, conforme dados do fabricante, tem a incerteza de medição o mesmo valor do transdutor de referência.

Utilizou-se o transdutor modelo P3M, da marca HBM, conectado à ponte amplificadora, também da HBM, e esse sistema foi utilizado como referência de pressão. Segundo informações do fabricante, o transdutor tem como sensibilidade 2 mV/V e repetibilidade de $\pm 0,05\%$. O transdutor usado como referência de pressão foi conectado à balança de peso morto, ambos em temperatura ambiente. A variação da temperatura pode afetar a sensibilidade em até $\pm 0,2\%$ dentro da faixa de temperatura de operação. Além disso, o efeito da temperatura também afeta no sinal de *offset*, que pode variar de $\pm 0,15\%$ dentro da faixa de temperatura de operação (HBM).

O sinal do protótipo foi conduzido a um amplificador, modelo ML10B, integrado à plataforma MGCplus. A alimentação dos transdutores foi com uma tensão constante de 5 V. Essa plataforma possui um erro de linearidade menor que 0,01% do intervalo de

medição. Nesse equipamento a variação de 10 °C na temperatura pode causar um erro de sensibilidade menor que 0,2% e um erro de linearidade de 0,02% do intervalo de medição.

Os ensaios onde se variou apenas o sinal com a temperatura tiveram adicionados alguns multímetros.

O primeiro, Agilent 34410A (AGILENT, 2007), foi adicionado para comparar o sinal de saída do extensômetro, em mV, antes de ser amplificado. O segundo, Agilent 34401A (AGILENT, 2007), foi adicionado para verificação da tensão de realimentação, do protótipo, em volts. O terceiro, Agilent 34972 A (AGILENT, 2007), foi adicionado para acompanhar a queda de tensão, em volts, no resistor de monitoramento, conforme será explicado mais adiante.

A incerteza de medição do multímetro Agilent 34410A, fornecida pelo fabricante, é de 0,0050% do valor lido somado com 0,0035% do intervalo, quando o intervalo considerado é de 100 mV. Para o multímetro Agilent 34401A, no intervalo de 10 V a incerteza de medição é de 0,0035% do valor lido somado a 0,0005% do intervalo considerado. Para o multímetro Agilent 34972A a incerteza de medição é de 0,0035% do valor lido somado a 0,0005% do intervalo considerado.

Com base nos valores apresentados acima se pode afirmar que os instrumentos de referência têm incertezas instrumentais, apresentando um erro combinado de aproximadamente 0,0007%, o que é plenamente aceitável em relação ao erro combinado admissível para o transdutor em desenvolvimento que é de 0,5%, ou menor, sendo comparável ao erro máximo de transdutores de pressão comerciais (WEEGE, 2009), em especial, comparável ao erro máximo do transdutor de pressão Kistler atualmente utilizado para as medições de pressão.

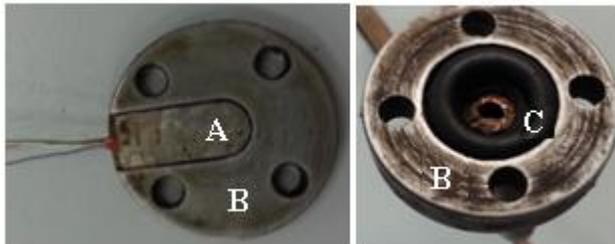
5.1. ENSAIO À TEMPERATURA AMBIENTE

5.1.1. Preparação do ensaio

Foram realizados ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos com o protótipo de transdutor de pressão. Para isso, o protótipo foi inserido numa peça metálica com um rebaixo usinado, imitando as condições de instalação na placa-válvula, como se pode observar na Figura 30 à esquerda. Outra peça, mostrada na Figura 30 à direita, tem como finalidade levar o fluido do calibrador de pressão até o

protótipo, bem como evitar que ocorram vazamentos durante a aplicação da pressão. O fluido utilizado foi a água.

Figura 30 - Peças usinadas para posicionamento do protótipo.



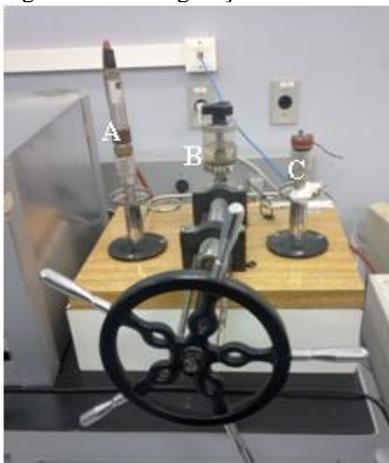
Legenda:

- A – protótipo;
- B – peças usinadas;
- C – saída do fluido.

Fonte: Autor.

O transdutor foi colocado num dos ramos do calibrador de pressão à temperatura ambiente, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Configuração do ensaio de bancada à temperatura ambiente.



Legenda:

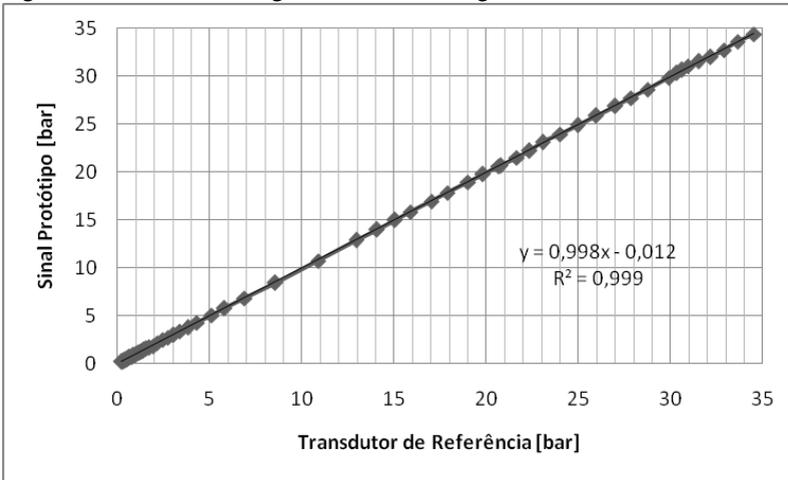
- A – transdutor de referência;
- B – reservatório de água;
- C – protótipo.

Fonte: Autor.

5.1.2. Resultados

Seis ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos foram realizados de (0 a 35) bar e a média dos ciclos pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 - Ciclos de carregamentos e descarregamentos.



Fonte: Autor.

O eixo da ordenada representa o sinal do protótipo em bar, sendo que, está sendo usado uma equivalência do sinal em milivolts. O eixo das abscissas representa o sinal do transdutor de pressão de referência, em bar.

Foi considerado um ajuste linear conferindo um valor de R-quadrado próximo a um. A diferença entre os sinais no carregamento e no descarregamento (definida como $p_{\text{carregamento}}$ e $p_{\text{descarregamento}}$), para cada pressão, está apresentada na Figura 33. A equação linear (2) do protótipo em teste é representada por

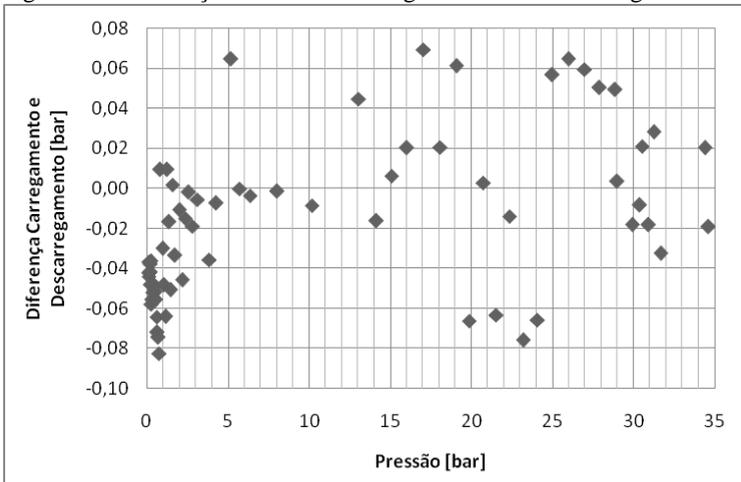
$$\text{Pressão} = a.\text{Tensão} + b \quad (2)$$

Ou seja,

$$\text{Pressão} = 0,998.\text{Tensão} - 0,012 \quad (3)$$

Sendo que o valor de 0,012, em módulo, representa um offset.

Figura 33 - Diferença de sinais no carregamento e no descarregamento.

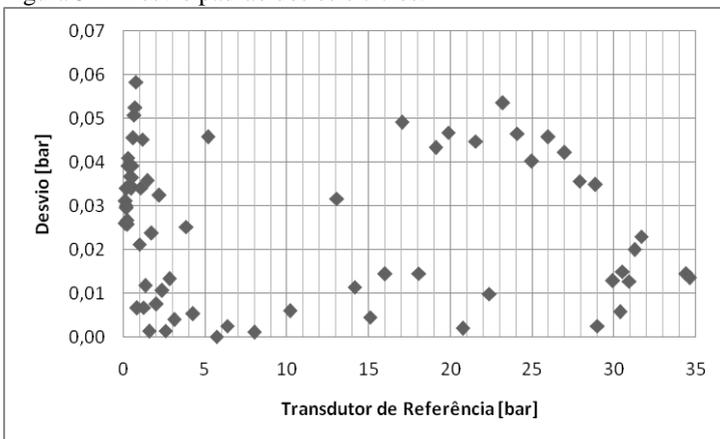


Fonte: Autor.

Nota-se que a diferença entre os sinais varia de -0,08 bar a +0,08 bar.

Ao analisar o desvio padrão apresentado na Figura 34 pode-se notar que, inicialmente, os valores são baixos e aumentam à medida que a pressão aumenta, ficando abaixo de 0,1 bar, o que representa uma boa repetibilidade entre os ciclos.

Figura 34 - Desvio padrão dos seis ciclos.



Fonte: Autor.

Adicionalmente analisou-se o erro de linearidade da curva resposta, que está apresentado na Tabela 2. Para isso, uma linha de tendência foi traçada e o desvio entre os pontos medidos com esta foram computados.

Tabela 2 - Erro de linearidade a 21 °C.

Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,030	0,026	0,009
4,997	5,044	-0,050
9,941	10,003	-0,073
14,913	14,973	-0,080
20,204	20,201	-0,026
25,298	25,280	-0,020
29,925	29,892	-0,013
34,966	34,850	0,062

Fonte: Autor.

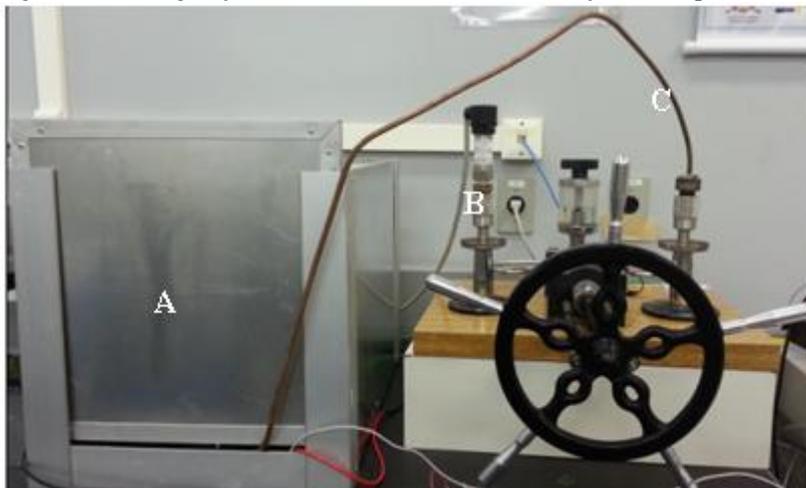
O maior erro de linearidade é de 0,080 bar, em módulo, e ocorre quando a pressão é de aproximadamente 15 bar. Por outro lado, o menor erro de linearidade é de 0,009 bar, quando a pressão é de 5 bar. Feito a análise à temperatura ambiente e tendo obtido um resultado positivo, partiu-se para uma nova análise, descrita a seguir.

5.2. ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA

5.2.1. Preparação para ensaio a diferentes temperaturas

Na segunda configuração o transdutor foi colocado numa estufa a fim de se obter a variação da pressão em diferentes temperaturas. Para isso foi necessário incluir um tubo para levar o fluido do calibrador de pressão até o protótipo no interior da estufa, conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Configuração do ensaio de bancada com variação de temperatura.



Legenda:

A – protótipo no interior da estufa;

B – transdutor de referência;

C – tubo para levar o fluido até o protótipo.

Fonte: Autor.

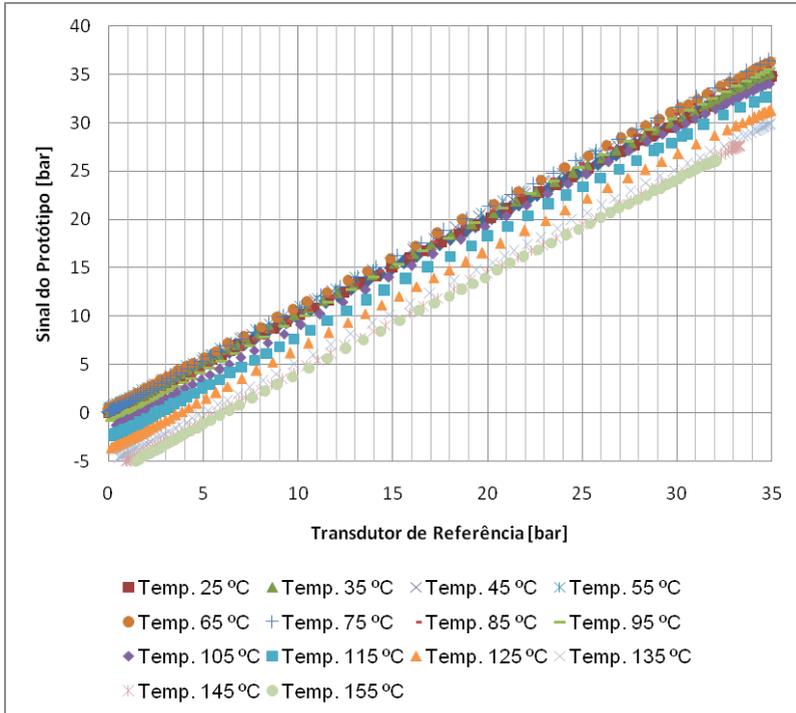
Para os ensaios a diferentes temperaturas três ciclos de carregamentos e descarregamentos sucessivos foram executados.

5.2.2. Resultados

Nesta seção estão apresentados os ensaios com o protótipo sujeito à variações de temperatura e pressão. Estando no interior da estufa o protótipo teve sua temperatura controlada. As temperaturas foram acrescidas de 10 °C após cada ensaio, a partir de 25 °C até 155 °C. Os ciclos de carregamento e descarregamento, de 0 a 35 bar, só foram iniciados após a estabilização da temperatura da estufa, o que durava em torno de 40 minutos.

Na Figura 36 observa-se que a cada temperatura o protótipo apresenta um comportamento bem linear, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

Figura 36 - Carregamentos e descarregamentos em todas as temperaturas ensaiadas.

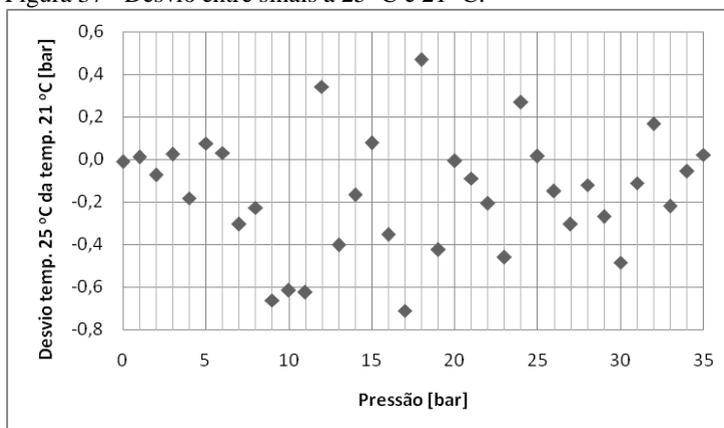


Fonte: Autor.

Na mesma figura também se pode notar um comportamento não linear em função da temperatura, pois ao elevar a temperatura da estufa, nota-se uma diferença no sinal do protótipo, quando comparado ao ensaio à temperatura ambiente, de 21 °C. Essas diferenças foram analisadas e devido ao grande número de dados, serão apenas apresentadas aqui as comparações de alguns ensaios. As demais análises encontram-se Apêndice A.

A Figura 37 apresenta o desvio do sinal a 25 °C quando comparado ao sinal do protótipo a temperatura ambiente, ou seja, 21°C.

Figura 37 - Desvio entre sinais a 25 °C e 21 °C.



Fonte: Autor.

Os maiores desvios concentram-se em regiões com pressões intermediárias. A diferença dos sinais ainda não é expressiva, porém, uma variação de 4 °C na temperatura pode gerar um desvio de até 0,8 bar no sinal.

O erro de linearidade também foi calculado e está apresentado na Tabela 3, onde se percebe que o maior erro foi de 0,109 bar, em módulo, quando a pressão é de aproximadamente 15 bar e o menor erro é de 0,013, em módulo quando a pressão é de 0 bar.

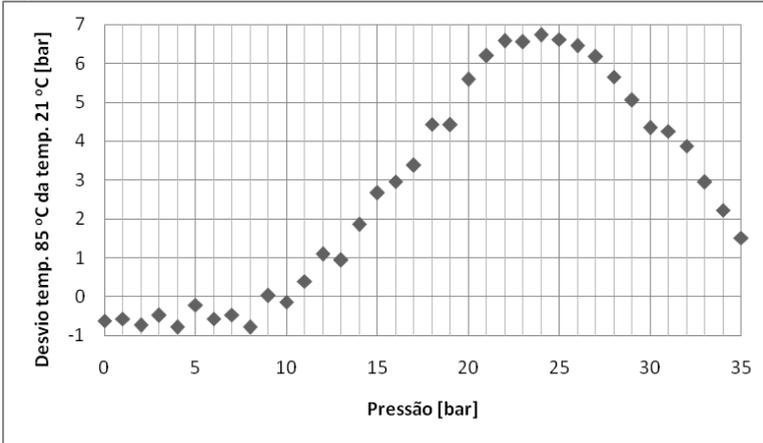
Tabela 3 - Erro de linearidade a 25 °C.

Temperatura 25 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,030	0,015	0,013
5,089	5,119	-0,049
10,064	10,132	-0,105
14,996	15,052	-0,109
20,167	20,195	-0,100
25,305	25,296	-0,081
30,106	30,014	-0,015
35,055	34,872	0,059

Fonte: Autor.

Da mesma forma, para a temperatura de 85 °C a diferença de sinais quando comparado com a temperatura ambiente está apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Desvio entre sinais de 85 °C e 21 °C.



Fonte: Autor.

Nota-se que as maiores diferenças concentram-se em pressões acima de 10 bar, sendo que, abaixo de 10 bar a diferença entre os sinais é pequena. Para uma temperatura de 85 °C, a variação no sinal do protótipo quando comparado à temperatura ambiente pode chegar a aproximadamente 7 bar, o que é bastante significativo.

O erro de linearidade da curva de variação de pressão a 85 °C de temperatura está apresentada na Tabela 4. O maior erro de linearidade é de 0,372 bar, em módulo, quando a pressão de aproximadamente 20 bar é aplicada, enquanto o menor erro está em aproximadamente 0 bar. Entre 0 bar e 20 bar o erro de linearidade aumenta, em módulo, já para pressões acima de 20 bar a não linearidade diminui, em módulo.

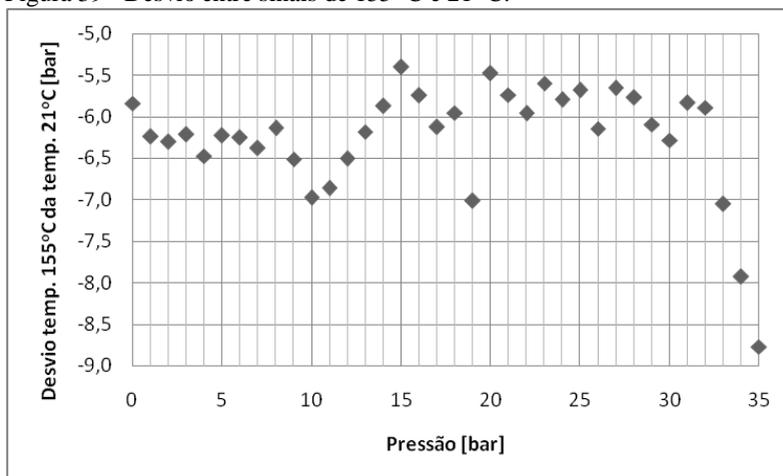
Tabela 4 - Erro de linearidade a 85 °C.

Temperatura 85 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,019	-0,599	-0,001
5,175	4,826	-0,027
10,471	10,612	-0,269
15,725	16,215	-0,372
20,163	20,862	-0,372
24,884	25,793	-0,359
29,882	30,884	-0,218
35,037	36,025	0,039

Fonte: Autor.

Para a temperatura de 155 °C, o desvio comparado à temperatura ambiente está apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Desvio entre sinais de 155 °C e 21 °C.



Fonte: Autor.

O desvio apresenta valores bem mais significativos chegando ao máximo absoluto de 9 bar. O erro de linearidade está ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Erro de linearidade a 155 °C.

Temperatura 155 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,373	-5,813	-0,063
5,007	-1,186	0,004
10,606	4,663	-0,173
15,393	9,571	-0,232
20,533	14,723	-0,177
25,396	19,597	-0,125
30,108	24,217	0,028
32,087	26,078	0,172

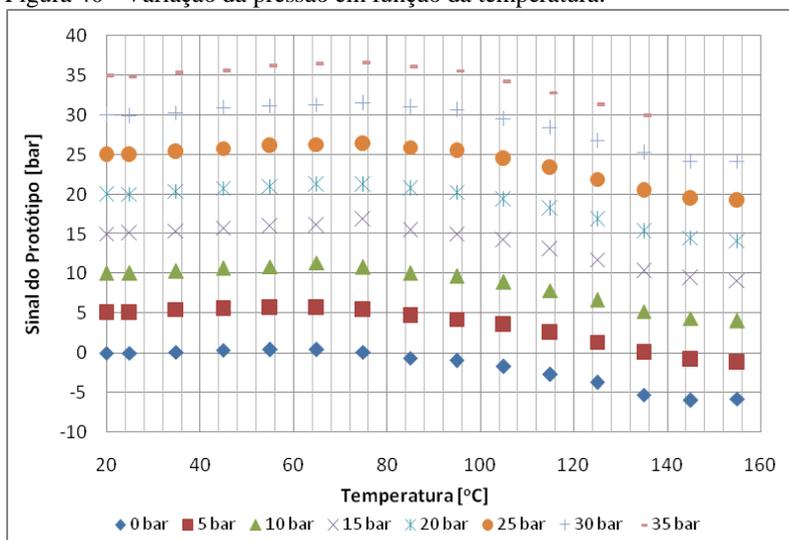
Fonte: Autor.

O valor máximo da não linearidade é de aproximadamente 0,232 bar, em módulo, quando a pressão é de 15 bar, correspondendo a 9,5 bar no protótipo. Já o erro mínimo é de aproximadamente 0,004 bar, quando a pressão é de aproximadamente 5 bar no transdutor de referência, correspondendo a -1,2 bar no protótipo.

5.2.3. Pressão x Temperatura

A Figura 40 mostra os mesmos ensaios com a temperatura no eixo das abscissas. Nota-se que ao atingir aproximadamente 75 °C o sinal do protótipo diminui.

Figura 40 - Variação da pressão em função da temperatura.



Fonte: Autor.

Para melhor entender o comportamento apresentado pelo protótipo, assim como o efeito da temperatura no seu sinal, optou-se por realizar novos testes, porém apenas variando a temperatura.

5.3. ESTUDO DO SINAL DE SAÍDA DO PROTÓTIPO

5.3.1. Introdução

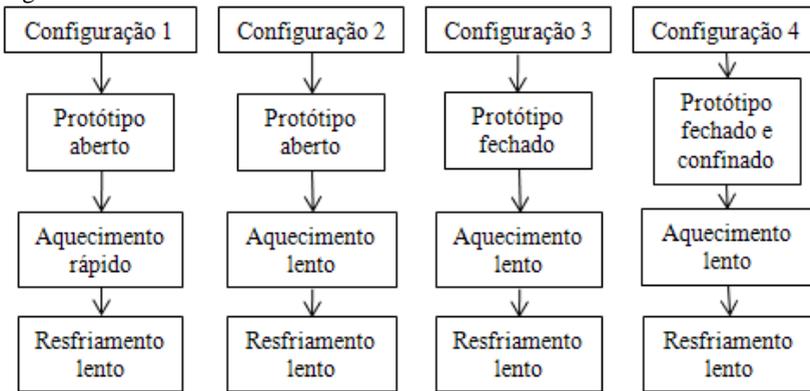
Com a finalidade de obter maiores informações a respeito do efeito da temperatura no sinal de saída do protótipo foram realizados 14 ensaios. Nos três primeiros ensaios o protótipo foi colocado na estufa, sem sua tampa e sujeito à variações de temperatura na qual o aquecimento deu-se de forma rápida e o resfriamento de forma lenta.

Adicionalmente, outros quatro ensaios foram realizados com o protótipo ainda aberto, porém para diminuir o tempo de aquecimento, o mesmo foi colocado sobre um bloco metálico e envolvido por manta cerâmica. Todo esse conjunto foi colocado na estufa que também foi preenchida com a mesma manta. A temperatura variou de aproximadamente 20 °C a 150 °C e resfriado até 20 °C. Outros dois ensaios foram realizados variando a temperatura de 20 °C para 50°C e

esperado um tempo para estabilização. Após isso, a temperatura foi elevada para 150 °C e outra vez estabilizada, e depois o protótipo foi resfriado lentamente até 50 °C e após um tempo resfriado até 20 °C.

A fim de comparações posteriores o protótipo foi fechado e repetiu-se duas vezes o mesmo ensaio realizado com o protótipo aberto. Por último, o protótipo foi confinado entre as peças usinadas para o ensaio com variação de pressão, porém, com aquecimento rápido e resfriamento lento, e três curvas foram levantadas. Um resumo dos ensaios está representado na Figura 41.

Figura 41 - Resumo dos ensaios.



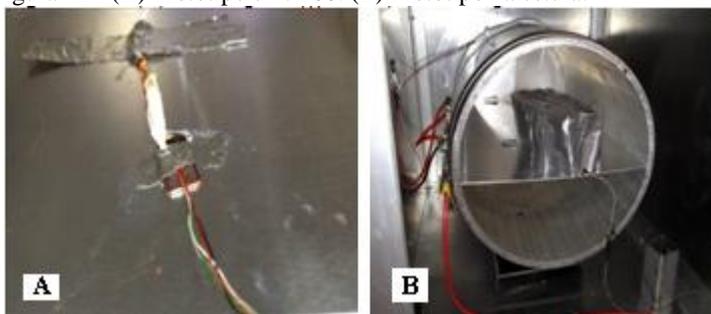
Fonte: Autor.

Cada um desses ensaios está apresentado nas seções seguintes.

5.3.2. Configuração 1

Nessa nova configuração o protótipo foi colocado na estufa, sem a tampa, com um Pt-100 apoiado no corpo de sua base, conforme Figura 42 à esquerda. O Pt-100 é o mesmo utilizado pelo Eurotherm 2216e (EUROTHERM, 2007) para controlar a temperatura da estufa.

Figura 42 - (A) Protótipo e Pt-100. (B) Protótipo na estufa.

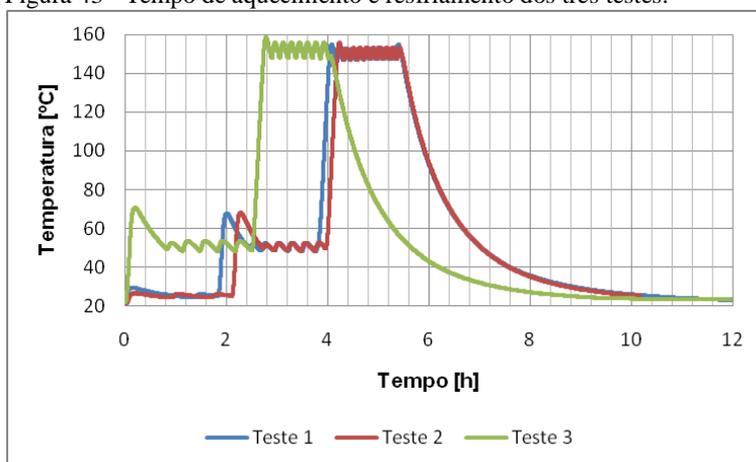


Fonte: Autor.

O protótipo foi aquecido até 50°C e deixado por cerca de 2 horas. Após essa etapa, o protótipo foi aquecido a 150°C e deixado por aproximadamente 2 horas para total estabilização da temperatura. Em seguida foi resfriado naturalmente até a temperatura ambiente.

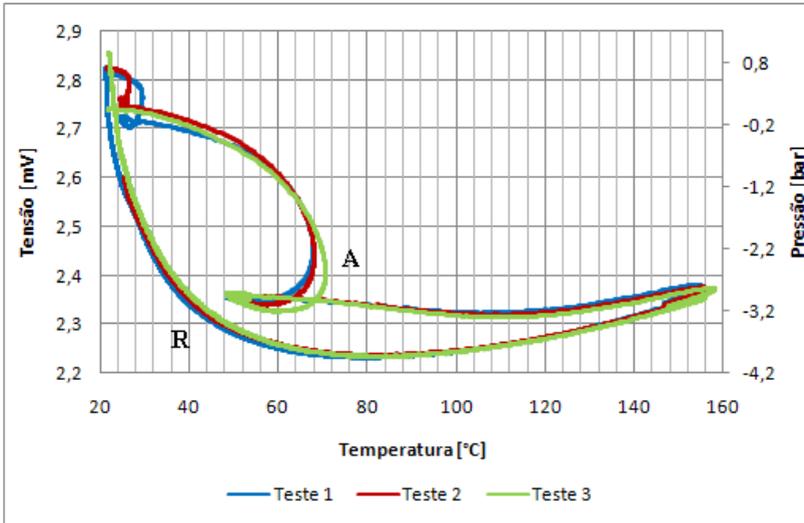
Uma nova rodada de ensaios foi realizada, porém agora com novos patamares de temperatura. Foram três dias de ensaios consecutivos, com estabilização da temperatura primeiramente a 25 °C, depois em 50 °C e por último em 150 °C. Após o aquecimento a estufa foi desligada para a etapa de resfriamento da mesma forma que o ensaio anterior. As temperaturas podem ser vistas na Figura 43 e os sinais de saída do protótipo podem ser visualizados na Figura 44.

Figura 43 - Tempo de aquecimento e resfriamento dos três testes.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Variação do sinal em função da temperatura em três etapas.



Legenda:

A – aquecimento;

R – resfriamento.

Fonte: Autor.

Na Figura 44 percebe-se que as três curvas estão sobrepostas, principalmente na etapa de resfriamento, além de uma diferença significativa entre a etapa de aquecimento e de resfriamento. Essa diferença pode ser explicada pelo aquecimento desigual entre cada um dos extensômetros, causando um desequilíbrio no sinal de saída da ponte. Uma tentativa para minimizar esse efeito seria aquecer e resfriar o protótipo de forma lenta. Nota-se que o tempo de aquecimento é muito menor que o tempo de resfriamento, conforme visualizado na Figura 43.

Ao observar novamente a Figura 44, tem-se no eixo esquerdo do gráfico o sinal de saída do extensômetro, em mV, em função da temperatura enquanto que no lado direito tem-se a pressão, em bar. Nota-se que o protótipo indica aproximadamente 2,3 mV quando a temperatura está próxima a 50 °C, correspondendo a aproximadamente 3,8 bar, em módulo.

Nota-se que a maior variação de sinal se encontra em temperaturas mais baixas, enquanto que, para temperaturas mais elevadas ocorre uma menor variação do sinal de saída do protótipo.

O desvio padrão entre as três curvas foi calculado sendo que o maior valor é de aproximadamente 0,25 mV na etapa de aquecimento, entre 40 °C e 50 °C. De 60 °C até 150 °C, tanto na etapa de aquecimento quanto na de resfriamento, o desvio é aproximadamente zero, indicando uma boa repetibilidade entre os três ensaios executados em dias diferentes.

Ao analisar os resultados encontrados até então, decidiu-se modificar a configuração do ensaio a fim de que o protótipo levasse o mesmo tempo do resfriamento para seu aquecimento. Com o protótipo aquecendo de forma uniforme e lenta, acredita-se que a diferença existente entre as duas etapas diminuirá. As mudanças realizadas serão descritas a seguir.

5.3.3. Configuração 2

Para se obter um aquecimento uniforme e lento o protótipo foi colocado sobre um bloco de aço e junto ao seu corpo foi colocado um termopar tipo K. Ambos foram fixados com fita metálica conforme Figura 45.

Figura 45 - Posicionamento do transdutor no bloco de aço.



Fonte: Autor.

O bloco então foi envolvido por muitas camadas de manta cerâmica e depois colocado no interior da estufa. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 46.

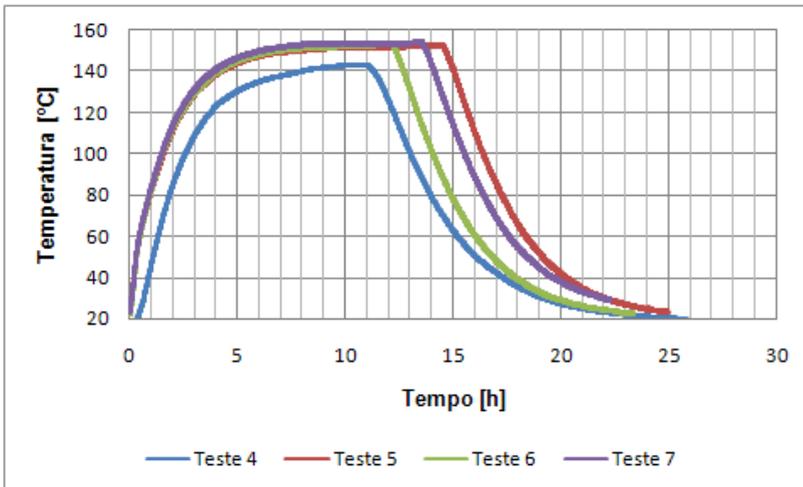
Figura 46 - À direita, bloco envolto por lã de vidro. À esquerda, protótipo posicionado na estufa.



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados com o protótipo sendo aquecido da temperatura ambiente até 150 °C e então resfriado até a temperatura ambiente. Ressalta-se aqui o tempo demandado para o aquecimento, que pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 - Tempo de aquecimento e resfriamento com isolamento.

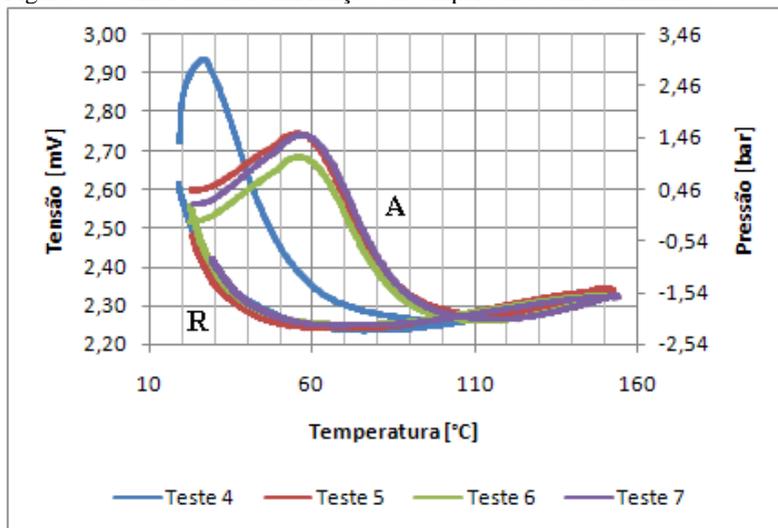


Fonte: Autor.

Ainda que a diferença entre o tempo de aquecimento e resfriamento tenha diminuído, este ainda é muito mais lento que aquele.

Quatro testes foram realizados com o protótipo em dias diferentes, sendo que cada um deles demandou, em média, 27 horas. Os resultados estão plotados no gráfico da Figura 48.

Figura 48 - Sinal de saída em função da temperatura com isolamento.



Legenda:

A – aquecimento;

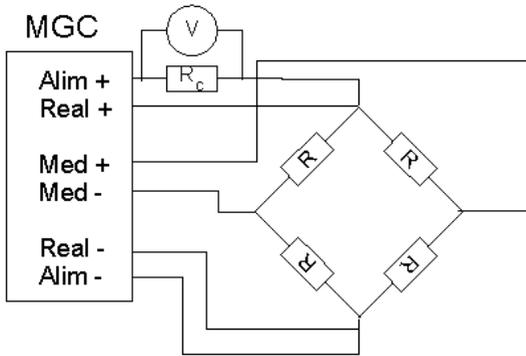
R – resfriamento.

Fonte: Autor.

A diferença do teste 4 com os demais é que a partir do teste 5 um resistor *shunt* de 100Ω foi adicionado em série com a alimentação do protótipo, conforme esquema da Figura 49, com a finalidade de medir indiretamente a temperatura sentida pelo protótipo através da queda de tensão no *shunt*.

Lembrando que o fato de ter adicionado o resistor *shunt* não alterou o sinal de saída do protótipo, apenas o aspecto da curva, pois agora, a temperatura de referência usada foi calculada através da variação da tensão no *shunt*.

Figura 49 - Esquema do circuito proposto para compensação da deriva térmica.



Fonte: Weeg, 2009.

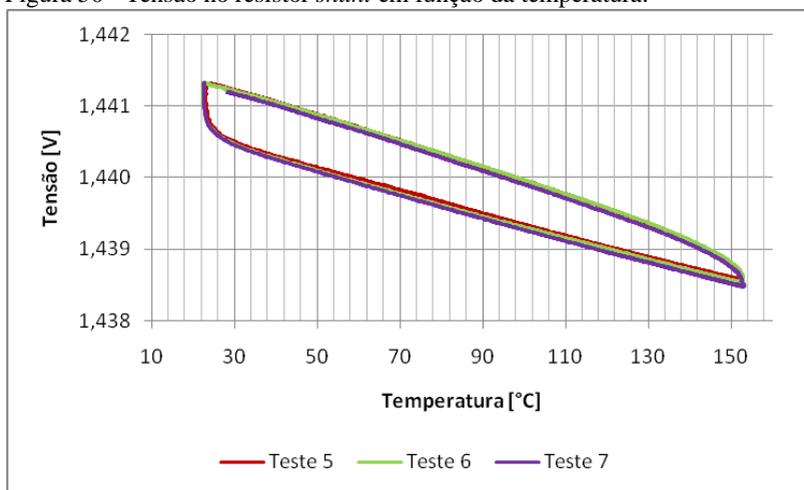
As pontes amplificadoras, quando empregadas com realimentação, mantêm a alimentação dos transdutores em valores constantes. Portanto, se há uma variação da impedância do transdutor haverá, conseqüentemente, uma variação da corrente fornecida ao transdutor pela ponte. Dessa maneira, mantém-se constante a tensão de alimentação do transdutor.

Dispondo-se de um resistor em série com a alimentação do transdutor pode-se medir essa variação da corrente indiretamente, medindo-se a tensão sobre esse resistor. A queda de tensão sobre o resistor não irá influenciar no valor de alimentação do transdutor, visto que a ponte amplificadora executa uma realimentação do sinal de tensão aplicado sobre o transdutor.

A queda de tensão no resistor *shunt* permite obter a variação de temperatura do protótipo e esta poderá servir como referência. Como conseqüência disso, os resultados dos testes realizados após a inclusão do resistor *shunt* utilizaram esses dados como a nova temperatura de referência.

Observa-se que na etapa de resfriamento todas as curvas estão sobrepostas. Um fator que chama a atenção é o aumento do sinal de saída do protótipo no início do aquecimento. Isso pode ser explicado pela variação da tensão de saída em função do gradiente de temperatura entre os braços da ponte. A tensão no resistor *shunt* em função da temperatura está apresentada na Figura 50.

Figura 50 - Tensão no resistor *shunt* em função da temperatura.



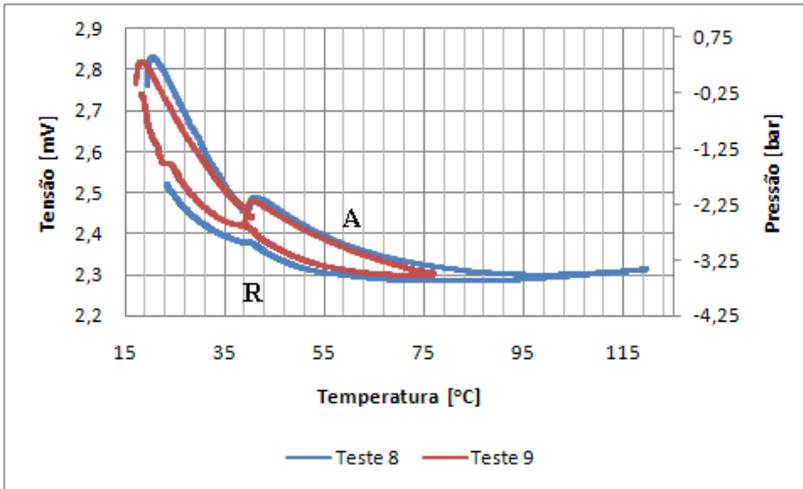
Fonte: Autor.

A temperatura de referência utilizada foi calculada pela equação da reta que passa pelos pontos iniciais e finais, ou seja, o início do aquecimento e final do resfriamento, e o final do aquecimento com o início do resfriamento.

O desvio padrão dos três ensaios foi calculado sendo que o valor máximo encontrado foi de 0,035 mV na temperatura de 40 °C e um valor mínimo de zero mV entre as temperaturas de 60 °C e 80 °C indicando uma boa repetibilidade.

Numa tentativa de aproximar ainda mais as curvas de aquecimento e resfriamento, dois ensaios foram realizados aquecendo o protótipo em duas etapas: primeiro até 40 °C, deixando que o sinal estabilizasse e em seguida aquecendo até 120 °C. O resfriamento também foi feito em duas etapas: primeiro até 40 °C e depois até a temperatura ambiente. O resultado pode se visto na Figura 51.

Figura 51 - Sinal de saída em função da temperatura com etapas de aquecimento e resfriamento.



Legenda:

A – aquecimento;

R – resfriamento.

Fonte: Autor.

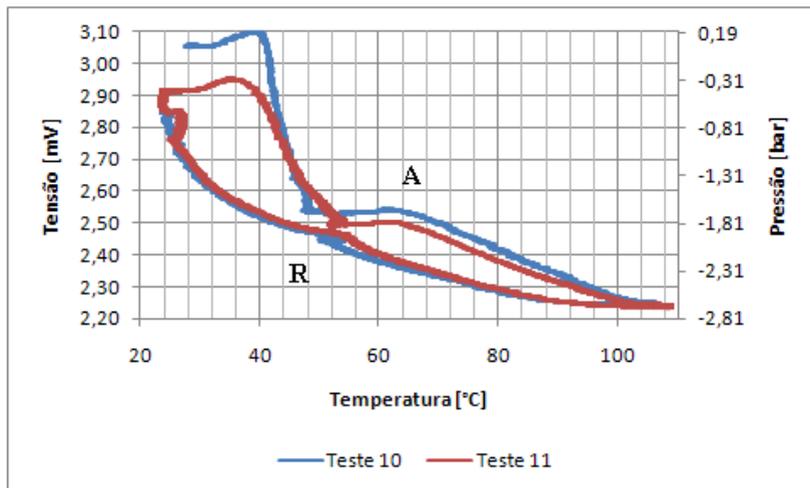
Uma maior aproximação das curvas foi conseguida, o que permite concluir que se o tempo de aquecimento e resfriamento for ainda mais lento, e totalmente controlado, as curvas nas duas etapas podem coincidir.

O desvio padrão entre os dois ensaios foi calculado e os valores encontrados foram de até 0,25 mV no início do ensaio e de até 0,05 mV no final, demonstrando uma boa repetibilidade entre as duas curvas.

5.3.4. Configuração 3

Para determinar alguma modificação no comportamento do protótipo, decidiu-se pelo seu fechamento, ou seja, uni-se a tampa com a base usando a resina epóxi. Repetiu-se então o último ensaio e o resultado deste pode ser visualizado na Figura 52.

Figura 52 - Sinal de saída em função da temperatura com isolamento e protótipo fechado.



Legenda:

A – aquecimento;

R – resfriamento.

Fonte: Autor.

Nesse momento, o sinal representado no eixo à direita refere-se ao sinal de saída do módulo analógico ML10B da ponte amplificadora MGCplus. O mesmo comportamento do sinal de saída encontrado nos ensaios anteriores foi repetido.

O desvio padrão entre as duas curvas foi calculado e encontrou-se valores muito próximos a zero mV onde claramente percebe-se uma boa repetibilidade principalmente na etapa de resfriamento.

5.3.5. Configuração 4

Outro tipo de teste foi realizado com o protótipo confinado no sistema para a aplicação de pressão, conforme mostrado na Figura 53 à esquerda, e posicionado no forno como pode ser visto na Figura 53 à direita.

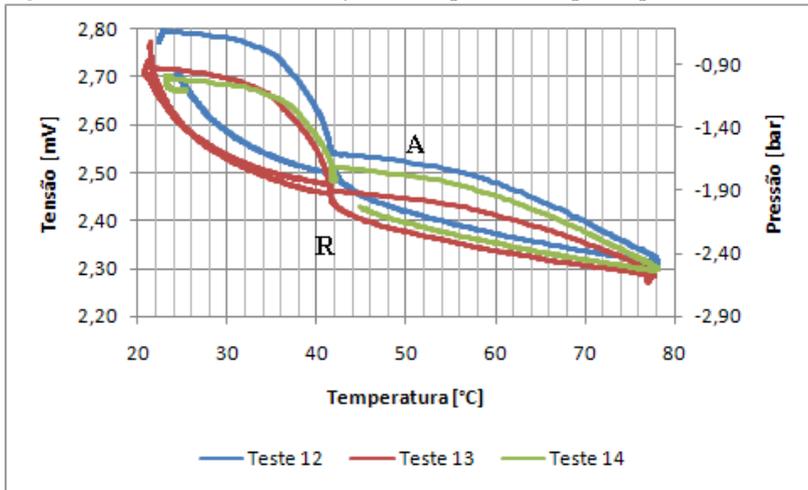
Figura 53 - Foto do acoplamento do protótipo.



Fonte: Autor.

O ensaio desta vez foi executado sem isolamento e o comportamento pode ser visualizado na Figura 54.

Figura 54 - Sinal de saída em função da temperatura do protótipo confinado.



Legenda:

A – aquecimento;

R – resfriamento.

Fonte: Autor.

Percebe-se que mesmo modificando as condições do ensaio o comportamento do transdutor segue o mesmo padrão. O desvio padrão das três curvas apresentou um valor máximo de 0,27 mV na etapa de

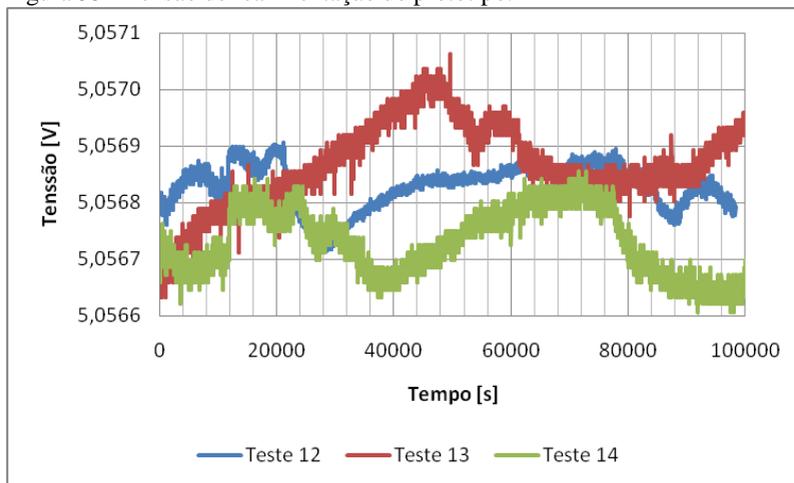
aquecimento na temperatura de 55 °C e valores mínimos de zero, na etapa de resfriamento, quando a temperatura estava entre 40 °C e 50 °C.

O desvio padrão na etapa de aquecimento é maior que na etapa de resfriamento, e novamente apresenta uma boa repetibilidade. O comportamento não linear em função da temperatura foi previsto conforme dados fornecidos pelo fabricante.

Uma questão foi levantada sobre a dilatação térmica do sólido no qual o extensômetro foi colado. Suspeitou-se que a assimetria do corpo pudesse estar interferindo no sinal do protótipo. Uma simulação via elementos finitos foi realizada e o resultado mostrou que esse efeito pode ser desprezível, porém o estudo foi realizado em regime permanente, não se podendo afirmar maiores problemas. O estudo desenvolvido encontra-se no Apêndice B.

Surgiram outras indagações a respeito do comportamento do sinal de saída do protótipo em função da temperatura. Uma delas foi com relação à variação da tensão de realimentação. Porém, esta apresentou-se constante durante os ensaios, conforme pode ser observado na Figura 55.

Figura 55 - Tensão de realimentação do protótipo.

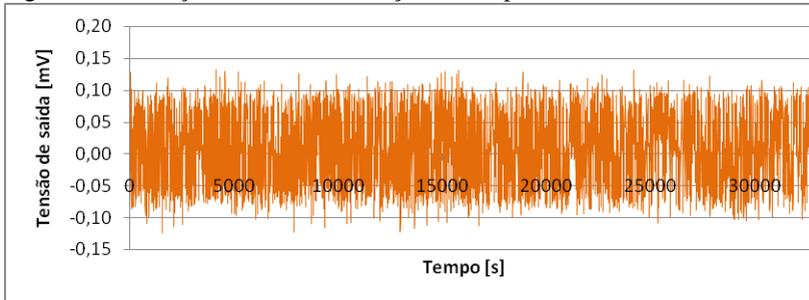


Fonte: Autor.

Outra explicação que poderia ser dada para tal comportamento é com relação ao efeito termoelétrico devido à diferença de temperatura entre os terminais de saída da ponte de Wheatstone. Para verificação desse efeito, a fonte de alimentação foi desconectada e os terminais de

alimentação do transdutor foram conectados. O protótipo foi então colocado na estufa e sua temperatura foi variada de 20 °C a 150 °C, seguido de resfriamento até 20 °C. A tensão existente nos terminais de saída do transdutor foi medida e está apresentada na Figura 56. O teste foi por duas vezes repetido.

Figura 56 - Variação da tensão em função do tempo.



Fonte: Autor

O valor teórico do efeito termoelétrico em ligas de karma, material com o qual a roseta é fabricada, em relação ao Cobre, é de 2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (FERNANDES, 2001). Nota-se na Figura 56 que não houve uma variação significativa do sinal da tensão do protótipo ao se variar a temperatura, sendo impossível determinar o valor da tensão termoelétrica devido ao ruído da medição. Sendo assim, o efeito termoelétrico é considerado desprezível e sua variação não pode ser considerada como causa do comportamento apresentado pelo transdutor.

5.4. DISCUSSÕES DOS ENSAIOS

Diversos ensaios foram realizados com os protótipos fabricados. Primeiramente, um dos protótipos foi sujeito a sucessivos carregamentos e descarregamentos e mostrou ter boa repetibilidade entre os ciclos, apresentando um desvio máximo de 0,1 bar, assim como um baixo erro de linearidade.

Adicionalmente, o protótipo foi sujeito a variações de pressão e temperatura, apresentando comportamento linear em todas as temperaturas, com baixo erro de linearidade. Porém, o comportamento em função da temperatura chamou atenção e outros ensaios foram realizados.

Quatro diferentes configurações foram testadas: primeiro, com o protótipo aberto; segundo, com o protótipo aberto e isolamento com manta cerâmica; terceiro, com o protótipo fechado; e quarto, com o protótipo fechado e confinado no sistema para aplicação de pressão. Todos os resultados apresentaram o mesmo comportamento e boa repetibilidade. Porém, diferenças entre a etapa de aquecimento e resfriamento foram encontradas.

Essas diferenças podem ser explicadas pelo aquecimento desigual entre cada um dos terminais da roseta causando um desequilíbrio no sinal de saída da ponte. Além disso, um estudo sobre a dilatação térmica do protótipo foi realizada e verificou não ter influência sobre o sinal de saída do protótipo. Outro estudo foi com relação ao efeito termelétrico, que também mostrou ser desprezível.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Um trabalho anterior a este analisou possíveis tecnologias para desenvolvimento de um transdutor adequado e apontou como mais promissora a utilização de extensômetros resistivos metálicos. Chegou a um protótipo promissor, que necessitou e recebeu neste trabalho, melhorias do projeto mecânico, tais como vedação e redução de interferência de sinais no transdutor em função da deformação da placa-válvula.

O presente trabalho apresentou duas alternativas para vedação, principalmente na saída dos fios, que é o ponto mais crítico. A primeira considerou o uso de filmes de PEEK, o qual apresenta boas características mecânicas, alta resistência ao desgaste e a característica mais importante de ser um filme muito flexível. Porém, algumas limitações tornam o filme inviável para a aplicação, tais como a rebarba ao redor do corpo do transdutor, que dificultaria a instalação na placa-válvula; o processo de laminação para soldagem dos filmes no metal, que requer temperaturas acima do ponto de fusão do estanho usado na brasagem dos terminais do extensômetro, o que pode ser prejudicial, sendo possível apenas a junção por meio de adesivo, conforme sugestão do fabricante. Nesse caso, foi utilizada a resina epóxi Treebond 2273.

Outra melhoria apresentada refere-se a modificações no projeto mecânico. As peças que fazem parte do protótipo de transdutor de pressão foram usinadas e algumas particularidades as diferenciam das peças anteriores. Primeiramente, um rebaixo foi feito na base para que a tampa pudesse ser encaixada na mesma, aumentando assim a área de contato entre ambas e, conseqüentemente, melhorando a vedação. Outra consideração importante faz-se com relação ao comprimento do protótipo, que passou a ocupar a maior área possível do rebaixo na placa-válvula.

Foi apresentado também um estudo sobre a influência da deformação da placa-válvula no sinal do transdutor de pressão. Apenas foi considerada a deformação em função da pressão aplicada no conjunto placa-válvula e transdutor e o quanto essa poderia afetar no mesmo. Primeiramente, fez-se uma simulação, considerando os componentes flexíveis e verificou-se que a deformação no transdutor foi de aproximadamente 480 $\mu\text{m/m}$. Posteriormente, foi realizada uma simulação considerando a placa-válvula com rigidez infinita a fim de verificar a diferença da deformação no transdutor entre a placa rígida e a

não rígida. Essa diferença foi de aproximadamente $50 \mu\text{m/m}$ o que poderia comprometer o desempenho do transdutor. Uma alternativa para amenizar esse efeito, foi deixar um espaço entre a placa-válvula e o transdutor. Outras simulações verificaram que a mínima distância entre eles foi de 0,30 mm. O preenchimento desse vão pode se dar com o uso de resina epóxi com o intuito de evitar o movimento relativo entre transdutor e placa, centralizar o transdutor em relação ao rebaixo.

A partir disso, protótipos de transdutores de pressão foram construídos e ensaios foram executados. Quando o protótipo foi submetido a diferentes pressões, a resposta foi linear, com boa repetibilidade e baixo erro de linearidade, mesmo em diferentes temperaturas.

Quando o protótipo foi analisado em função da temperatura a resposta do sinal chamou atenção e surgiu a necessidade de estudos mais aprofundados nessa área.

Alguns fatores devem ser levados em conta para a explicação do distanciamento das curvas de aquecimento e resfriamento do sensor. Primeiramente, essa diferença pode ser explicada pelo aquecimento desigual entre cada um dos extensômetros causando um desequilíbrio no sinal de saída da ponte. O efeito da tensão termelétrica entre terminais de saída da ponte de Wheatstone foi comprovadamente desprezível.

O efeito da influência dos fios de ligação após a realimentação é também desprezível, pois o monitoramento desta provou que a realimentação é mantida estável durante todo o período de ensaio.

Suspeitou-se também do efeito da dilatação térmica entre os diferentes materiais envolvidos. Um estudo foi realizado e mostrou que este também é desprezível.

Portanto, a explicação mais plausível para esse comportamento é de que cada um dos extensômetros aquece de forma desigual causando uma histerese térmica.

O transdutor apresentou baixo erro de linearidade e boa repetibilidade.

A deriva com temperatura, que apresentou comportamento diferente em ciclos de aquecimento e resfriamento forçados do transdutor, mostrou-se o grande desafio ainda a ser vencido.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o trabalho aqui relatado, não se chegou ainda a uma solução definitiva para o problema apresentado, que segue na perspectiva de

obtenção de uma solução definitiva e completa a partir de alguns esforços futuros.

Em relação a montagem de transdutores de pressão, muitos cuidados durante todas as etapas são exigidos (ver apêndice C). A maior dificuldade encontrada foi na etapa de brasagem dos terminais, que exige muita atenção e experiência do operador. Deve-se também tomar cuidado na junção da base com a tampa, processo que hoje usa a resina epóxi Treebond 2273. Essa resina necessita de temperatura e pressão específicas para a cura. Se aplicar muita pressão os fios podem ser esmagados e se aplicar pouca pressão a resina pode expandir-se e propiciar entrada de fluido no interior do protótipo. Sugere-se uma mudança no projeto mecânico, visando eliminar o uso dessa resina.

Em relação ao comportamento do sinal de saída do protótipo em função da temperatura, há a necessidade de novas investigações a fim de que este seja completamente entendido e, portanto poderá ser possível a aplicação de métodos de compensação de temperatura.

Ainda com relação ao sinal de saída do protótipo em função da temperatura, sugere-se medir individualmente a resistência de cada extensômetro da roseta em função da temperatura. Assim, terá conhecimento a respeito do aquecimento desigual de cada extensômetro.

Outra sugestão refere-se a uma análise de variação de temperatura, via elementos finitos, no bloco metálico usado nos ensaios aqui apresentados. Este tem como finalidade a verificação da homogeneidade da temperatura no bloco que poderia influenciar no sinal de saída do protótipo se o mesmo tiver aquecimento desigual.

Segundo informações obtidas de Weege (2009), a temperatura mais elevada no interior da câmara de compressão pode chegar a 140 °C. Foi verificado que, a maior sensibilidade do sinal do protótipo estava em temperaturas mais baixas, enquanto que a sensibilidade é menor a altas temperaturas. Portanto, sugere-se testar o transdutor de pressão em estudo instalado na placa-válvula do compressor.

REFERÊNCIAS

- ANSYS 13.0 Documentação Online, 2010.
Disponível em:
<http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/wb2_help.pdf> Acesso em: 10 dezembro 2012.
- AGILENT. Agilent 34401A Multimeter. 2007. Datasheet.
Disponível em: <<http://cp-literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0162EN.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2012.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª edição, 2003.
- BALLMANN, E. **Aprimoramento de processo de medição de deslocamentos de válvulas em compressores de refrigeração**. 2010. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 2010.
- BIMETAL, Indústria e Comércio de Aparelhos de Medição LTDA. **Aparelho de testes para instrumentos de medição. Informação de produto**. Disponível em:
<http://www.logismarket.ind.br/ip/bimetal-ind-e-com-aparelhos-de-medicao-aparelho-de-testes-para-instrumentos-de-pressao-informacao-de-produto-ip-001-ac-692476.pdf>
Acesso em: 11 novembro 2010.
- BRASCOLA LTDA. **Silicone brascoved alta temperatura**. Detalhes do produto. Disponível em:
<<http://www.brascola.com.br/produtos/silicone-bved-alta-temperatura>>
Acesso em: 26 agosto 2011.
- BRUYKER, D.; et al. **Thermostatic control for temperature compensation of a silicon pressure sensor**. Elsevier – Sensors and Actuators, 2000.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ed. LTC, São Paulo, 2002.

CAO, L. et al. **Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS strain sensors**. Sensors and Actuators, 2000.

ÇENGEL, Y. A.; et al. **Termodinâmica**. 5. ed. [S.l.]: Mc Graw-Hill, 2006.

CORAUCCI, G. O.; et al. **A Study of the Geometrical Correction Factor and the Membrane Thickness on the Sensitivity of the Transversal Piezoresistive Pressure Sensor**. Journal Integrated Circuits and Systems, 2010.

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1990.

DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1980.

EUROTHERM LTDA. **2216e Temperature controllers**. Installation and operation handbook, 2007. Disponível em:
<<http://www.controlshop.co.uk/PDF%20Manuals%20pages/Manuals/2216e%20Installation%20and%20Operation%20Handbook.pdf>>
Acesso em: 14 outubro 2011.

FENG, Z.; et al. **Design and Analysis of a Self-validating Pressure Transducer**. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2009.

FIGLIOLA, S.; et al. **Theory and design for mechanical measurements**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

GAO, R.; et al. **Micromachined microsensors for manufacturing**. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2004.

GAKKESTAD, J.; et al. **Effects of process variations in a CMOS circuit for temperature compensation of piezoresistive pressure sensors**. Elsevier – Sensors and Actuators, 1994.

HASENKAMP, W. et al. **Polyimide/SU-8 catheter-tip MEMS gauge pressure sensor**. Springer: Biomed Microdevices, 2012.

HO, J. **The design and fabrication of a micro-thermal/pressure-sensor for medical electro-skin application.** Solid-State Electronics, 2002.

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. P3M - Bedienungsanleitung. [S.l.]. Absolutdruckaufnehmer mit DMS-Messsystem.

Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/pressure/p3mb-p3mbp/>> Acesso em: 12 maio 2012.

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. MGCplus - AB22A/AB32 -**Operating Manual** [S.l.], 2002. B0534-24.0 en.

Disponível em: < www.hbm.com.pl/pdf/b0534.pdf>

Acesso em: 10 abril 2011.

LEE, B.; et al. **Calibration and temperature compensation of silicon pressure sensors using ion-implanted trimming resistors.** Elsevier, Sensors and Actuators, 1999.

LI, B. et al. **The Effect of Diaphragm on Performance of MEMS Pressure Sensor Packaging.** International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2010.

LIM, C.; et al. **Flexible membrane pressure sensor.** Elsevier. Sensors and Actuators, 2005.

MELVAS, P.; et al.. **A Diode-Based Two-Wire Solution for Temperature-Compensated Piezoresistive Pressure Sensors.** IEEE Transactions on Electron Devices, 2003.

MEYER-BAESE U. **Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays.** 2.ed; Springer, 2006

MOHAMMADI, A. R. et al. **Development of a combined piezoresistive pressure and temperature sensor using a chemical protective coating for Kraft pulp digester process monitoring.** Journal of micromechanics and microengineering, 2011.

MURARI, A. et al. **Comparison of new PEEKs seals with traditional helicoflex for ultra high vacuum applications.** Elsevier. Vacuum, 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Introdução à tecnologia FPGA.**

Disponível em:

<<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/12406>>. Acesso em: 03 set. 2012.

ORHAN, M. H. et al. **Experimental strain analysis of the high pressure strain gage pressure transducer and verification by using a finite element method.** Institute of Physics Publishing, 2001.

PEDRONI, V. A. **Digital Electronics and Design with VHDL;** Elsevier Science, 2007.

PENTEADO, P. M., **Desenvolvimento de uma bancada de ensaio de fadiga por impacto em válvulas de compressores de refrigeração.** 2009. 153 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 2009.

POUSSIER, S.; et al. **Adaptable thermal compensation system for strain gage sensors based on programmable chip.** Elsevier – Sensors and Actuators, 2004.

SANTANA, F. A. **Estudo do processamento de compósitos termoplásticos a partir de pré-impregnados peek/fibra de carbono por moldagem por compressão a quente.** 2010. 107 f. Dissertação (mestrado). Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica. 2010.

SHOMBURG, W. K. et al. **The Design of Metal Strain Gauge on Diaphragms.** IOP Publishing J. Micromech Microeng, 2004.

STOECKER, W.; et al. **Refrigeração industrial.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

TREEBOND DO BRASIL. **ThreeBond 2273D Thixotropic Single Component Epoxy Resin High Temperature Cure.** Disponível em:

<<http://www.techsilonline.com/getattachment/f0415fb2-d1b3-401e-a715-dc22c0508134/TB-2273D-Tech-Data.aspx>>. Acesso em: 12 Janeiro 2011.

VAN VLACK, L. H. **Princípio de ciência dos materiais**. Edgar Blucher, 1984.

VICTREX PASSION INNOVATION PERFORMANCE. **Achieve lightweight, durable, eco-friendly application designs at a lower cost**. Disponível em:

<<http://www.victrex.com/en/products/aptivfilms/properties/properties.php>>. Acesso em: 12 março 2011.

VICTREX PASSION INNOVATION PERFORMANCE. **Desempenho na eletroeletrônica**. Revista Composites & Plásticos de Engenharia, 2009.

VICTREX PASSION INNOVATION PERFORMANCE. **Surface treatment & adhesion of APTIV™ film**. Surface Treatment Adhesion Guide. Disponível em: <http://victrex.com/docs/literature-docs/Victrex_APTIV%20Surface%20Treatment_Adhesion_Guide_short_FEB12.pdf> Acesso em: 25 maio 2011.

VICTREX PASSION INNOVATION PERFORMANCE. **Heat Sealing, Welding & Laminating APTIV™ Film**. Materials Properties Guide, 2009.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Design considerations for diaphragm pressure transducers**. 2007a. Tech Note. TN-510-1. Disponível em: <<http://www.vishaymg.co.uk/tn/tn510.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2010.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature**. 2007b. Tech Note. TN-504-1. Disponível em: <http://www.intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-504.pdf>. Acesso em: 24 maio 2010.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Strain gage selection: criteria, procedures, recommendations**. 2007c. Tech Note. TN-505-4. Disponível em: <http://www.intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-505.pdf>. Acesso em: 24 maio 2010.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Surface preparation for strain gage bonding**. 2007d. Application Note. B-129-8. Disponível em:

<<http://www.bse.vt.edu/kumar/Instrumentation/Straingauge/Strain%20Gauge%20Surface%20Preparation.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2010.

VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. **Strain gage soldering techniques**. 2007e. Application Note. TT-609. Disponível em:

<http://www.intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TT-609.pdf>. Acesso em: 24 maio 2010.

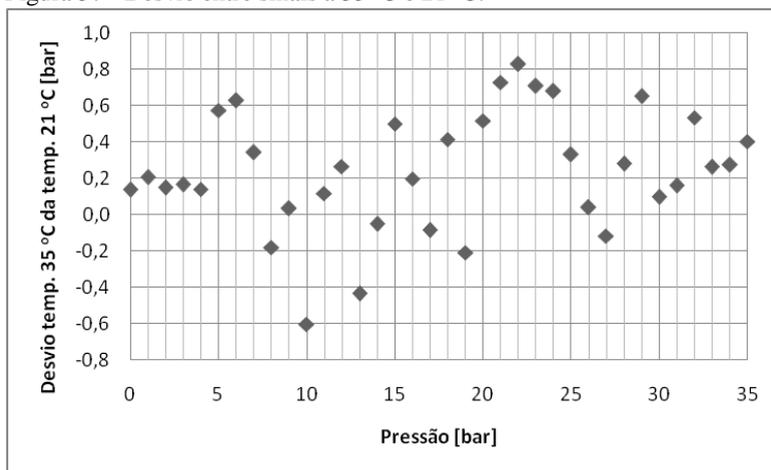
WANG, Q.; et al. **Fabrication and temperature coefficient compensation technology of low cost high temperature pressure sensor**. Elsevier – Sensors and Actuators, 2005.

WEEGE, T. A., **Avaliação de tecnologias aplicáveis à medição de pressão em pequenos volumes em compressores de refrigeração**. 2009. 120 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 2009.

APÊNDICE A - DESVIOS E ERRO DE LINEARIDADE DAS DEMAIS TEMPERATURAS

Neste apêndice tem-se a continuação das análises das diferenças entre os sinais a 35 °C, 45 °C, 55 °C, 65 °C, 75 °C, 95 °C, 105 °C, 115 °C, 125 °C, 135 °C e 145 °C quando comparadas com a temperatura ambiente para carregamentos e descarregamentos.

Figura 57 - Desvio entre sinais a 35 °C e 21 °C.



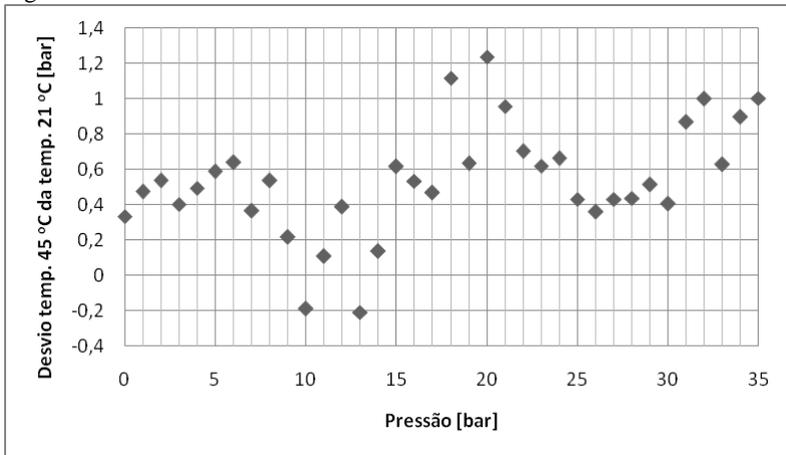
Fonte: Autor.

Tabela 6 - Erro de linearidade a 35 °C.

Temperatura 35 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,037	0,164	0,061
4,914	5,190	-0,069
9,803	10,147	-0,118
15,083	15,474	-0,145
20,313	20,719	-0,139
25,277	25,612	-0,048
30,288	30,596	-0,002
35,009	35,253	0,080

Fonte: Autor.

Figura 58 - Desvio entre sinais a 45 °C e 21 °C.



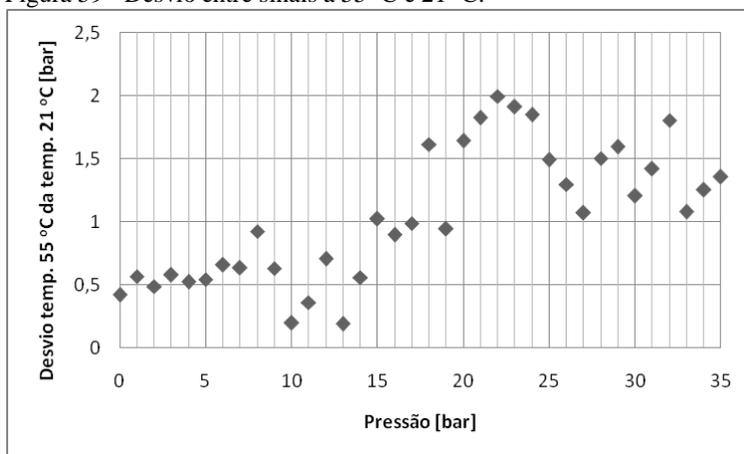
Fonte: Autor.

Tabela 7 - Erro de linearidade a 45 °C.

Temperatura 45 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,005	0,361	0,082
5,052	5,635	-0,086
9,851	10,561	-0,157
14,814	15,590	-0,165
20,659	21,438	-0,099
24,906	25,713	-0,078
30,041	30,904	-0,074
35,073	35,854	0,067

Fonte: Autor.

Figura 59 - Desvio entre sinais a 55 °C e 21 °C.



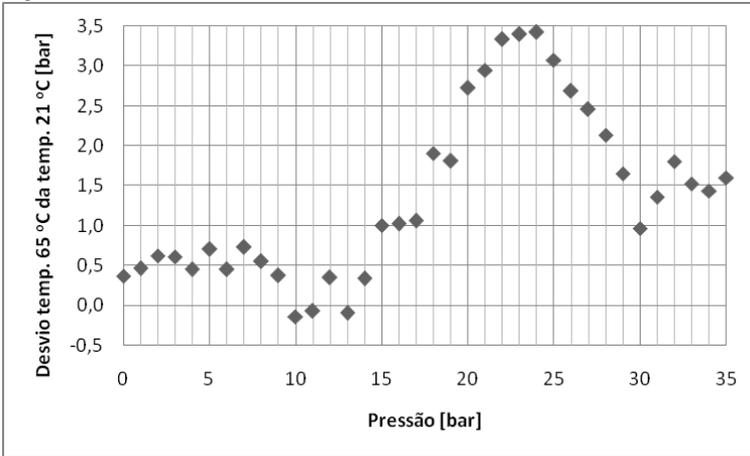
Fonte: Autor.

Tabela 8 - Erro de linearidade a 55 °C.

Temperatura 55 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
-0,003	0,449	0,073
4,889	5,590	-0,082
10,076	10,947	-0,153
15,016	15,997	-0,168
20,775	21,843	-0,145
24,922	26,003	-0,079
30,559	31,709	-0,040
35,081	36,209	0,068

Fonte: Autor.

Figura 60 - Desvio entre sinais a 65 °C e 21 °C.



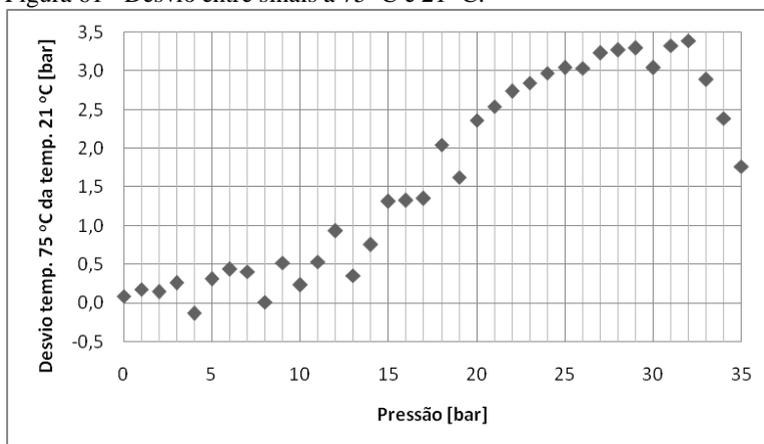
Fonte: Autor.

Tabela 9 - Erro de linearidade a 65 °C.

Temperatura 65 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
-0,029	0,396	0,052
5,021	5,748	-0,104
10,502	11,451	-0,166
14,865	15,975	-0,201
20,301	21,569	-0,202
25,295	26,613	-0,106
30,139	31,465	0,027
35,072	36,453	0,115

Fonte: Autor.

Figura 61 - Desvio entre sinais a 75 °C e 21 °C.



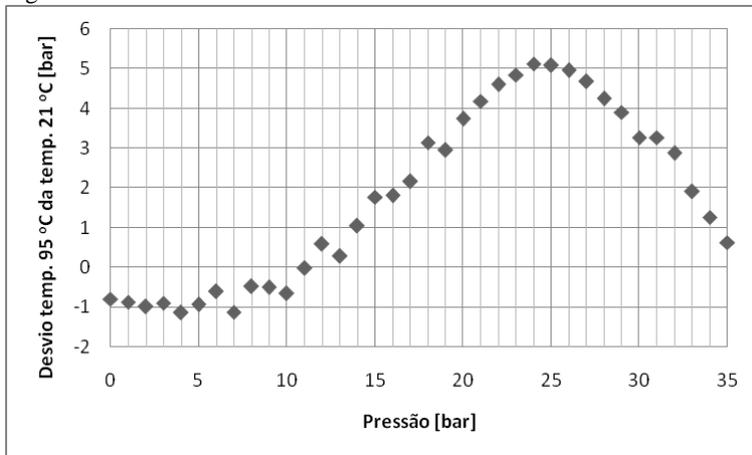
Fonte: Autor.

Tabela 10 - Erro de linearidade a 75 °C.

Temperatura 75 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
-0,002	0,117	0,048
4,939	5,357	-0,052
10,168	10,981	-0,239
15,238	16,291	-0,275
20,147	21,385	-0,264
25,728	27,126	-0,201
30,045	31,565	-0,150
35,086	36,615	0,042

Fonte: Autor.

Figura 62 - Desvio entre sinais a 95 °C e 21 °C.



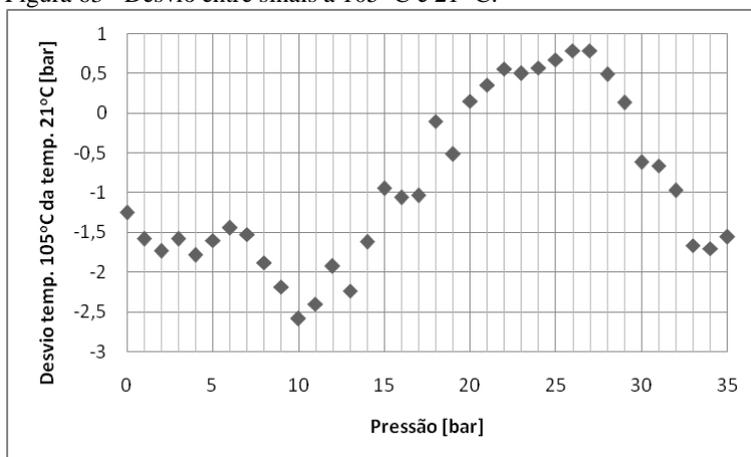
Fonte: Autor.

Tabela 11 - Erro de linearidade a 95 °C.

Temperatura 95 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,171	-0,766	0,008
5,355	4,659	0,006
10,334	10,096	-0,224
15,348	15,402	-0,285
20,839	21,176	-0,316
24,865	25,332	-0,261
30,642	31,255	-0,141
35,121	35,656	0,144

Fonte: Autor.

Figura 63 - Desvio entre sinais a 105 °C e 21 °C.



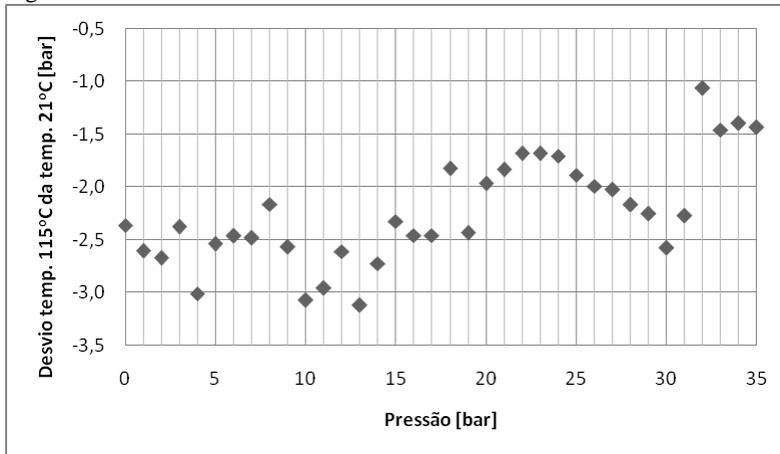
Fonte: Autor.

Tabela 12 - Erro de linearidade a 105 °C.

Temperatura 105 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,423	-1,223	0,112
4,876	3,441	0,016
10,146	9,120	-0,257
14,795	14,024	-0,390
19,863	19,239	-0,405
25,240	24,724	-0,374
30,453	29,886	-0,186
35,032	34,126	0,271

Fonte: Autor.

Figura 64 - Desvio entre sinais a 115 °C e 21 °C.



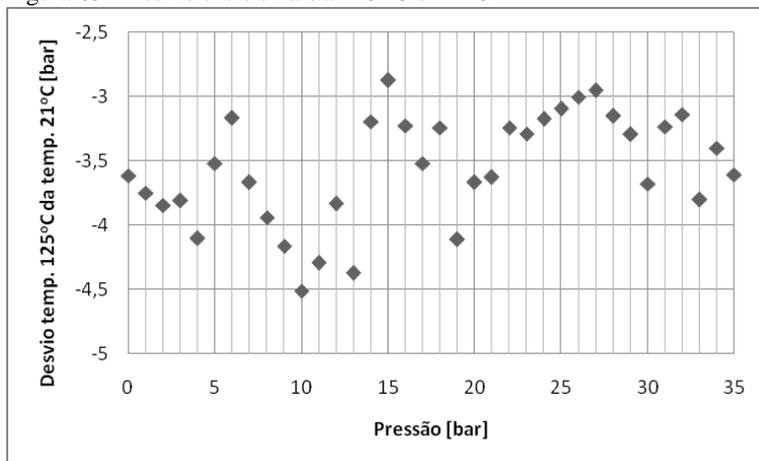
Fonte: Autor.

Tabela 13 - Erro de linearidade a 115 °C.

Temperatura 115 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,289	-2,337	0,042
4,935	2,503	-0,023
10,632	8,564	-0,227
15,703	13,826	-0,277
20,034	18,229	-0,226
25,079	23,391	-0,203
30,581	28,769	0,075
35,283	33,039	0,639

Fonte: Autor.

Figura 65 - Desvio entre sinais a 125 °C e 21 °C.



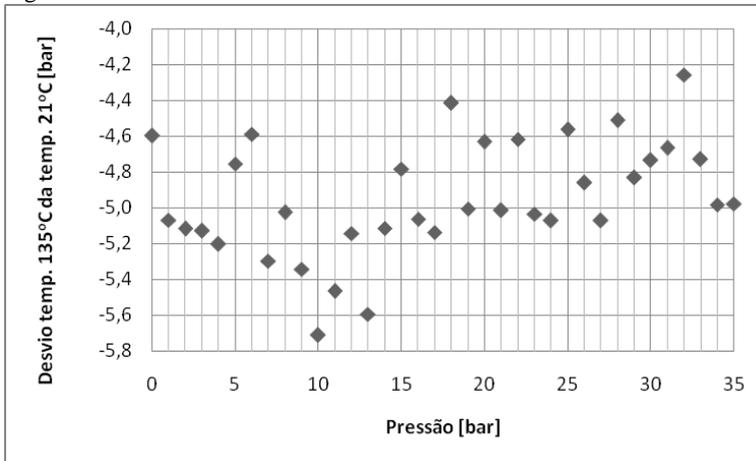
Fonte: Autor.

Tabela 14 - Erro de linearidade a 125 °C.

Temperatura 125 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,173	-3,592	0,089
5,126	1,522	-0,052
10,535	7,229	-0,329
15,314	12,095	-0,397
20,673	17,524	-0,445
25,256	22,184	-0,504
30,067	26,819	-0,309
35,035	31,297	0,201

Fonte: Autor.

Figura 66 - Desvio entre sinais a 135 °C e 21 °C.



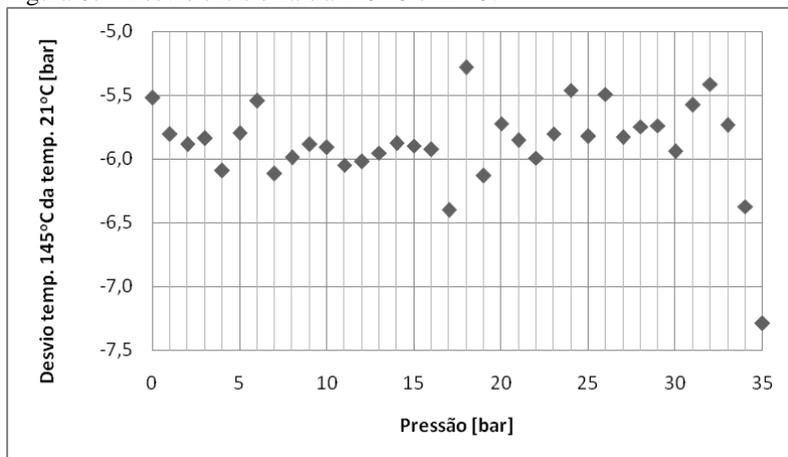
Fonte: Autor.

Tabela 15 - Erro de linearidade a 135 °C.

Temperatura 135 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,577	-4,572	0,144
5,241	0,290	-0,035
9,773	5,037	-0,232
14,848	10,189	-0,289
20,249	15,568	-0,244
25,247	20,718	-0,377
30,566	25,765	-0,083
35,012	29,872	0,273

Fonte: Autor.

Figura 67 - Desvio entre sinais a 145 °C e 21 °C.



Fonte: Autor.

Tabela 16 - Erro de linearidade a 145 °C.

Temperatura 145 °C		
Pressão [bar] Referência	Pressão [bar] Protótipo	Erro Linearidade [bar]
0,357	-5,494	0,011
5,056	-0,756	0,004
10,444	4,840	-0,166
15,233	9,694	-0,198
19,967	14,477	-0,213
24,999	19,459	-0,128
30,187	24,559	-0,004
33,290	27,559	0,120

Fonte: Autor.

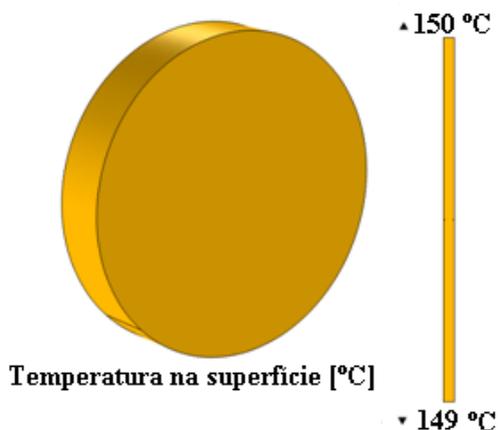
APÊNDICE B - ESTUDO DE DILATAÇÃO EM SÓLIDOS

A expansão térmica nos sólidos se produz pela assimetria das forças de ligação entre átomos. Como é necessária uma força menor para separar os átomos de um cristal do que para aproximá-los, a vibração térmica maior tende naturalmente a aumentar a distância média entre os átomos (VAN VLACK, 1984).

Quando um corpo sólido é aquecido ou resfriado, a distribuição interna de temperatura irá depender do seu tamanho e da sua forma, da condutividade térmica do material e da taxa de variação da temperatura. As tensões térmicas podem ser estabelecidas como resultado de gradientes de temperatura ao longo de um corpo, causados frequentemente por um rápido aquecimento ou resfriamento, onde a mudança de temperatura na parte exterior acontece mais rapidamente do que no interior; variações diferenciais das dimensões servem para restringir a livre expansão ou contração de elementos de volume adjacentes no interior da peça. Por exemplo, com o aquecimento, a parte exterior de uma amostra encontra-se mais quente e, portanto, terá se expandido em maior grau do que as regiões interiores. Dessa forma, são induzidas tensões superficiais de compressão, e estas são contrabalançadas por tensões internas de tração (CALLISTER, 2002).

Um estudo via elementos finitos mostra a tensão térmica no protótipo. Primeiramente foi analisada a tensão térmica de um corpo sólido simétrico conforme Figura 68.

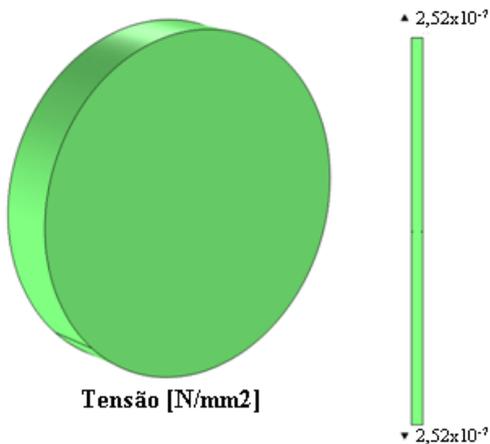
Figura 68 - Distribuição homogênea da temperatura.



Fonte: Autor.

Da mesma forma, a distribuição da tensão térmica mostra-se bem homogênea ao longo de todo o corpo conforme mostrado na Figura 69.

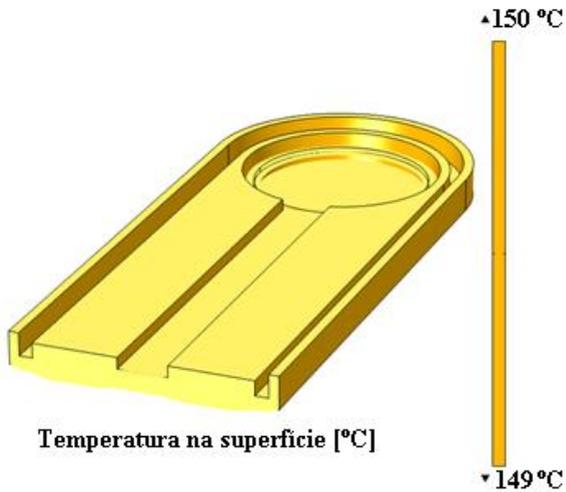
Figura 69 - Distribuição da tensão térmica em sólido simétrico.



Fonte: Autor.

Visto que em sólidos simétricos a tensão térmica distribui-se igualmente, partiu-se então para o entendimento do comportamento do sólido aqui definido como base para a colagem do extensômetro. Primeiramente pode-se observar a distribuição da temperatura na peça, onde se percebe a homogeneidade na Figura 70.

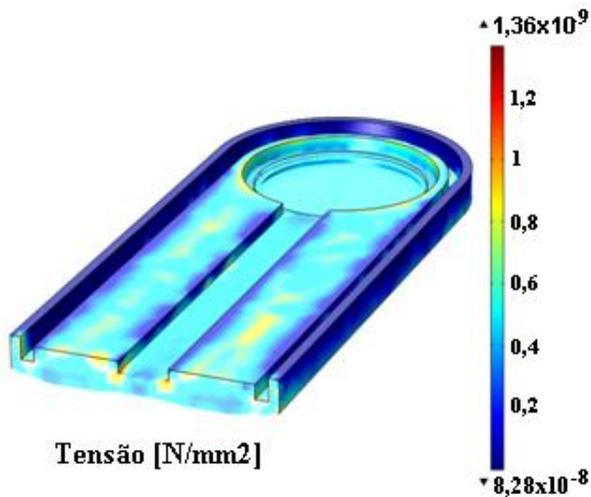
Figura 70 - Distribuição da temperatura no sólido estudado.



Fonte: Autor.

Da mesma forma que anteriormente, tem-se a distribuição da tensão térmica no sólido ilustrada na Figura 71.

Figura 71 - Distribuição da tensão térmica no sólido estudado.



Fonte: Autor.

Nota-se uma significativa diferença de comportamento quando a estrutura do sólido é modificada. Uma maior distribuição da tensão térmica pode ser visualizada e em alguns pontos chega a $0,8 \text{ N/m}^2$. Na região onde o extensômetro estará colado a tensão chega a $0,5 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$. Portanto, o efeito da deformação causada pela diferença de temperatura no sólido pode ser considerado desprezível. Entretanto, essas análises foram feitas em regime permanente, por isso não foram apontados problemas maiores.

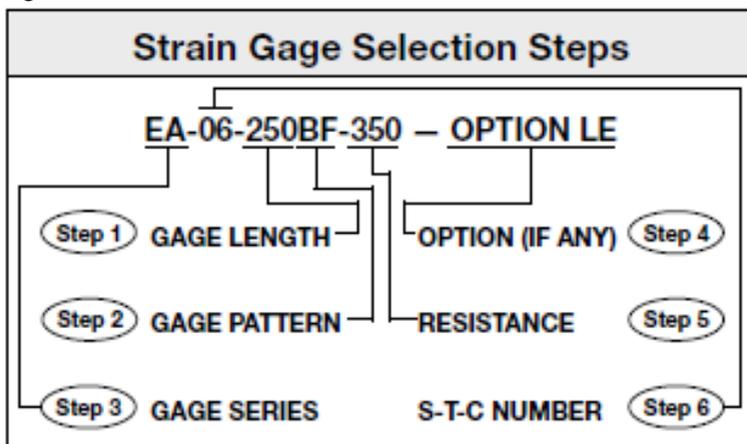
APÊNDICE C - MONTAGEM DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO EXTENSOMÉTRICO

Um transdutor de pressão consiste em um elemento elástico (diafragma), que pode ou não fazer parte do invólucro do transdutor, do elemento sensor, da fonte de alimentação e da ampliação do sinal e de um dispositivo para leitura do sinal medido (KUMAR, 2010).

Existem algumas considerações necessárias para a escolha do elemento sensor e a mesma forma para o projeto mecânico do invólucro do transdutor de pressão (VISHAY, 2007c). Além disso, uma rigorosa técnica para o procedimento de colagem do extensômetro no diafragma é exigida (WIKA, 2008; VISHAY, 2007d; KUMAR, 2010).

Para a seleção do extensômetro são necessários diversos parâmetros de acordo com a aplicação desejada, segundo mostrado na Figura 72,

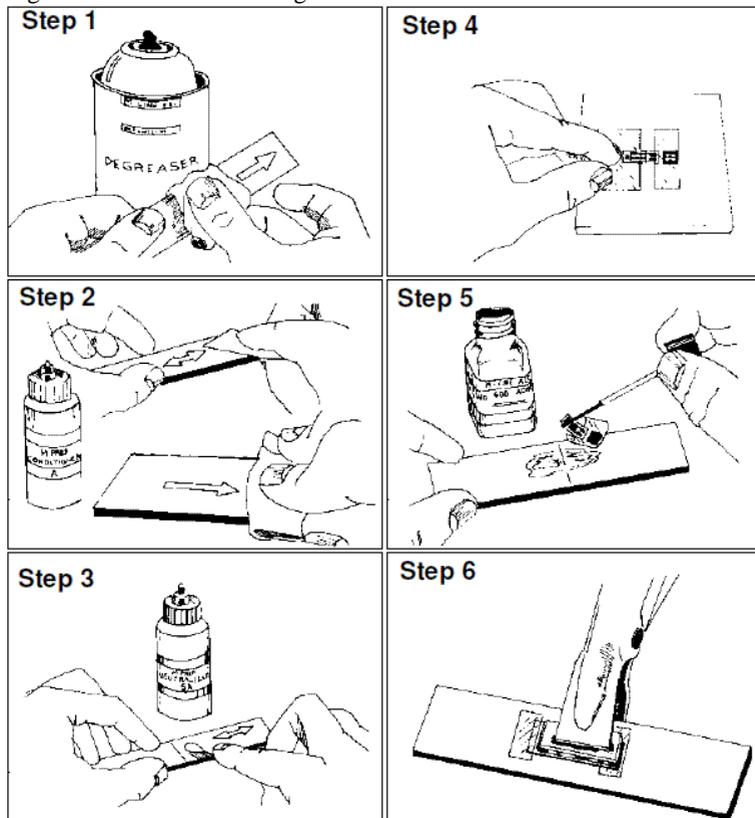
Figura 72 - Classe de extensômetros.



Fonte: VISHAY, 2007c.

No procedimento de colagem, primeiramente deve-se limpar a superfície de instalação do extensômetro conforme recomendações do fabricante, ilustrado na Figura 73.

Figura 73 - Processo de colagem de extensômetros.



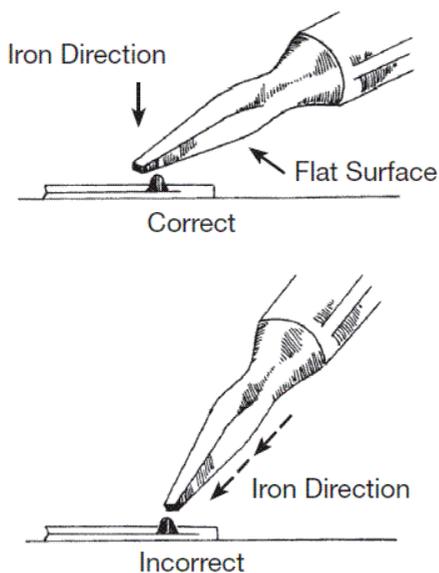
Fonte: VISHAY, 2007d.

Os passos 1, 2 e 3 são referentes à limpeza da superfície. Após o passo 1, deve-se ainda lixar a superfície para obter as ranhuras necessárias para uma maior adesão do extensômetro na peça. Após lixar a peça, deve-se prosseguir com os passos 2 e 3 onde são usados produtos especiais para a limpeza (VISHAY, 2007d; KUMAR, 2010).

Após, deve-se definir a posição do extensômetro na peça, passar a cola e aplicar pressão para a devida cura, conforme os passos 4, 5 e 6 da Figura 73, respectivamente.

Finalmente, tem-se a etapa de brasagem dos terminais do extensômetro. Note que existem cuidados que devem ser tomados com relação à posição do ferro de solda, conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 - Posição correta para a etapa de brasagem dos fios.



Fonte: VISHAY, 2007e.

Ao final da brasagem dos fios, o transdutor de pressão está pronto para ser testado. Deve-se agora ter uma fonte de alimentação e um amplificador de sinal (KUMAR, 2010).