UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE Ti-Ni PARA DETECÇÃO DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS POR DERRAMAMENTO DE GASOLINA

Tese Submetida à Universidade Federal de Pernambuco para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica,

ELSON MIRANDA SILVA

RECIFE, 2010

S586d **Silva, Elson Miranda**.

Desenvolvimento de sensor de TI-NI para detecção de contaminação de águas por derramamento de gasolina / Elson Miranda Silva. - Recife: O Autor, 2010.

xiii, 167 folhas; il., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.

Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sensor de contaminantes de água. 3. Efeito memória de forma. I. Título.

621 CDD (22. ed.) UFPE/BCTG/2010-189

"DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TI-NI PARA DETECÇÃO DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS POR DERRAMAMENTO DE GASOLINA".

ELSON MIRANDA SILVA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
VICE-COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)

Prof. Dr. OSCAR OLIMPIO DE ARAUJO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA (UFPE)

Prof. Dr. FERNANDO JORGE SANTOS DE OLIVEIRA (PETROBRÁS)

A Deus.
Por todas as coisas.

AGRADECIMENTOS

- A Deus. Pela preparação de todas as coisas.
- Ao professor e amigo Severino Leopoldino Urtiga Filho, pela orientação, incentivo e dedicação.
- Ao professor Cezar Gonzalez por ter-me aceitado no seu grupo seleto de pesquisadores, ter cedido seu laboratório e equipamentos para a realização dos experimentos e viabilizar a obtenção de amostras.
- À minha esposa Miriam, sem palavras.
- Aos meus pequeninos filhos: Samuel, Ester e Gabriel, pelo amor e paciência.
- A todos os professores do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPE.
- A Eliane Alves, secretária da PPGEM, pelo constante incentivo.
- Ao meu amigo do curso, Carlos Augusto, pela imensurável colaboração que prestou durante todo o desenvolvimento dos trabalhos. Igualmente a Orlando Rocha e Euclides Pina.
- Ao amigo Jadeilson Santana Bezerra, engenheiro eletrônico, mestrando em engenharia mecânica, pela grande contribuição que prestou no desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos.
- Ao IFPE - Instituto Federal de Educação de Pernambuco, Campus Ipojuca, por ceder as instalações do Laboratório de Análises Qualitativas para realizações de ensaios, em especial ao Professor e Amigo Paulo Ricardo da Silva.
- Ao PPGEM, pela oportunidade.
- A CAPES/PROF/UFPE, pela bolsa parcial.
- A Termopernambuco/Aneel e CTPetro/FINEP, pelo apoio financeiro.

“... Na verdade que sou mais bruto do que ninguém...
Quem subiu ao céu e desceu? Quem encerrou os ventos nos seus punhos? Quem amarrou as águas na sua roupa? Quem estabeleceu todas as extremidades da terra? Qual é o seu nome e qual é o nome de seu filho, se é que o sabes? (Pv. 30:2-4).

RESUMO

A contaminação de águas subterrâneas por gasolina é um problema nos centros urbanos do País. A gasolina, além de comprometer a qualidade do solo, pode alcançar os aquíferos subterrâneos, contaminando a água. Há riscos de ingestão de água contaminada pela população que faz uso de poços artesianos como fonte de abastecimento. Os constituintes da gasolina são substâncias consideradas cancerígenas, por poderem prejudicar o sistema nervoso central causando leucemia. Os tanques metálicos utilizados nos postos de combustíveis são uma das principais fontes desse tipo de contaminação. O tempo de vida útil desses equipamentos é de aproximadamente 25 anos. A partir da década de 70 houve um aumento vertiginoso do número de postos no País. Os tanques instalados naquela época que não foram substituídos podem apresentar problemas de vazamentos. Por outro lado, o número de poços artesianos clandestinos agrava a situação. Histórico de doenças causadas pela ingestão de gasolina e denúncias de irregularidades na perfuração de poços em várias metrópoles brasileiras levou o ministério público a solicitar estudos para se avaliar o nível e as causas de contaminação dessas fontes. Os resultados são alarmantes e as causas principais dos vazamentos estão relacionadas a tanques com problemas de corrosão. As técnicas utilizadas para neutralizar os efeitos da contaminação não impedem o uso acidental da água contaminada. Uma vez que vários anos são necessários para que os padrões de qualidade originais sejam recuperados, e o acesso da população aos pontos afetados é de difícil controle. Os órgãos de proteção ambiental tentam minimizar o problema penalizando os proprietários dos postos através da aplicação de multas. Como ação preventiva, a coleta d'água periódica em pontos críticos, seguida de análise laboratorial, tem sido praticada. Porém, o tempo demandado de resposta das análises representa uma limitação da técnica. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema detector de contaminação da água por gasolina, cujo elemento principal é um sensor, na forma de mola helicoidal, confeccionado de uma liga de Ti-Ni, cujo uso permite a detecção imediata da contaminação. No sensor é explorada, principalmente, a propriedade da variação da resistividade elétrica com a deformação mecânica, apresentada pelas ligas com memória de forma; utiliza os recursos dos microcontroladores para o monitoramento e envio de sinais à distância além das propriedades físicas e mecânicas dos materiais poliméricos para uso como elemento de disparo do sensor. Um protótipo foi desenvolvido e testado. A adição de 10 ml de gasolina num tubo de 100 mm de diâmetro foi capaz de disparar o sensor em aproximadamente 5s. Concentrações maiores são capazes de disparar o sensor em menos de 2s. Esses resultados comprovaram a eficiência do sensor no monitoramento da contaminação.

Palavras-chave: Sensor, Memória de Forma, Contaminação, Águas, Gasolina.

ABSTRACT

The contamination of groundwater by gasoline is a problem in urban centers in Brazil. The gasoline can reach the underground aquifers, contaminating the water in addition to compromising the quality of soil. There are risks of drinking contaminated water by the population that makes use of wells as a source of supply. The constituents of gasoline are considered carcinogenic; they are depressing the central nervous system and can cause leukemia. Metal tanks used in gas stations are a major source of such contamination. The lifetime of this equipment is approximately 25 years. From the 70's there was a steep increase in the number of gas stations in the country. The tanks installed at the time that were not replaced can present problems of leakage. Moreover, the number of illegal wells exacerbates the situation. History of disease caused by ingestion of gasoline and accusations of irregularities in the drilling of wells in several Brazilian cities led prosecutors to request studies to assess the level and causes of contamination of these sources. The results are alarming and the main causes of the leaks are related to tanks with corrosion problems. The techniques used to counteract the effects of contamination not prevent the accidental use of contaminated water since several years are needed to recover the quality standards and the access affected points by population is difficult to control. The environmental protection agencies try to minimize the problem penalizing the owners of the stations through the application of fines. As a preventive action, the periodic collection of water at critical points, followed by laboratory analysis has been practiced. However, the time required response analysis represents a limitation of the technique. This paper presents the development of a system detection of water contamination by gasoline, whose central feature is a sensor in the form of coil spring, made of an alloy of Ti-Ni, whose use allows the immediate detection of contamination. In the sensor is used, mainly, the shape memory alloys property to vary its electrical resistivity with the mechanical deformation; uses the resources of microcontrollers to monitor and transmit signals at a distance; beyond the physical and mechanical properties of polymeric materials. A prototype was developed and tested. The addition of 10 ml of gasoline into a tube with 100 mm of diameter was able to trigger the sensor at about 5s. Higher concentrations are able to trigger the sensor in less than 2s. These results showed the efficiency of the sensor for monitoring the contamination.

Keywords: Sensor, Shape Memory, Contamination, Water, Gasoline.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Sistema comum de bombeamento em poços artesianos de pouca profundidade.	28
Figura 2.1	- Distorção de Bain. Uma rede CFC é transformada numa CCC. (a) Célula TCC é mostrada na estrutura CFC; (b) Célula CCC; (c) Célula CCC após a transformação.	35
Figura 2.2	- Variação da resistividade elétrica versus deformação em regime superelástico.	36
Figura 2.3	- Variação da resistividade elétrica de uma liga LMF com a temperatura.	36
Figura 2.4	- Curva típica da transformação de fase de uma LMF.	37
Figura 2.5	- Dependência entre a temperatura e a energia química livre da fase austenítica e martensítica, e suas relações na transformação martensítica.	38
Figura 2.6	- Curvas tensão-deformação de um cristal com memória de forma Cu-34,7 Zn-3,0 Sn (% peso). Ms = - 52° C, Mf = - 65°C, As = - 50° C, Af = - 38°C.	40
Figura 2.7	- Esquema da superelasticidade nas ligas com memória de forma: a) Representação da superelasticidade em uma barra; b) Esquema tensão versus deformação para a superelasticidade.	41
Figura 2.8	- Esquema do ensaio de medição de ddp e condutores elétricos: o método dos quatro pontos.	43
Figura 2.9	- Microcontrolador em encapsulamento DIP.	44
Figura 2.10	- Microcontrolador em encapsulamento QFP.	45
Figura 2.11	- Arquitetura básica de programação de microcontroladores.	45
Figura 2.12	- Pinagem do microcontrolador PIC16F628A.	46
Figura 2.13	- Tipos de transistores, notação e símbolos utilizados para Configuração de base comum: (a) e (c) pnp; (b) e (d) npn.	48
Figura 2.14	- Fonte de corrente utilizando uma configuração simples com transistor.	50
Figura 2.15	- Configuração do espelho de corrente com transistor NPN.	52
Figura 2.16	- Configuração do espelho de corrente com transistor PNP.	52
Figura 2.17	- Diagrama de blocos mostrando os estágios de uma fonte de tensão	53
Figura 2.18	- Estrutura coloidal dos asfaltenos.	57
Figura 3.1	- Esquema mostrando o princípio de geração do sinal elétrico no sensor: (a) Mola distendida;(b) Mola no estado natural de repouso.	62
Figura 3.2	- Circuito elétrico equivalente do sistema de alimentação do sensor:(a) Mola de LMF em repouso (material com resistividade ρ1); b) Mola de LMF distendida (material com resistividade ρ2> ρ1).	64
Figura 3.3	- Princípio de funcionamento do sistema de monitoramento e envio de sinais à distancia.	66

Figura 3.4	- Fluxograma do sistema de monitoramento.	68
Figura 4.1	- Equipamento de medição da ddp nos terminais internos da mola.	74
Figura 4.2	- Esquema de disposição dos terminais internos de medição de ddp na mola. (a) Com 01 espira entre os terminais; (b) Com 02 espiras entre os terminais; (c) Com 04 espiras entre os terminais.	74
Figura 4.3	- Esquema de conformação termomecânica das molas.	76
Figura 4.4	- Diagrama de blocos do funcionamento geral do sistema.	84
Figura 4.5	- PIC 16F877A da Microchip.	85
Figura 4.6	- Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.	86
Figura 4.7	- Diagrama do processo de condicionamento de sinais com ruídos. O diagrama mostra que o uso dos amplificadores de instrumentação elimina o ruído na amplificação.	87
Figura 4.8	- Diagrama elétrico do sistema de monitoramento de sinais.	88
Figura 4.9	- Diagrama de blocos detalhado do circuito geral do dispositivo de monitoramento.	89
Figura 4.10	- Circuito do espelho de corrente elétrica utilizado no dispositivo de monitoramento.	90
Figura 4.11	- Aspecto geral da placa eletrônico do sensor.	93
Figura 4.12	- Aspecto final do protótipo.	94
Figura 4.13	- Equipamento utilizado para definição da constante elástica da mola de Ti-Ni, comprimento nominal de 30 mm.	95
Figura 4.14	- Equipamento utilizado para definição da curva força versus deformação do dispositivo de distensão da mola.	96
Figura 5.1	- Gráfico da tensão elétrica na mola de Ti-Ni, em três configurações diferentes dos terminais de medição. Corrente de ensaio de 0,5A.	98
Figura 5.2	- Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni tratada termicamente (aquecida a 450°C por 10 minutos, resfriada a 25°C).	102
Figura 5.3	- Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni tratada termicamente (aquecida a 550°C por 10 minutos, resfriada a 25°C).	103
Figura 5.4	- Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni que não sofreu tratamento térmico.	104
Figura 5.5	- Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão, com a deformação em várias temperaturas diferentes numa mola de Ti-Ni de 15 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro.	106
Figura 5.6	- Gráfico dos valores médios de tensão versus deformação na mola de Ti-Ni, 15 mm de comprimento.	107
Figura 5.7	- Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão, gerada numa mola de Ti-Ni, de 100 mm de comprimento, ao ser distendida.	110
Figura 5.8	- Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou	112

	tensão elétrica, gerada numa mola de Ti-Ni, de 80 mm de comprimento, ao ser distendida.	
Figura 5.9	- Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão elétrica, gerada numa mola de Ti-Ni, de 50 mm de comprimento, ao ser distendida.	113
Figura 5.10	- Gráfico da variação da ddp versus deformação de uma mola de Ti-Ni, 100 mm de comprimento, ao ser comprimida; destacando a queda brusca do valor de DDP quando a mola é comprimida de 2/3 do seu comprimento total, contrariando os dados teóricos que prevêem um aumento da resistividade com a deformação.	115
Figura 5.11	- Gráfico do resultado geral dos ensaios de medição de ddp (máxima e mínima) nas molas de 15, 50, 80 e 100 mm de comprimento quando distendidas.	118
Figura 5.12	- Gráfico do comportamento da variação da ddp gerada numa mola de Ti-Ni, de 30 mm de comprimento, ao ser distendida.	121
Figura 5.13	- Gráfico da variação da resistência elétrica na mola, de 30 mm de comprimento, com medição feita com 4 espiras entre os terminais internos.	121
Figura 5.14	- Curva “Força versus Deslocamento” da mola de Ti-Ni, 30 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro.	123
Figura 5.15	- Curva “Força versus Deslocamento” do dispositivo de distensão.	123
Figura 5.16	- Sistema de forças simplificado. Mm é momento de Fm (força da mola de Ti-Ni) em relação a A; Mg - momento de Fg (força do dispositivo); L é distância do ponto de aplicação das forças ao ponto A.	125
Figura 5.17	- Área do bloco polimérico sujeita a ação da força elástica da mola comprimida (A =πD2/4).	130
Figura 5.18	- Curva “Força versus Deslocamento” da mola de Ti-Ni, 100 mm de comprimento.	131
Figura A.1	- Gráfico do tempo de disparo do sensor com a concentração de gasolina na água num tubo de 100 mm de diâmetro. Em destaque dois pontos importantes: a) Concentração mínima de disparo do sensor; b) Concentração de disparo em 5s.	163
Figura A.2	- Gráfico do tempo de disparo do sensor com a concentração de gasolina na água num tubo de 150 ml. Em destaque dois pontos importantes: (a) Concentração mínima de disparo do sensor; (b) Concentração de disparo em 5s.	165
Figura A.3	- Gráfico do tempo de disparo do sensor com a concentração de gasolina na água num tubo de 200 ml. Em destaque dois pontos importantes: (a) Concentração mínima de disparo do sensor; (b) Concentração de disparo em 5s.	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	- Requisitos gerais do sistema de monitoramento.	61
Tabela 4.1	- Características técnicas do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 30/45, LWART – PROASFAR QUÍMICA.	79
Tabela 4.2	Tabela 4.2 - Principais características do Material Polimérico.	82
Tabela 4.3	- Características gerais da gasolina comum. BR-DISTRIBUIDORA.	82
Tabela 4.4	- Características específicas da gasolina comum, produto cod. 01.000.078- BR DISTRIBUIDORA S/A.	83
Tabela 4.5	- Resolução na conversão digital de 8 bits.	92
Tabela 5.1	- Medição da tensão feita na mola de 15 mm em três configurações diferentes com a corrente de 0,5 A.	98
Tabela 5.2	- Medição de ddp, ou tensão elétrica, feita na mola imersa em banho de silicone, nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40º C.	106
Tabela 5.3	– Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, numa mola de 20 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo distendida.	110
Tabela 5.4	- Medição feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de diâmetro, sendo distendidas.	112
Tabela 5.5	- Medição feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, em molas de 50 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, sendo distendidas.	113
Tabela 5.6	– Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, numa mola de 100 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, durante a compressão.	115
Tabela 5.7	– Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,50A, numa mola de 10 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, sendo distendida.	120
Tabela 5.8	- Valores médios da resistência elétrica na mola de 30 mm de comprimento, com 4 espiras entre os terminais.	121
Tabela 5.9	– Tempo de diluição do bloco de CAP em tubos de diâmetros diferentes, com uma lâmina d'água de 30 mm de altura, em volumes fixos de gasolina adicionada à água.	135
Tabela 5.10	– Análise do desempenho do sensor segundo a adição de volumes de gasolina capaz de disparar o sensor em situações definidas.	141
Tabela 5.11	– Valores calculados da área transversal dos tubos de 100,	143

150 e 200 mm de diâmetro.

Tabela 5.12 – Comportamento do tempo de disparo do sensor com o aumento da área de espalhamento da gasolina (a partir de um mesmo volume de gasolina presente na água). 143

Tabela A.1 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 100 mm de diâmetro. 162

Tabela A.2 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 150 mm de diâmetro. 164

Tabela A.3 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 200 mm de diâmetro. 166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS EM INGLÊS

EPA	Environment Protection Agency
NAPL	Non-aquous Phase Liquids
PAHA's	Policlinic aromatic hidrocarbons
SVE	Soil vapor extraction
Nitinol	Níquel Titânio Naval Ordenance Laboratory
DSC	Differential scanning calorimetry
SMA	Shape memory alloy
CCS	Courrent continuos suplly
DIP	Dual in-line package
SMD	Surface-mount technology
QFP	Quad flat package
SFR	Special Function Register
BJT	Bipolar junction transistor
PIC	Programable interface controller
PVC	Polivinil chloride
PC	Computer personal
GPS	Global positioning system
LCD	Liquid crystal display
LED	Ligth-emiting diode
LSB	Least Significant bit
LVDT	linear variation dislocation transducer

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO 17
1.1 Introdução Geral 17
1.2 O Problema da Contaminação de Águas por Derramamento de Gasolina 19
1.3 A Contaminação por Combustíveis – Danos à Saúde 22
1.4 Limitações dos Processos de Remediação 23
1.5 O Problema do Uso Indiscriminado dos Poços Artesianos 24
1.6 Sistema de bombeamento de Poços Artesianos. 27
1.7 Características Gerais do Dispositivo Proposto 28
1.8 Objetivo do Trabalho. 30
1.8.1 Objetivo Geral 30
1.8.2 Objetivos Específicos 30
1.9 Escopo do Trabalho 31

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. 32
2.1 Introdução Geral 32
2.2 Ligas com Memória de Forma - LMF 32
2.2.1 Introdução 32
2.2.2 Transformação Martensítica 33
2.2.3 Temperaturas críticas de Transformação 35
2.2.4 Termoelasticidade 37
2.2.5 Mecanismo do Efeito Memória de Forma 38
2.2.6 Comportamento Superelástico 39
2.3 Molas Helicoidais 40
2.4 Método Dos 4 Pontos Para Medição Da Resistividade Elétrica Em Fios Condutores 42
2.5 Calorimetria Diferencial De Varredura (DSC) 43
2.6 Microcontroladores 44
2.6.1 Características dos Microcontroladores 44
2.6.2 Comunicação serial entre o PC e o microcontrolador 45
2.6.3 Microcontrolador PIC 45
2.6.4 Dispositivos de Comunicação Externa do PIC 46
2.7 Transistores 47
2.7.1 Características gerais 47
2.7.2 Influencia Da Temperatura Nas Características Do Transistor 49
2.7.3 Relação Beta (β) em transistores 49
2.8 Fonte de Corrente Constante (CCS) 50
2.9 Espelhos de Corrente 51
2.10 Amplificadores 51
2.10.1 Características Gerais 51
2.10.2 Amplificadores de Potência com TBJ 52
2.11 Fontes de Tensão 53
2.12 Polímeros 54
2.13 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 55
2.13.1 Introdução 55
2.13.2 Características Gerais do CAP 56
2.13.3 Classificação dos Ligantes Asfálticos 57
2.13.4 Aplicação 58
2.14 Considerações Complementares 58

CAPÍTULO 3 - CONCEPÇÃO DO SENSOR E DO SISTEMA DE MONITORAMENTO 60
3.1 Introdução Geral 60
3.2 Princípios de Funcionamento do Sensor 60
3.2.1 Introdução 60
3.2.2 Concepção do dispositivo de Geração do Sinal Elétrico 61
3.2.3 Concepção do dispositivo de Geração da Deformação Mecânica 64
3.3 Concepção do dispositivo de Monitoramento 64
3.4 Princípio de Funcionamento do Protótipo 68
3.5 Considerações Complementares 69

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 71
4.1 Introdução 71
4.2 Ensaios de Medição de DDP e DSC 72
4.2.1 Método de Medição de ddp em Mola de 15mm 73
4.2.2 Método de Medição de ddp em Molas superiores a 15 mm de comprimento 75
4.2.3 Método de Obtenção das Molas de Ti-Ni 75
4.3 Ensaios para Determinação do Melhor Polímero a ser Utilizado como Gatilho de Disparo do Dispositivo de Distensão da Mola 77
4.3.1 Ensaios de Diluição do CAP 77
4.3.2 Separação das Principais Frações do Ligante: Maltenos e Asfaltenos 79
4.3.3 Ensaios de Diluição do Material Polimérico 81
4.4 Testes no Protótipo 83
4.4.1 Método de Testes da Parte Eletrônica de Aquisição e Processamento de Dados 83
4.4.2 Método de Desenvolvimento do Hardware do Sistema 85
4.4.3 Método de Desenvolvimento do Software do Sistema 91
4.4.4 Método do Teste de Funcionamento do Protótipo 92
4.5 Método de Análise do Desempenho Mecânico do Sensor 94
4.6 Considerações Complementares 96

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 97
5.1 Introdução Geral 97
5.2 Ensaios de Medição de ddp na Mola de 15 mm em Temperatura Ambiente 97
5.3 Ensaios de DSC 100
5.4 Ensaios de Medição de ddp na Mola de 15 mm sob Condições Controladas 105
5.5 Ensaios de Medição de ddp numa Mola 100 mm de Comprimento e 20 mm de diâmetro 108
5.6 Medição de ddp nas Molas de 80 e 50 mm de Comprimento, com 20 mm de diâmetro 111
5.7 Medição de ddp na Mola de 100 mm de Comprimento, Durante a compressão 113
5.8 Resultado Geral das Molas 116
5.9 Determinação dos Requisitos da Mola de Ti-Ni e da Garra 117
5.10 Medição de ddp, ou Tensão Elétrica, na Mola de 30 mm de 120

Comprimento
5.11 Análises de Desempenho Mecânico do Sensor 122
5.11.1 Análise das Constantes Elásticas das Molas 122
5.11.2 Análise do Balanço de Forças entre o Dispositivo de Distensão e a Mola de Ti-Ni 124
5.11.3 Análise do Esforço Mecânico Exercido pelo Dispositivo sobre o Bloco Polimérico 128
5.12 Verificação dos Esforços Mecânicos com a Mola de Ti-Ni Encapsulada no Polímero 130
5.13 Ensaios para Determinação do Melhor Material do Gatilho do Dispositivo de Distensão da Mola 134
5.14 Ensaios de Diluição do CAP 135
5.14.1 Estudos Complementares 136
5.14.2 Separação das Principais Frações do Ligante: Maltenos e Asfaltenos 136
5.15 Ensaio de Diluição do Material Polimérico 139
5.15.1 Estimativa do Tempo de Disparo do Sensor X Concentração de Gasolina 140
5.15.2 Verificação do Comportamento do Sensor com o Aumento do Volume D'água 141
5.15.3 Análise do Comportamento do Sensor com o Aumento da Área de Contato com a Gasolina 142
5.15.4 Análise do Comportamento do Sensor em Água Salgada 144
5.16 Resultados dos Testes no Protótipo 145
5.16.1 Testes no Hardware e Software 145
4.16.2 Testes Finais no Protótipo 147

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS 150

CAPÍTULO 7 - RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES 153

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 154

ANEXOS 162

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução Geral

A contaminação da água dos poços artesianos, consequência de derramamentos de combustíveis no solo, em centros urbanos brasileiros, é um problema ambiental e social uma vez que atinge, além do meio ambiente, vários segmentos da sociedade. A população é diretamente atingida pelos efeitos maléficos à saúde pela contaminação. Os órgãos públicos são pressionados por providências de controle. As empresas de distribuição e venda de derivados de petróleo, ligadas diretamente ao problema, sofrem prejuízos financeiros por penalizações legais, desperdício de produto e desgaste da imagem junto ao público.

O uso de poços artesianos como fontes de abastecimento d'água é bastante comum nas grandes cidades. O elevado número de poços clandestinos, no entanto, representa uma preocupação, já que esses poços não possuem qualquer registro nos órgãos de controle ambiental, além disso, operam sem qualquer controle ou monitoramento da qualidade da água. Como consequência, os usuários são expostos diretamente aos riscos de contaminação.

O histórico de doenças, provocadas pela ingestão de água contaminada por gasolina, despertou as autoridades competentes para a gravidade do assunto. Estudos foram demandados para se avaliar o nível e as causas do problema. A contaminação de poços artesianos provocada por vazamentos em postos de gasolina foram apontados como uma das principais causas.

As consequências para saúde humana devido a solos contaminados foram reconhecidas desde os finais dos anos 70, quando começaram a surgir legislações específicas na maior parte dos países desenvolvidos. Desde então, e especialmente nos últimos 15 anos, desenvolveu-se uma gama de tecnologias voltadas ao controle

de contaminações por diferentes componentes químicos, apropriadas para vários tipos de solo e em diferentes profundidades [1]. O desenvolvimento desses projetos exige profundos conhecimentos multidisciplinares, uma vez que requer o conhecimento de diferentes áreas científicas e tecnológicas.

As limitações das técnicas de controle, por parte dos órgãos responsáveis, justificam esforços no sentido de se buscar meios alternativos para a solução ou minimização do problema.

As universidades e institutos de pesquisas, dentro desse cenário, podem exercer um papel fundamental na busca de alternativas para solução do problema. Nesses centros, dispositivos e métodos podem ser pesquisados, desenvolvidos e testados; produtos inovadores também podem ser concebidos e disponibilizados. Desse modo, é possível haver o incremento de maior segurança nas operações de manuseio e armazenamento de produtos derivados de petróleo; na proteção do meio ambiente e na preservação da saúde de pessoas.

Nesse propósito é que um sistema de monitoramento da presença de gasolina em poços artesianos foi desenvolvido. O principal intuito desse projeto foi assegurar a preservação da saúde da população.

O sistema de detecção de contaminação de águas por gasolina, apresentado neste trabalho, apresenta-se como uma alternativa para o controle desse tipo de contaminação.

O sistema foi desenvolvido para ser aplicado no monitoramento de poços artesianos, podendo ser adequado para outras aplicações.

Os estudos realizados apontaram a viabilidade técnica do uso do sistema, que demonstrou eficiência e rapidez na detecção e sinalização da contaminação por gasolina. Para o seu desenvolvimento, tiveram que ser considerados os seguintes temas principais:

- O problema da contaminação de águas por derramamento de gasolina;

- Os danos à saúde relacionados à contaminação por combustíveis;

- A limitação dos processos de remediação de áreas contaminadas;

- O problema do uso indiscriminado dos poços artesianos;

- As características dos sistemas de bombeamento em poços artesianos;

- As propriedades elétricas, físicas e mecânicas das ligas com memória de forma e dos polímeros termoplásticos;

- Os recursos dos dispositivos eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis elétricas.

Este capítulo introdutório apresenta uma síntese dos principais tópicos abordados e dá uma visão geral de como os temas estão distribuídos ao longo do texto. Por fim, especifica os objetivos gerais do trabalho.

1.2 O Problema da Contaminação de Águas por Derramamento de Gasolina

Os tanques metálicos, utilizados nos postos de combustíveis, têm sido apontados como a causa principal da contaminação de águas subterrâneas. Isso tem despertado a preocupação por parte dos órgãos de proteção ambiental e saúde humana. Esses tanques são enterrados no solo e utilizados para o armazenamento de combustíveis. Por isso sempre representam um risco de vazamento.

A preocupação com esses tipos de instalações é mais antiga nos Estados Unidos e Europa [2], onde as indústrias de petróleo lidam diariamente com problemas decorrentes de vazamentos. Os derrames e acidentes durante a exploração, refino, transporte e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados são bastante comuns [3]. Episódios de contaminação, envolvendo hidrocarbonetos de petróleo, são relatados com bastante frequência. Nos Estados Unidos, por exemplo, estima-se que 35% dos tanques de armazenamento

subterrâneo de gasolina e diesel apresentam problemas de vazamento, o que irremediavelmente resulta na contaminação de solos e águas subterrâneas [4].

Os equipamentos subterrâneos sempre representam uma maior complexidade. Os métodos adotados, pela indústria do petróleo, no monitoramento de vazamentos de hidrocarbonetos nos dutos de transporte, por exemplo, não são eficientes para detectar vazamentos precoces e de baixa vazão, pois são baseados na queda de pressão. Além disso, os dutos são instalados enterrados e, normalmente, cobertos com grande diversidade de vegetação. Assim, a perda de produtos, graves contaminações de solos e aquíferos podem ocorrer ao longo de meses e anos sem serem detectados [5]. Esse mesmo tipo de dificuldade de monitoramento é observado nos tanques. Para se ter uma noção da magnitude do problema, a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA) previu em 1995 a existência de mais de 1,5 milhão de tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina nos Estados Unidos. Naquele ano, houve o registro de mais de 1.000 vazamentos, por semana, em todo o território norte-americano [6].

No Brasil, havia aproximadamente 27.000 postos de gasolina no ano de 1995 [7]. A maioria deles foi construída na década de 70 com a utilização de tanques fabricados em chapa metálica e enterrados no solo. O contato direto com o solo e a umidade aceleram o processo de corrosão desses tanques, além da ação dos próprios combustíveis que, por si só, são corrosivos. Nessas condições, esses equipamentos apresentam um tempo de vida útil de aproximadamente 25 anos. A maioria desses tanques ainda não foi substituída, portanto, operam além do tempo de vida útil estimado. Por isso, em muitos postos, vêm sendo detectados problemas de vazamento com contaminação do solo e água devido aos problemas nesses equipamentos.

Em 2007, a quantidade de postos de gasolina [8] alcançou o número

aproximado de 35 mil, com um consumo de álcool, gasolina e diesel de 9, 24 e 41 milhões de m3, respectivamente [9]. Esses números apontam para um crescimento vertiginoso da quantidade de novos postos instalados no país. Isso representa um aumento na probabilidade de ocorrência de vazamentos.

Esse tipo de contaminação torna-se mais grave nos grandes centros urbanos, onde se verifica uma maior concentração de postos de abastecimento. É crescente o número da ocorrência de acidentes nessas regiões. De acordo com o órgão de controle ambiental paulista, os postos respondem por 63% das áreas contaminadas em São Paulo [2]. Em Joinville (SC), a prefeitura local realizou estudos com 65 postos da cidade e constatou que somente um não apresentou problema de contaminação do lençol freático [10]. O Jornal do Comércio de Pernambuco divulgou matéria em abril de 2009, mostrando que 80% dos poços artesianos de 20 localidades do Recife, Olinda e Jaboatão dos Guararapes estão contaminados por gasolina [11]. As causas principais de contaminação estão relacionadas ao vazamento em tanques com problemas de corrosão.

O problema é preocupante porque atinge diretamente a população de baixa renda concentrada nas periferias dos grandes centros urbanos, onde é bastante comum o uso de poços artesianos de pouca profundidade para abastecimento. Os poços analisados no Recife estão a até 20 metros de profundidade e têm vazão de cinco metros cúbicos por dia [11]. São exatamente nesses tipos de poços onde é mais fácil encontrar gasolina, uma vez que o combustível tende a se concentrar nas camadas de água mais superficiais nos lençóis freáticos. O combustível é menos denso que a água e, por isso, aparece como sobrenadante nesses poços.

Outro problema ambiental e de saúde pública são os poços clandestinos perfurados sem nenhum controle por parte das autoridades. O número é crescente, porque esses poços são facilmente construídos a um custo bastante reduzido. Desse

modo, concorrem para o agravamento da situação, e representam um elevado risco tanto para a saúde da população.

Os dados mostram que o problema de contaminação de águas subterrâneas por gasolina é um problema de preocupação global; e que, no Brasil, está geograficamente distribuído em todas as regiões do País.

1.3 A Contaminação por Combustíveis – Danos à Saúde

A principal preocupação em um derramamento de gasolina são os efeitos da toxidade dos seus componentes. Por ser pouco solúvel em água, a gasolina derramada, inicialmente se apresenta no subsolo como líquido de fase não aquosa (NAPL) [3]. Em contato com a água subterrânea, a gasolina se dissolve parcialmente. Os hidrocarbonetos mono aromáticos: benzeno, tolueno e xilenos, chamados BTEX, são os componentes presentes na gasolina possuem maior solubilidade em água e, portanto, são os primeiros contaminantes a atingir o lençol freático. Estes compostos são considerados substâncias perigosas por prejudicarem o sistema nervoso central [3]. O benzeno é comprovadamente carcinogênico podendo causar leucemia [2]. Admite-se que os BTEXs representem mais do que 50% da fração de hidrocarbonetos solúveis da gasolina [4,12]. Essas características, junto com a reduzida adsorção em matrizes de solo, favorecem a mobilização desses compostos nos sítios contaminados [13].

Outro agravante do problema é a adição de álcool à gasolina, que é permitida no Brasil. A gasolina pode ser aditivada com cerca de 30% de etanol para facilitar sua octanagem. No entanto, o álcool facilita, por efeito cossolvente, a mobilização dos hidrocarbonetos no solo. Esse fato confere à gasolina misturada com o álcool um potencial poluente consideravelmente elevado.

As interações entre o etanol e BTEX além de aumentar a mobilidade e a

solubilidade dos compostos no solo, dificultam a sua biodegradação natural. A contaminação de águas subterrâneas por gasolina com elevado teor de álcool tem sido apontada como um problema ambiental emergente [13].

Os efeitos dos contaminantes, presentes em outros derivados de petróleo, necessitam ser igualmente avaliados. Os compostos oriundos de diesel e óleos lubrificantes possuem cadeias mais longas, o que contribui para menor mobilidade e solubilidade em água, quando comparados à gasolina. Mas isso não os torna menos perigosos. Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH´s), presentes no diesel e óleo lubrificante, também são considerados potencialmente carcinogênicos.

Em função da elevada toxicidade de compostos como os BTEXs e da consequente diversidade dos efeitos deletérios provocados nos ecossistemas contaminados, a procura por sistemas de monitoramento e remediação apresenta-se extremamente relevante.

1.4 Limitações dos Processos de Remediação

Uma grande variedade de processos físico-químicos e biológicos tem sido aplicada no tratamento de águas contaminadas [14,15]. Os processos visam à remoção de hidrocarbonetos de petróleo no estado puro ou dissolvido na água subterrânea.

Os processos de atenuação natural têm sido bastante utilizados. Esses processos visam à remediação e o monitoramento adequadamente controlado, com o objetivo de redução das concentrações dos contaminantes, toxicidade, massa e ou volume até níveis adequados à proteção da saúde humana e ao meio ambiente. Essa técnica tem sido usada em áreas com vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo [16]. Processos como extração de vapores do solo (SVE), recuperação de produto livre, bioventilação, extração com solventes,

incineração, torres de aeração, adsorção em carvão ativado, biorreatores, biorremediação no local, entre outros, são bastante comuns. Esses processos são aplicados para remover contaminantes orgânicos de águas subterrâneas, controlar o movimento de plumas (contaminantes) e ou descontaminar solos [17]. No entanto longos períodos de tempo e altos custos estão normalmente associados com a grande maioria desses processos [17,18].

1.5 O Problema do Uso Indiscriminado dos Poços Artesianos

Retirar água doce do subsolo por meio de poços sempre foi uma alternativa usada pelo homem quando as fontes superficiais são inexistentes ou insuficientes. No entanto, a contaminação das águas subterrâneas por hidrocarbonetos tem sido uma crescente preocupação dos órgãos ambientais em todo o mundo [19].

A escassez e a poluição das águas superficiais têm tornado o custo de tratamento da água potável cada vez mais elevado. Esse fator tem sido o principal responsável pela crescente demanda do uso de água subterrânea como fonte alternativa de abastecimento de água para o consumo humano. As águas subterrâneas são naturalmente potáveis, dispensando, na maioria das vezes, qualquer tratamento prévio. Assim, o custo para implantação e manutenção de um sistema de captação dessas fontes é bem menor do que aqueles que envolvem a captação de águas superficiais.

No início, os poços eram simples escavações manuais de onde a água era retirada por meio de baldes e outros recipientes. Esses tipos de escavações ainda são bastante comuns em algumas localidades.

Atualmente, é possível perfurar poços de grandes profundidades, com o uso de avançadas técnicas de perfuração, de equipamentos e outros recursos de engenharia. Os sistemas de bombeamento, por sua vez, permitem a plena utilização

da capacidade do poço. Esses recursos, no entanto, à medida que facilitam as perfurações dos poços, acabam aumentando a probabilidade do uso de água contaminada, caso não sejam adotados meios eficientes de controle da qualidade desse líquido. Além disso, uma quantidade indiscriminada de poços perfurados pode representar extração maior do que a natureza é capaz de regenerar. Nesse caso, certamente, outros problemas ocorrerão.

O Brasil dispõe da maior reserva de água doce do planeta. Mas, infelizmente, a água e a população não se encontram uniformemente distribuídas. Em vários centros urbanos, principalmente em capitais, a escassez do fornecimento normal provocou o uso intensivo da captação por meio de poços e, com isso, também os problemas decorrentes. Mesmo em cidades onde o abastecimento convencional é satisfatório, ocorre a utilização disseminada de poços. Muitos condomínios, hotéis e outros estabelecimentos comerciais investem na perfuração e na manutenção por resultar num menor custo. É uma maneira de minimizar os gastos com o uso da água fornecida pelas companhias de águas e esgoto [20].

A poluição de aquíferos está entre as questões mais preocupantes no uso de poços em grandes cidades. A poluição por contaminantes químicos de origens diversas pode ocorrer nos lençóis subterrâneos. Vazamentos em postos de gasolina, esgotos domésticos não tratados, depósitos de lixo e de sucatas são fontes potenciais de poluentes perigosos como metais pesados oriundos de vários produtos químicos [11].

O uso da água subterrânea em diversos setores reforça sua importância e gera preocupações quanto a sua proteção e qualidade [21]. O controle de contaminantes do solo provenientes do lixo urbano, por exemplo, tem despertado preocupação. Somente em alguns centros urbanos, a destinação do lixo, para o aproveitamento dos resíduos sólidos, como fonte de energia alternativa renovável,

tem sido praticada, mas de maneira bastante limitada [22]. Nesse contexto, controlar a perfuração de poços e monitorar a qualidade das águas são medidas fundamentais para a prevenção do uso da água contaminada pela população.

Os poderes públicos tentam controlar a situação impondo restrições para novas perfurações. As escavações de maior profundidade, só podem ser executadas segundo registro e liberação nos órgãos de controle ambiental. Isso facilita o acompanhamento e monitoramento desses poços [20]. A maior parte, no entanto, são poços clandestinos de pequena profundidade; e, por isso, de difícil controle por parte do poder público [11].

Os poços de pequena profundidade são os mais susceptíveis à contaminação por gasolina já que a água não recebe nenhum tipo de monitoramento ou controle de uso. Nesse caso, os usuários ficam expostos aos riscos relacionados ao uso da água de má qualidade.

A dimensão do problema pode ser avaliada pelos dados publicados numa matéria do jornal “A Tarde”, que denunciou a gravidade da situação em todo o país. Informações, segundo a matéria, foram obtidas junto às secretarias estaduais e municipais sobre a situação dos poços em todas as capitais do Brasil [20]. Em Maceió (AL), por exemplo, apesar da lei, falta fiscalização. Estima-se que poços são usados por 80% da população. O registro de contaminação por poluentes industriais é comum. Em Fortaleza (CE), o poder público ainda está levantando a situação, mas não há controle sobre os 10.000 poços que se estima haver na cidade, e já houve registro de poluição em algumas áreas. No Rio de Janeiro (RJ), são estimados mais de 10.000 poços clandestinos, praticamente sem controle. Em Natal (RN), são estimados 2.000 a 3.000 poços clandestinos. Novos poços estão proibidos devido à contaminação por esgotos. Em Salvador (BA), são estimados mais de 1.000 poços clandestinos, com fiscalização precária. Em Goiânia (GO), o controle é insuficiente, e

boa parte dos poços é clandestina. Já houve contaminação causada por postos de gasolina. Em Aracaju (SE), há uma demanda intensa por poços devido à insuficiência do abastecimento normal. O poder público pouco consegue controlar, e a maioria dos poços é clandestina. Em São Paulo (SP), existe lei com bastantes restrições, mas a fiscalização é insuficiente, e há muitos poços clandestinos.

Todos esses aspectos exigem maiores cuidados referentes ao consumo de águas subterrâneas, uma vez que novas fontes de poluição podem surgir a qualquer momento e em qualquer lugar; de maneira que não pode haver garantia de uso seguro sem um permanente monitoramento da qualidade da água.

1.6 Sistema de Bombeamento de Poços Artesianos

Existem vários meios para bombeamento da água de poços. O mais simples usa apenas uma bomba centrífuga externa com a tubulação de sucção e respectiva válvula de pé no interior do poço. Esses poços usam tubos de PVC como revestimento; os mais comuns com diâmetros de 100, 150 e 200 mm. Esse sistema, cujo exemplo é mostrado na figura 1.1, é adequado para poços pouco profundos. Na prática, esses poços se situam na faixa de 7 a 8 metros de profundidade [11].

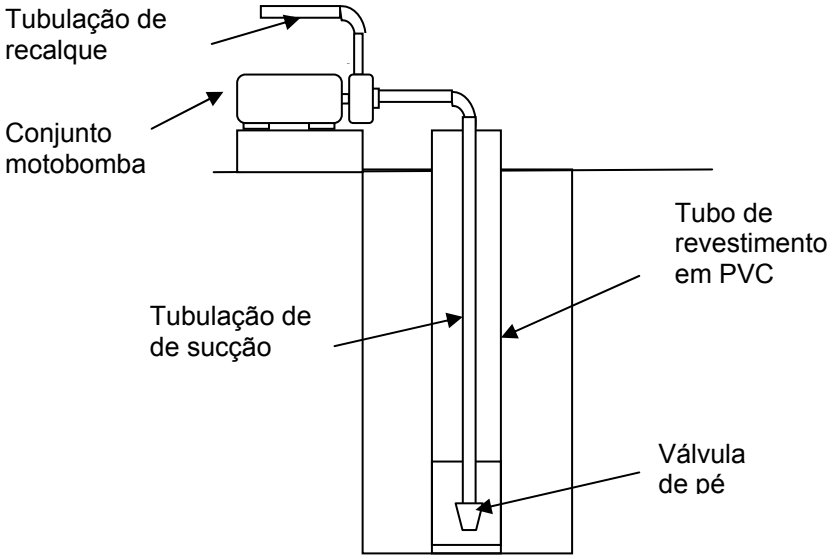


Figura 1.1. Sistema comum de bombeamento em poços artesianos de pouca profundidade.

1.7 Características Gerais do Sistema Proposto

O sistema apresentado nesse trabalho reúne várias características de materiais diferentes, formando um sistema inteligente de monitoramento da presença de gasolina em água. Esse sistema é composto de duas partes principais: um sensor, composto de uma mola helicoidal, constituída de uma liga diatômica de Ti-Ni, articulada dispositivo mecânico, cuja função principal é a medição do sinal de contaminação; e um dispositivo eletrônico de monitoramento e envio de sinais à distância. O projeto do sistema teve como base a exploração do comportamento superelástico e do efeito memória de forma da liga de Ti-Ni, quando sujeita a deformações mecânicas. Do monitoramento da variação da resistividade elétrica, do solo, como parâmetro de controle da contaminação por gasolina [23], surgiu a idéia de explorar a variação da resistividade elétrica em materiais para ser aplicada no desenvolvimento de um sensor. As ligas de Ti-Ni foram estudadas e escolhidas para esse fim, por encontrarem-se relacionadas entre os materiais conhecidos como "materiais inteligentes". Esse título é devido a esses materiais apresentarem o efeito

memória de forma, variando sua resistividade elétrica quando submetidos à variação de temperatura ou deformações mecânicas. Por possuírem, adicionalmente, a propriedade de recuperar sua resistividade elétrica quando cessadas as causas originais, esses materiais têm sido amplamente estudados e utilizados em projetos aeronáuticos, de robótica, mecânicos, de elétrica, de medicina e outros, para aplicações como sensores e atuadores inteligentes [24].

Foi então concebido um sensor usando uma mola de Ti-Ni, em repouso, articulada num dispositivo mecânico, mantida aberta por um pequeno bloco de material polimérico. Ao entrar em contato com gasolina, o polímero, por ser altamente solúvel em gasolina, se dissolve permitindo o fechamento do dispositivo.

O sensor foi projetado de modo que o bloco polimérico funcione como um refil do sensor. Ou seja, pode ser substituído sempre que ocorrer uma contaminação. Isso trouxe maior flexibilidade e praticidade no uso do sensor, que pode ser utilizado, repetidas vezes, para monitorar um mesmo ponto.

Um dispositivo eletrônico foi desenvolvido para fornecer uma corrente elétrica, que percorre continuamente a mola de Ti-Ni. Quando a mola é distendida ocorre-lhe uma variação da ddp. O uso do microcontrolador no projeto possibilita a leitura da ddp, o processamento do sinal segundo um algoritmo de programação e a transmissão da leitura à distância.

Todos os componentes utilizados são de dimensões reduzidas, o que permitiu confeccionar um protótipo, cujo tamanho final possibilita a instalação do sensor em poços.

Os experimentos necessários ao desenvolvimento do sistema foram realizados com o auxílio de uma máquina de ensaio de tração, sob carga constante, construída no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. A aplicação dessa máquina, auxiliada por um equipamento de

calorimetria diferencial de varredura (DSC), permitiu a obtenção das temperaturas críticas de transformação da liga de Ti-Ni adotada.

O comportamento da variação da resistividade elétrica da mola de Ti-Ni e o comportamento em diferentes temperaturas foram avaliados. Os estudos foram realizados para que fosse possível prever o comportamento do sistema, dentro da faixa de temperatura prevista para aplicação. Os valores e dados obtidos mostraram a viabilidade da construção de um sistema eficiente, compacto, de baixo consumo de energia, pequenas dimensões e baixo custo.

1.8 Objetivos do Trabalho

1.8.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema capaz de detectar a presença de gasolina na água de poços artesianos, enviando o sinal de contaminação à distância.

1.8.2 Objetivos Específicos

- Obtenção e utilização de molas helicoidais, de Ti-Ni, como elemento do sensor;
- Caracterização elétrica e termomecânica das molas obtidas;
- Desenvolvimento do projeto do dispositivo eletrônico de geração e monitoramento de sinais;
- Desenvolvimento do projeto mecânico do protótipo do sensor;
- Seleção e condicionamento do material para servir como gatilho de disparo do sensor.
- Testes dos componentes isolados e do conjunto integrado.

1.9 Escopo do Trabalho

Este trabalho está estruturado por capítulos seguindo a seguinte ordem:

- O capítulo 1 apresenta uma visão geral do problema da contaminação das águas por derramamento de gasolina e as características gerais do projeto do sistema;
- O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os vários temas envolvidos no trabalho; servindo como fundamentação teórica para a compreensão dos princípios de funcionamento dos elementos mecânicos e dispositivos eletrônicos utilizados no projeto;
- O capítulo 3 apresenta a concepção dos vários elementos do sistema;
- O capítulo 4 apresenta a descrição detalhada dos procedimentos experimentais aplicados nos testes dos dispositivos;
- O capítulo 5 apresenta uma discussão geral sobre todos os resultados experimentais obtidos. São apresentados os resultados de cada ensaio ou testes realizados e suas principais considerações;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões finais;
- O capítulo 7 apresenta as sugestões para estudos posteriores;
- O capítulo 8 apresenta as referências bibliográficas.
- Ao final, os anexos são listados.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução Geral

Os assuntos abordados neste capítulo formam a base teórica que fundamenta os princípios de funcionamento do sistema proposto. Servem também para compreensão do funcionamento de alguns dispositivos utilizados no projeto.

- O estudo do comportamento das ligas com memória de forma, em particular da liga Ti-Ni (ou Nitinol), serviu como base fundamental para entendimento do comportamento da variação da resistividade elétrica desses materiais, quando sofrem deformação mecânica. A partir desse entendimento, foi possível prever que essas ligas podiam ser utilizadas, adequadamente, como um elemento sensor;
- O estudo do método dos quatro pontos para medição de resistividade elétrica em condutores serviu como parâmetro para a concepção do princípio de funcionamento do sistema de geração da corrente elétrica e monitoramento da tensão;
- O estudo das características gerais dos microcontroladores e de outros componentes eletrônicos mostrou que esses dispositivos podem ser utilizados perfeitamente na composição de um sistema compacto de aquisição, processamento e envio à distância do sinal monitorado;
- O estudo das características do cimento asfáltico de petróleo (CAP) foi fundamental para obtenção do material polimérico para servir como gatilho de disparo do sensor.

A síntese dos principais assuntos abordados no projeto é apresentada a seguir.

2.2 Ligas com Memória de Forma

2.2.1 - Introdução

As ligas com memória de forma (LMF's ou SMA) encontram-se relacionadas

entre os materiais denominados “materiais inteligentes”. Esses materiais são bastante utilizados na fabricação de sensores e atuadores inteligentes por possuírem características particularmente interessantes para aplicações em processos de automação industrial e robótica. Esses dispositivos proporcionam ganhos significativos em termos de redução de custo e espaço, associados à simplicidade e precisão no envio e respostas de sinais.

As LMF’s possuem a propriedade de variar sua resistividade elétrica ao sofrerem deformação mecânica ou variação de temperatura, voltando ao estado original pela eliminação da tensão aplicada ou do efeito térmico. Por essa propriedade, essas ligas têm encontrado aplicações na construção de válvulas hidráulicas automáticas, mãos robotizadas, instrumentos médico-hospitalares, etc. [24,25,26,27,28].

Existe, atualmente, um número razoável de famílias de LMF’s; destacando-se as ligas à base de ferro, cobre e, principalmente, as ligas à base de Ti-Ni (titânio – níquel), bastante difundidas em aplicações nas áreas de robótica, aeronáutica e na indústria médica [29]. O efeito memória de forma da liga Ti-Ni foi descoberto em 1962, e a liga foi patenteada com o nome de Nitinol (Níquel-Titânio Naval Ordenance Laboratory), devido a sua descoberta ter ocorrido no laboratório da marinha dos Estados Unidos. Essa liga tornou-se a mais bem sucedida liga de efeito memória de forma, possuindo alta resistência mecânica, biocompatibilidade, boa resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica [29].

2.2.2 Transformação Martensítica

As LMF’s possuem a propriedade de recuperar sua forma inicial, após sofrerem deformação pseudo-plástica, por meio de aquecimento ou descarregamento da tensão aplicada. Durante o processo, o material passa por uma

transformação de fase na sua estrutura cristalina, normalmente denominada de transformação martensítica. Essa transformação ocorre em nível de plano atômico por meio de um movimento cooperativo dos átomos, sem que ocorra difusão atômica [30,31,32]. De modo geral, durante a transformação, a austenita de estrutura cúbica de face centrada (CFC) sofre uma transformação de fase e passa a apresentar uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) denominada martensita.

As teorias da cristalografia das transformações martensíticas têm sido formuladas a partir dos parâmetros cristalinos das estruturas da fase matriz e produto. A transformação de uma rede CFC em CCC pode ser vista na figura 2.1 e foi sugerida por Bain em 1924.

Durante a transformação, ocorrem pequenos movimentos atômicos através da deformação dos eixos principais, mantendo, porém, uma relação entre as redes das fases matriz e produto (correspondência de rede) [33]. Os cristais que surgem por essa transformação são chamados de “martensita”. Essa transformação pode ser detectada por várias técnicas de caracterização como a calorimetria diferencial, análises termomecânicas, variação da resistividade elétrica em função da temperatura, entre outras.

As transformações martensíticas modificam as características físicas dos materiais, devido à transição de fases e a reorientação das agulhas de martensita. Destacam-se entre as principais características encontradas na fase martensítica:

- A composição química é a mesma da fase da matriz;

- Ocorre uma elevação da resistividade elétrica, e consequente diminuição da condutividade elétrica do material, devido à mudança da estrutura CFC da austenita da fase matriz para uma estrutura TCC da martensita da fase produto.

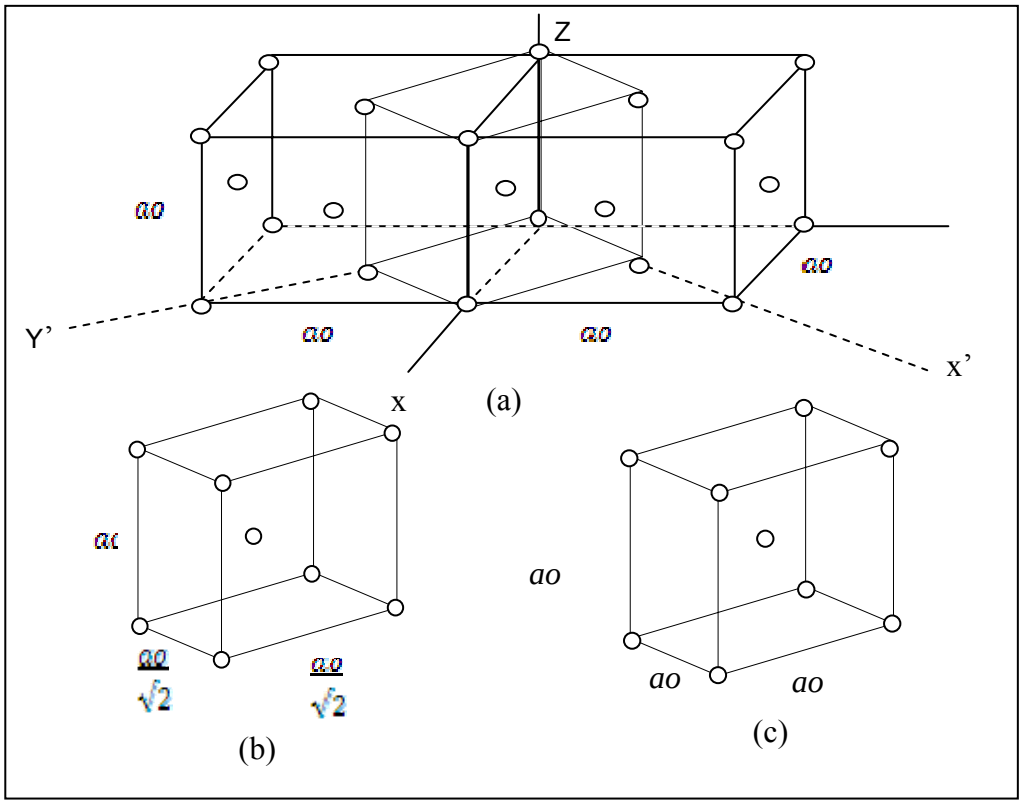


Figura 2.1 - Distorção de Bain. Uma rede CFC é transformada numa TCC. (a) Célula TCC é mostrada na estrutura CFC; (b) Célula TCC; (c) Célula CCC antes da transformação [33].

A figura 2.2 mostra a variação da resistividade com a deformação de uma liga memória de forma, enquanto a figura 2.3 mostra essa variação com a temperatura.

2.2.3 Temperaturas Críticas de Transformação

As ligas memória de forma podem ser caracterizadas através da determinação das temperaturas críticas de transformação, que podem ser obtidas a partir da variação da resistividade elétrica da liga. As temperaturas onde ocorrem as transformações de fase da estrutura do material coincidem, aproximadamente, com os pontos de inflexão das curvas levantadas. A figura 2.4 mostra uma curva típica das temperaturas de transformação de uma liga LMF [33].

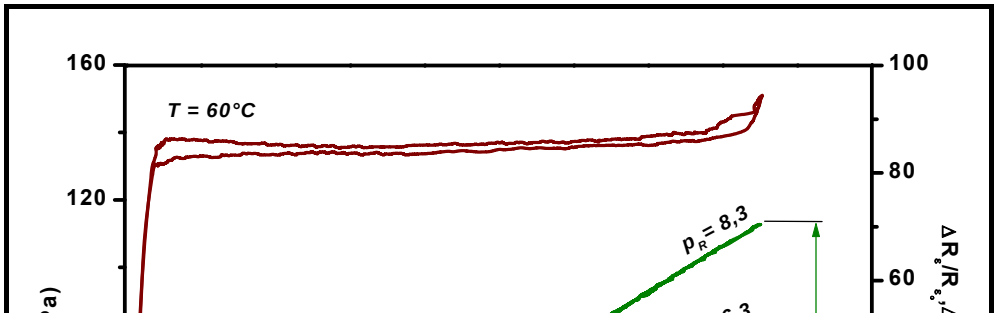


Figura 2.2 - Variação da resistividade elétrica versus deformação em regime superelástico [33].

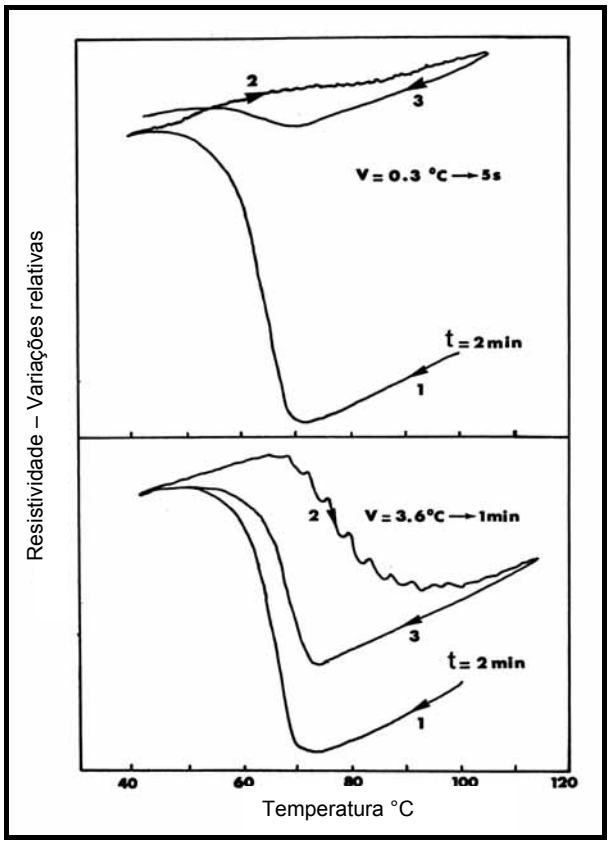


Figura 2.3 - Variação da resistividade elétrica de uma liga LMF com a temperatura [33].

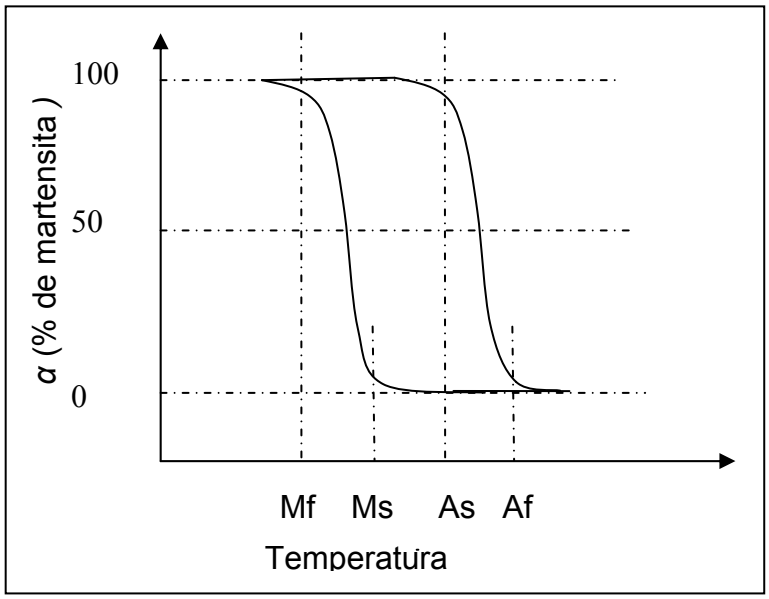


Figura 2.4 - Curva típica da transformação de fase de uma LMF [30].

2.2.4 Termoelasticidade

A transformação martensítica pode ser caracterizada em termos de energia química térmica e não-química elástica [30,31,32]. Em temperaturas abaixo de Ms, os cristais de martensita crescem à medida que a amostra é resfriada. Em termos de energia livre, ocorre o acréscimo de energia elástica e um decréscimo da energia química térmica. Quando a soma dessas energias se aproxima de um valor mínimo, cessa o crescimento dos grãos martensíticos. Esse equilíbrio entre os efeitos térmico e elástico recebe o nome de “termoelasticidade” [31,31,32]. Na figura 2.5, To é a temperatura de equilíbrio onde a energia química livre da fase matriz e da fase martensítica é igual. Se a amostra do material nesse estado sofre efeito de temperatura, o estado de equilíbrio entre as fases é rompido, e os cristais martensíticos passam a crescer ou a encolher à medida que forem resfriados ou aquecidos, respectivamente. O mesmo efeito se verifica quando esforços de tensão são aplicados ao material [30,31,32]. A fase estável é a que possui menor energia livre. Os principais pontos das transformações de uma LMF e seus significados são:

Ms: Temperatura de início da transformação direta (ou martensítica); Mf: Temperatura de término da transformação direta; As: Temperatura de início da transformação inversa (ou austenítica); Af: Temperatura de término da transformação inversa;

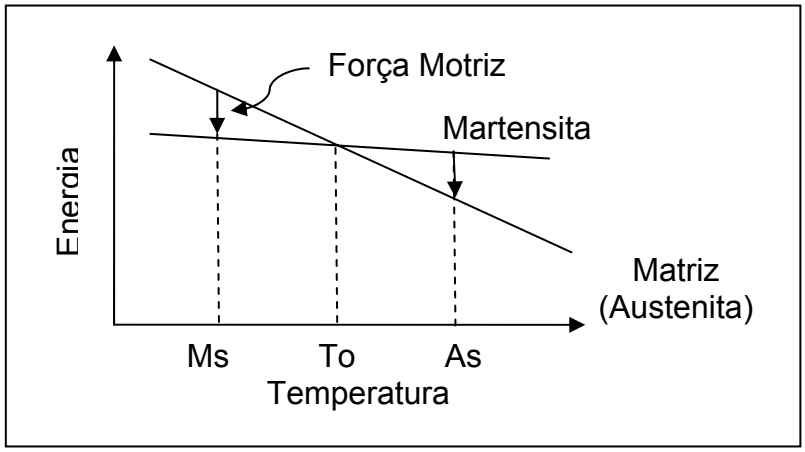


Figura 2.5 - Dependência entre a temperatura e a energia química livre da fase austenítica e martensítica, e suas relações na transformação martensítica [32].

2.2.5 Mecanismo do Efeito Memória de Forma

As transformações martensíticas podem ser tidas, macroscopicamente, como deformações pseudo-elásticas; e ocorrem de modo semelhante às deformações por deslizamento e dobramento verificadas nos metais comuns sob tensão. Porém as transformações martensíticas envolvem características de reversibilidade, o que as torna consideravelmente diferentes das transformações ocorridas naqueles metais e suas ligas [32].

Nos metais comuns, um aquecimento acima de Af não reverte a formação da martensita, e sim, causa a decomposição da martensita em uma microestrutura composta basicamente de ferrita e cementita [30]. A figura 2.6 mostra curvas de tensão-deformação, em várias temperaturas, num ensaio de tração usando cristal de Cu-34,7 Zn-3,0 Sn (% peso) em uma liga que apresenta transformação martensítica termoelástica.

Uma característica particular que pode ser observada é a forma das curvas que dependem significativamente da relação entre as temperaturas características de transformação da amostra, isto é, (Ms, Mf, As e Af) e a temperatura de realização do ensaio T. Quando T ≥ Af, o material apresenta uma aparente deformação plástica seguida de uma deformação elástica, esta desaparece completamente quando a tensão é removida. Essa propriedade geralmente é denominada “pseudo-elasticidade”. Quando T< Af, o material não recobra sua forma original completamente quando a tensão é removida, restando uma deformação residual; no entanto essa deformação pode ser removida por aquecimento da amostra acima da temperatura crítica Af [31,32]. A este efeito dá-se o nome de memória de forma. A deformação residual está indicada na figura 2.6 por linhas pontilhadas.

2.2.6 Comportamento Superelástico

Quando a LMF é aquecida acima da temperatura Af, temos no material a fase de alta temperatura ou austenítica. A fase martensítica pode ser induzida nesta temperatura por carregamento, onde o material se deforma devido à indução da fase martensítica. A fase austenítica reaparece quando a tensão é liberada no material.

Esse fenômeno em que a martensita é induzida por tensão a elevadas temperaturas é conhecido como superelasticidade.

A recuperação da forma não ocorre pelo aumento da temperatura, porém pela diminuição da tensão, conferindo ao material uma enorme elasticidade. A figura 2.7 apresenta esquematicamente a superelasticidade dessas ligas.

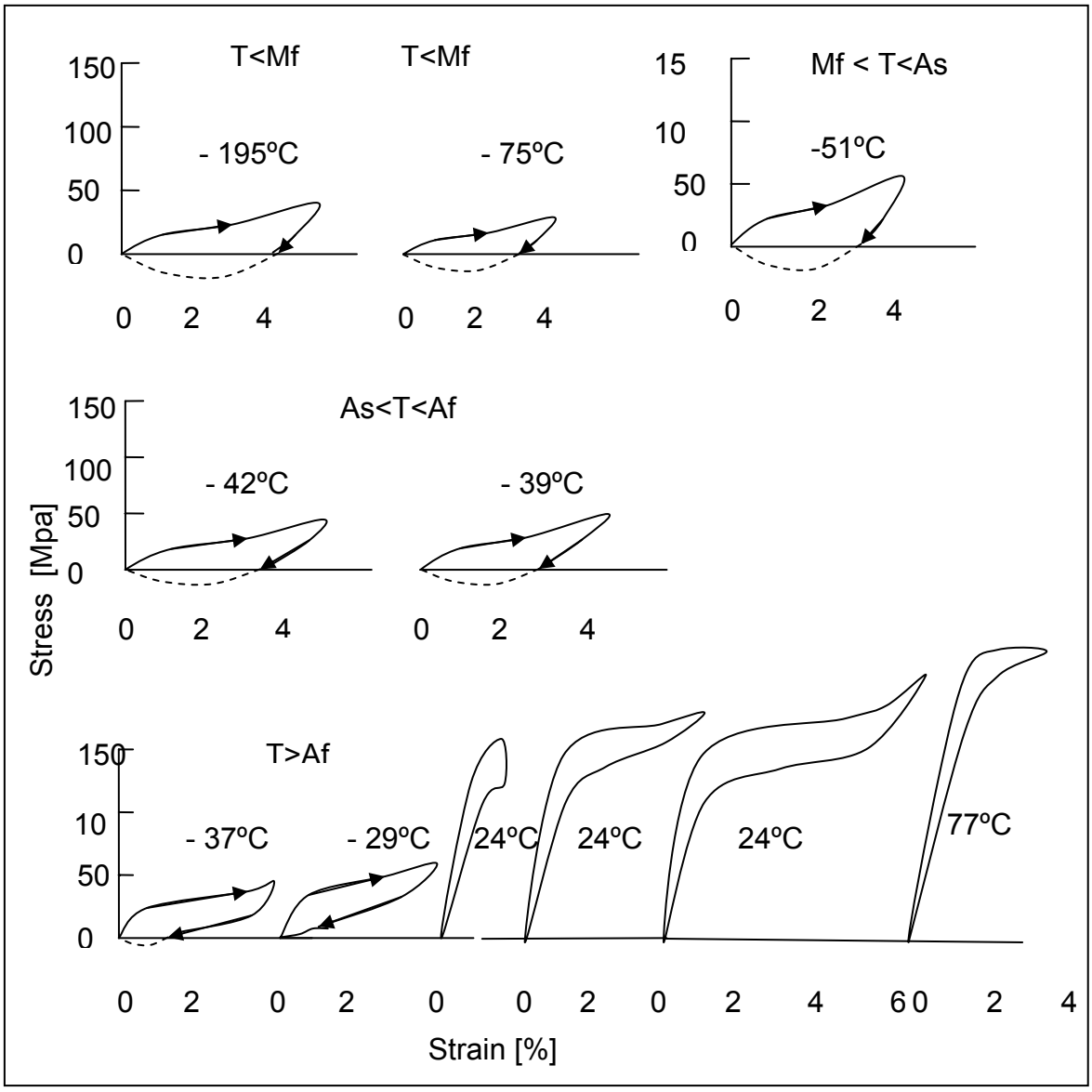


Figura 2.6 – Curvas tensão-deformação de um cristal com memória de forma Cu-34,7 Zn-3,0 Sn (% peso). Ms = - 52°C, Mf = - 65°C, As = - 50°C, Af = - 38 C [31]

2.3 Molas Helicoidais

As molas são elementos mecânicos usados para exercer forças, propiciar flexibilidade e para armazenar energia na forma de energia mecânica de deformação elástica [34,35]. As molas possuem uma classificação de acordo com a natureza e a forma dos esforços mecânicos aplicados; sendo as molas helicoidais, molas de lâminas e as molas de discos os tipos mais comuns.

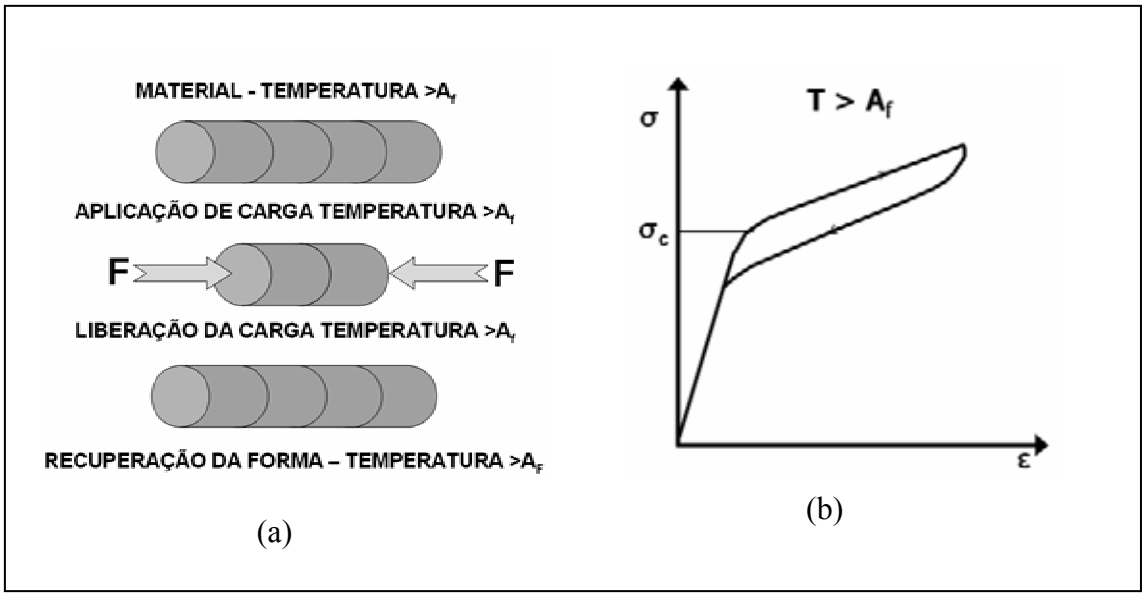


Figura 2.7 - Esquema da superelasticidade nas ligas com memória de forma. a) representação da superelasticidade em uma barra. b) esquema tensão versus deformação para a superelasticidade [30].

As molas helicoidais são capazes de apresentar deslocamentos bem maiores, com esforços mecânicos bem menores do que os alcançados com fios lineares feitos do mesmo material. Esse tipo de mola se presta melhor para aplicações envolvendo esforços axiais de tração ou compressão, apresentando grande capacidade de carregamento aliada ao efeito de recuperação de forma [34,35].

As molas são caracterizadas por sua constante de mola, ou rigidez, representada pela letra k, que é definida como a inclinação da curva força versus deflexão. As molas podem apresentar rigidez linear ou não-linear, porém molas com o comportamento linear são utilizadas mais frequentemente [36].

Se a inclinação é constante, a rigidez é linear, e a formula é definida como: $k = F/x$ ou, $F = k.x$, onde F é a força aplicada à mola e x a deformação da mola quando submetida à carga.

2.4 Método dos 4 Pontos para Medição da Resistividade Elétrica em Fios Condutores

A medição da resistividade elétrica pelo método dos 4 pontos é um procedimento experimental que permite obter o comportamento da variação da resistividade elétrica de LMF's com a variação da temperatura. Por esse método, é possível obter as temperaturas críticas de transformação de fase das ligas memória de forma.

Este ensaio consiste em fazer a fixação de 4 fios equidistantes por meio de solda ponto com a seguinte disposição: os dois fios das extremidades fazem a aplicação da corrente elétrica, e os dois fios internos são utilizados para medir a diferença de potencial (ddp) gerada no condutor A ddp surge por conta da alteração na resistividade elétrica que acompanha as mudanças de fases que ocorrem pela alteração da temperatura [30].

As medições podem ser realizadas em temperaturas diferentes. A amostra é submersa em banho térmico contendo fluido térmico, sendo aquecida em várias faixas de temperaturas com diferentes taxas de aquecimento. Esse método é preferível quando se deseja obter resultados sob condições de temperatura controlada. Durante o aquecimento, a fase martensítica se transforma para a fase austenítica, gerando variações importantes na tensão que é captada pelos dois fios internos da amostra. Os dados da temperatura e da diferença de potencial são adquiridos por um sistema de aquisição de dados que possibilita obtenção dos gráficos nos quais, com o auxílio do método das tangentes, são determinadas as temperaturas de transformação. A figura 2.8 mostra o esquema de realização do ensaio [30].

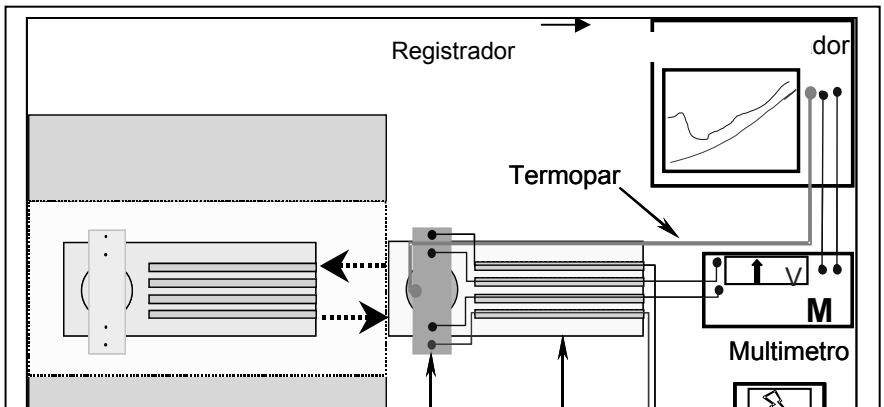


Figura 2.8 - Esquema do ensaio de medição de ddp em condutores elétricos: o método de quatro pontos [30].

O método das tangentes consiste em se traçar retas tangentes às curvas de aquecimento e resfriamento, onde o ponto de encontro dessas retas vai identificar as coordenadas dos pontos de inflexão que determinam as temperaturas críticas de transformação. Uma curva típica de transformação martensítica construída a partir de dados levantados pelo método de quatro pontos em uma amostra de material foi mostrada na figura 2.4.

2.5 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A calorimetria diferencial de varredura permite analisar os efeitos dos tratamentos térmicos, sob taxas variadas de aquecimento e resfriamento, com diferentes intervalos de temperatura. O ensaio de calorimetria possibilita a obtenção das temperaturas críticas de transformação, histerese térmica e da entalpia de transformação; permitindo a comparação e a confirmação delas com aquelas obtidas pela medição da variação da resistividade elétrica.

2.6 Microcontroladores

2.6.1 Características dos Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos que reúnem, num só componente, vários recursos de controle como memória, temporizadores (*timers*),

contadores, e outros. Antigamente, esses recursos só podiam ser disponibilizados em circuitos totalmente independentes, montados em placas separadas. Com o desenvolvimento da eletrônica digital, todos esses elementos passaram a ser fornecidos em um único chip e passaram a ser chamados de microcontroladores. Os microcontroladores são comumente chamados de computadores em um único chip. Desse modo, esses dispositivos oferecem grande flexibilidade no uso em sistemas automáticos de controle; resultando em simplicidade operacional, além do ganho de espaço e tempo na construção de novos projetos [37].

Os microcontroladores são chips que funcionam baseados em programas escritos em linguagens próprias de programação. Existem vários softwares disponíveis para programação desses dispositivos. A maioria são softwares livres de fácil acesso e baixo custo [38].

Os fabricantes de microcontroladores disponibilizam produtos em vários tipos de encapsulamento. A figura 2.9 apresenta um microcontrolador em encapsulamento DIP [39].

Figura 2.9 - Microcontrolador em encapsulamento DIP [39].

Na figura 2.10, está apresentado um microcontrolador em encapsulamento QFP, chamados também de SMD.

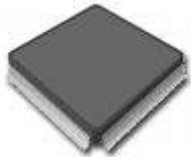


Figura 2.10 - Microcontrolador em encapsulamento QFP [39].

Uma estrutura mínima de programação é necessária para se programar um microcontrolador [39]. A figura 2.11 mostra o esquema básico dessa estrutura, constituída de PC e gravador.

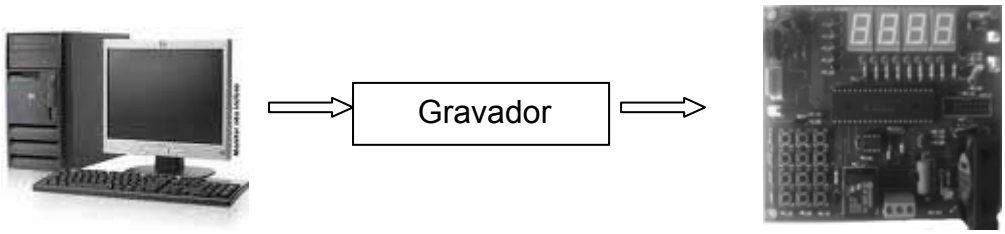


Figura 2.11 - Arquitetura básica de programação de microcontroladores [39].

2.6.2 Comunicação Serial Entre O PC e o Microcontrolador

Os microcontroladores podem se comunicar com PC's desde que sejam compatibilizados os níveis lógicos entre os sistemas de comunicação do PC e do microcontrolador. Dispositivos chamados conversores de níveis lógicos são utilizados para esse fim [39].

2.6.3 Microcontrolador PIC

O PIC é um microcontrolador fabricado pela Microchip *Technology*, com capacidade de processamento de dados de 8 e 16 bits, com recursos de programação por memória, possuindo extensa variedade de modelos. Possuem encapsulamento de 6 a 100 pinos. Esses microcontroladores trabalham em velocidades que variam de 0kHz a 48MHz. Trabalham tanto com sinais externos de interrupções como de periféricos internos. Funcionam com tensões de alimentação de 2 a 6V. Possuem recursos de conversão analógico-digital, com medição de sinais analógicos de 0 a 5V; contadores e temporizadores, comparadores analógicos. Permitem a comunicação externa via internet, radiofrequência - RF, GPS, redes de computadores, comunicação industrial, etc.. Possuem geradores de pulso,

controladores de LCD, controladores de motores, detectores de falha na alimentação, portas digitais, etc. [39].

2.6.4 Dispositivos de Comunicação Externa do PIC

A figura 2.12 apresenta a pinagem do microcontrolador PIC16F628A, de 16 portas de I/O (entrada e saída), cuja estrutura é basicamente a mesma dos demais microcontroladores. São por meio destas portas que o possível a comunicação do PIC com os dispositivos externos, tanto para o recebimento como para o envio de sinais controle e monitoramento.

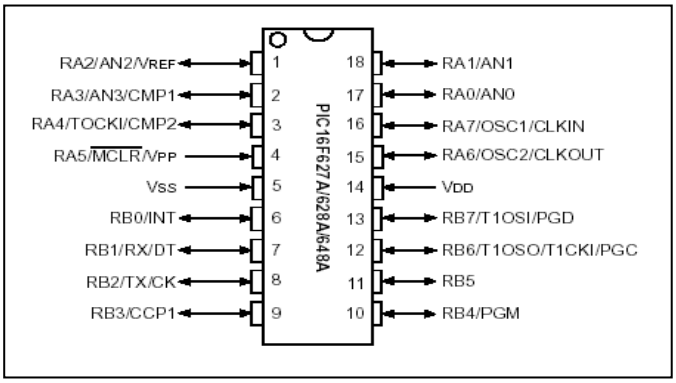


Figura 2.12 - Pinagem do microcontrolador PIC16F628A [37].

Os pinos de I/O (entrada e saída) são divididos em dois PORTS, o PORT A e o PORT B. Através destes pinos, são realizados os comandos, envio e recepção de sinais externos. Comandos com controle de um *led* ou leitura de estado de botões, sensores, etc., são possíveis de serem realizados.

Os pinos 1, 2, 3, 4, 15, 16, 17 e 18 sempre começam com RAX, em que X é o número da porta, podendo variar de 0 até 7. O mesmo é válido para os pinos 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13, em que os pinos começam com RB. No pino 5, fica ligada a tensão negativa da fonte, enquanto, no pino 14, a tensão positiva. O PIC requer uma tensão de alimentação de 3V a 5,5V.

Os pinos indicados por setas com único sentido indicam que o pino tem somente um sentido, sendo, dessa forma, unidirecional. Os pinos indicados pela seta com duplo sentido indicam que o pino é bidirecional, podendo ser configurado tanto como entrada ou como saída. Um pino pode ter outras funções além de pino de I/O. O pino 6, por exemplo, designado como RB0/INT, tem duas funções. A primeira é uma função de I/O, chamada de RB0. Na segunda, pode funcionar como um pino de interrupção externa. Dessa forma, o pino pode funcionar como I/O, ou seja, RB0 ou como entrada de interrupção externa. Quem define de que forma esse pino irá funcionar, são os registradores de função especial (SFR). Nesse modelo de PIC, os pinos 7 e 8 podem ser configurados para envio e recebimento de dados, além de mais duas outras funções [39].

2.7 Transistores

2.7.1 Características Gerais

O transistor é um dispositivo semicondutor composto de material tipo n e tipo p, dispostos em camadas alternadas chamadas de emissor, coletor e base. As camadas possuem características eletrônicas diferentes. A camada emissora é fortemente dopada, a base é menos dopada e a coletora possui dopagem bem leve. De acordo com a configuração os transistores, são denominados de npn e pnp. A polarização desses componentes é necessária para estabelecer a região apropriada de operação. As camadas externas possuem larguras bem maiores do que as internas. As letras E, B e C são utilizadas para indicar o emissor, a base e o coletor, respectivamente.

A abreviação TBJ, transistor bipolar de junção (em inglês, BJT), é normalmente utilizada para descrever esse tipo de dispositivo. A notação e símbolos para transistores estão indicados na figura 2.13 para configuração base-comum com

transistores pnp e npn. Essa terminologia deriva do fato de a base ser comum tanto na entrada como na saída da configuração. O ponto comum, normalmente, é o terminal, cujo potencial está mais próximo do potencial GDN (terra) ou está efetivamente em GDN.

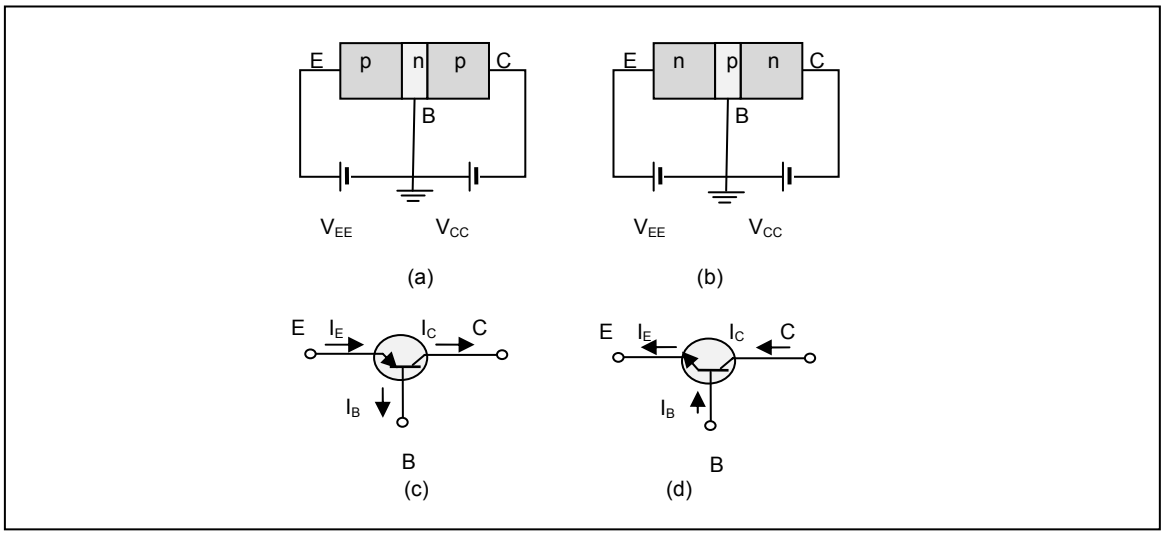


Figura 2.13 -Tipos de transistores, notação e símbolos utilizados para configuração base comum: (a) e (c) pnp; (b) e (d) npn;

O transistor começou a se popularizar na década de 60, e sua principal aplicação é amplificar sinais elétricos. Entende-se por "amplificar" o procedimento de tornar um sinal elétrico mais forte. Por exemplo, um sinal elétrico de baixa intensidade, como os sinais gerados por um microfone, é injetado em um circuito eletrônico (transistorizado, por exemplo), cuja função principal é transformar o sinal fraco gerado pelo microfone em sinais elétricos com as mesmas características, mas com potência suficiente para excitar os auto-falantes. Os transistores são encontrados praticamente em todos os circuitos integrados [40].

2.7.2 Influência da Temperatura nas Características do Transistor

Existe uma relação direta entre a temperatura e a corrente de coletor do transistor. Aumentando-se a temperatura de um transistor, sua corrente de coletor

também é aumentada. Da mesma forma, aumentando-se a corrente de base, aumenta-se conseqüentemente a corrente de coletor que, por sua vez, aumenta a temperatura (Efeito Joule), constituindo, assim, uma "reação em cadeia". Variando-se a temperatura do transistor, seja esta variação causada pelo simples aumento da temperatura ambiente ou pelo aumento da intensidade da corrente de coletor, o ponto de operação escolhido tende a se deslocar. Temperaturas da ordem de 200ºC para transistores de silício e cerca de 105ºC para transistores de germânio nunca deverão ser atingidas. As características de operação dos transistores podem ser obtidas através de curvas características fornecidas pelos fabricantes [40].

2.7.3 Relação Beta (β) em Transistores

No modo cc, para os transistores, os valores da corrente do coletor e da base são relacionados por uma quantidade chamada de beta (β) e definida na seguinte equação:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Onde IC e IB são determinados em um ponto específico de operação da curva característica. Para os dispositivos práticos, o valor de β varia geralmente de 50 a mais de 400, estando a maioria no meio dessa faixa. Desse modo, β revela o valor relativo de uma corrente em relação à outra. Para um dispositivo com um β de 200, a corrente de coletor é 200 vezes o valor da corrente de base [40].

2.8 Fonte de Corrente Constante (CCS)

As fontes de corrente são dispositivos eletrônicos que são usados, geralmente, para fornecer correntes de valor constante aos circuitos, independentemente da variação da carga alimentada. Fontes de corrente podem ser

criadas utilizando-se a configurações simples com transistores, conforme mostrada na figura 2.14. Nessa configuração, a corrente da base e do coletor possui valor constante. Em outras palavras, a corrente do coletor independe da carga ligada ao circuito coletor, funcionando como uma perfeita fonte de corrente. A estabilidade de uma fonte de corrente, no entanto, está intrinsecamente ligada ao valor de β dos transistores utilizados no circuito. A aplicação de métodos específicos é utilizada com objetivo de minimizar a dependência de β e assim obter fontes de corrente o mais estável possível. O espelho de corrente é uma das configurações mais corriqueiramente utilizadas.

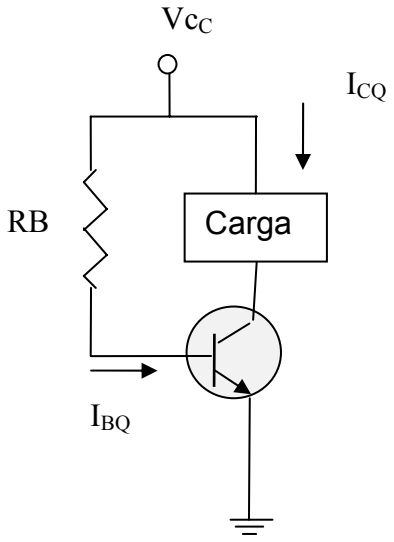


Figura 2.14 - Fonte de corrente com uma configuração simples com transistor [40].

2.9 Espelhos de Corrente

A principal função desta configuração é conseguir “espelhar” uma corrente desenvolvida sobre um lado do circuito. Essa configuração é particularmente apropriada para projeto de circuitos integrados devido à semelhança (casamento) entre os dispositivos do mesmo tipo. Tal configuração permite que dois transistores do mesmo tipo sejam conectados de tal forma que a corrente de coletor de um transistor seja relacionada de maneira razoavelmente precisa com a corrente de coletor do outro [41].

A figura 2.15 mostra esta configuração com transistor NPN. O espelho de corrente pode ser feito com transistores PNP, conforme mostrado na figura 2.16.

Na figura 2.15, tem-se um espelho de corrente simples formado com transistores NPN. Admitindo diferentes áreas base-emissor, A1 e A2, respectivamente para os transistores Q1 e Q2, desprezando-se a influência de β finito e admitindo idênticas densidades de corrente de saturação idealmente, pode-se admitir: Iout / Iref = A2 / A1 = k onde k corresponde ao fator de espelhamento.

No entanto, devido às características intrínsecas dos transistores, pode haver uma dependência do fator de espelhamento dos diferentes valores de VCE que Q1 e Q2 possam ter. Desse modo, o transistor não mais se comporta como uma fonte de corrente ideal, na qual a corrente independe da tensão através dos terminais [41].

2.10 Amplificadores

2.10.1 Características Gerais

Amplificadores de potência são dispositivos que possuem características de amplificação de altos níveis de sinal (tensão e/ou corrente) apresentando, principalmente, alta eficiência. Existem várias classes de amplificação. A classe A possui alta linearidade (baixa distorção), porém classes como a B, AB e D são mais indicadas para aplicações onde se requer maior desempenho [41].

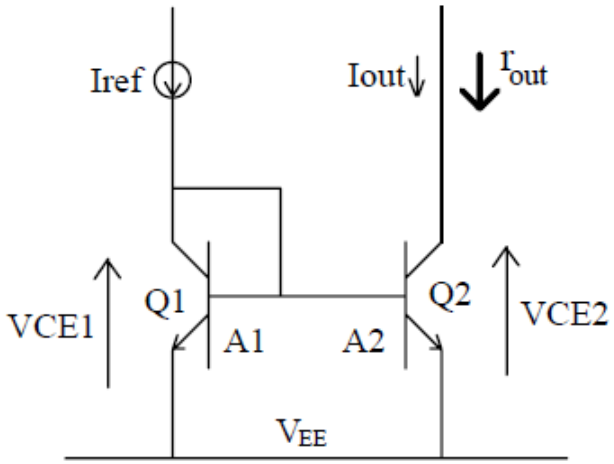


Figura 2.15 - Configuração do espelho de corrente com transistor NPN [41].

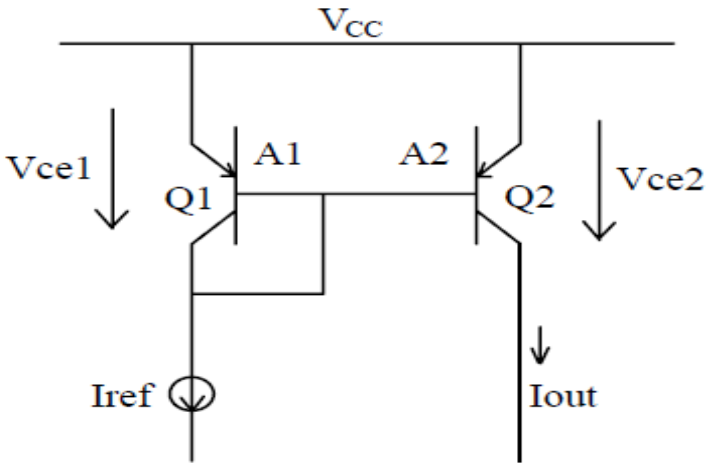


Figura 2.16 - Configuração do espelho de corrente com transistor PNP [41].

2.10.2 Amplificadores de Potência com TBJ

Para o amplificador de potência com TBJ, são usados transistores com alta capacidade de dissipação de calor (transistores de potência – famílias BD, TIP) e será, por muitas vezes, necessária a utilização de dissipadores de calor [41].

2.11 Fontes de Tensão

As fontes de tensão são dispositivos eletrônicos utilizados para fornecer a tensão elétrica nas condições ideais exigidas por determinada carga, normalmente utilizada para alimentação de circuitos de corrente contínua.

Os circuitos de fonte de tensão são montados com filtros, retificadores e reguladores de tensão. A partir de uma tensão alternada (ca) pode-se obter uma tensão contínua (cc) estacionária por meio de retificação desse sinal de entrada. Depois realizada a filtragem para se obter um valor cc e, finalmente, o sinal é regulado para que haja um valor desejado de tensão cc na saída.

A regulagem, geralmente, é feita por um circuito integrado (CI) regulador de tensão, que recebe a tensão cc e fornece um valor ligeiramente menor, permanecendo constante mesmo que a tensão de entrada varie ou a carga conectada mude de valor [41].

A figura 2.17 mostra um diagrama em blocos contendo os estágios de uma fonte de tensão típica e a forma de onda nos vários pontos do circuito.

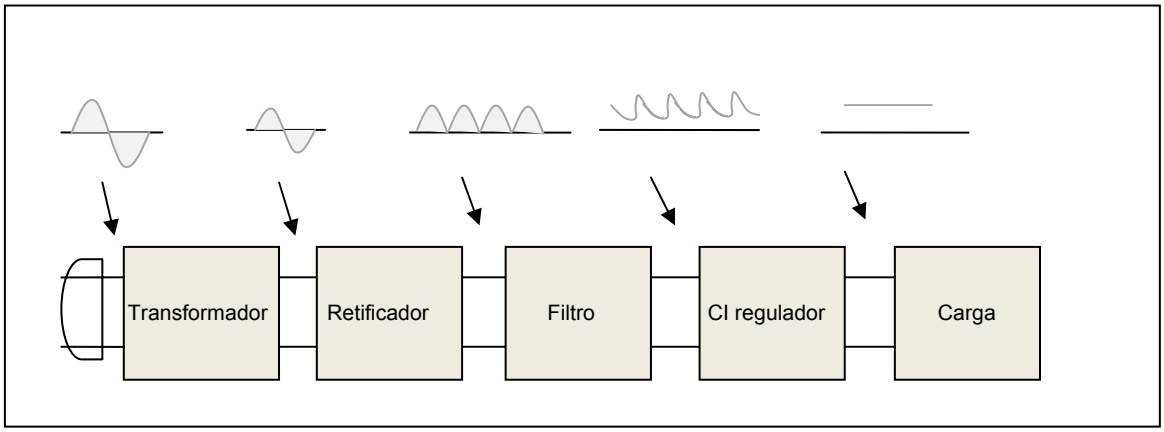


Figura 2.17. Diagrama de blocos mostrando os estágios de uma fonte de tensão [41].

A tensão ca de alimentação (valor eficaz) alimenta um transformador, cuja função é reduzi-la para o nível de tensão cc desejado. Diodos retificadores fornecem, então, uma tensão retificada de onda completa, que é inicialmente filtrada por um capacitor simples para produzir uma tensão cc. Essa tensão tem ainda alguma

ondulação (*ripple*) ou variação ca. O circuito regulador pode utilizar essa entrada cc para produzir uma tensão cc que não só tem menos ondulação, como ainda mantém constante o valor na saída, mesmo para variações na entrada ou na carga conectada. Essa regulação é normalmente obtida utilizando um dos vários circuitos integrados reguladores existente no mercado.

2.12 Polímeros

Os polímeros são compostos químicos derivados de hidrocarbonetos, de elevada massa molecular, resultantes de uma ou mais reações químicas de polimerização. São cadeias muito longas com, no mínimo, carbono e hidrogênio.

São macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores, os monômeros. O número de unidades estruturais repetidas numa macromolécula determina o grau de polimerização do polímero. Em geral, os polímeros contêm os mesmos elementos nas mesmas proporções relativas que seus monômeros, mas em maior quantidade absoluta [42].

A polimerização é uma reação em que os monômeros se combinam quimicamente para formar moléculas longas, com a mesma composição. Estas podem formar-se por reação em cadeia ou por meio de reações de poliadição ou policondensação. A polimerização pode ser reversível ou não e pode ser espontânea ou provocada [43]. Os polímeros podem ser transformados em vários produtos a partir do processo de fusão das resinas poliméricas obtidas através dos processos de polimerização. O emprego dos materiais poliméricos na indústria tem aumentado enormemente nos últimos anos. Por processos de extrusão são obtidos os filmes plásticos, laminados, utensílios, componentes da indústria de autopeças, construção civil, etc. [44]. De um modo geral, esses materiais são isolantes elétricos e possuem baixa condutividade térmica, pouco peso, alta resistência à corrosão, baixo

coeficiente de atrito, além de excelente resistência química. Porém, pode haver, em algumas aplicações, incompatibilidade do material com o meio, ocorrendo uma reação química direta ou uma dissolução. Isso ocorre, por exemplo, com alguns polímeros em contato com compostos de hidrocarbonetos [45]. Alguns polímeros plásticos podem, assim, ser dissolvidos com aplicação de solventes. Após a dissolução, o material perde sua forma original, embora mantenha, normalmente, inalterada a composição química original. É por essa característica que é possível obter-se filmes de espessura controlável, após a dissolução com solventes e secagem posterior. Neste caso, é comum determinar-se as propriedades destes filmes (módulo de Young, resistência a ruptura, tensão de cisalhamento entre outras), verificando se as propriedades obtidas são comparáveis as dos polímeros originais [46].

2.13 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

2.13.1 Introdução

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um material obtido pelo processo de destilação de petróleo, que apresenta aspecto viscoso, semissólido, ou sólido, à temperatura ambiente. Apresenta comportamento termoplástico tornando-se líquido quando aquecido e retornando ao estado original após resfriamento. O CAP apresenta propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possuindo características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis [47].

O CAP encontra sua principal aplicação em serviços de pavimentação, onde são aplicados em misturas a quente, pré-misturados com areia-asfalto e concreto betuminoso usinados a quente. É também usado em tratamento superficial de impermeabilização.

2.13.2 Características Gerais do CAP

Os ligantes asfálticos de petróleo são materiais constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar, cujos componentes principais são o carbono e o hidrogênio, contendo também outros elementos como o oxigênio, enxofre e alguns metais [48,49]. As propriedades do CAP dependem da fonte e do processo de refino que o originou. O CAP é composto basicamente por duas frações, os maltenos e os asfaltenos.

Os maltenos são constituídos pelos compostos saturados, aromáticos e resinas, que apresentam baixa polaridade. Os asfaltenos constituem a fração mais pesada e polar do ligante asfáltico [50]. Os asfaltenos são os mais reativos frente ao oxigênio, seguidos das resinas, aromáticos e saturados. O envelhecimento oxidativo do ligante é responsável pela alteração das características físicas, químicas e reológicas do asfalto. Fatores adicionais, como a temperatura, os efeitos da luz, água e reações químicas com os agregados, também contribuem para este processo. Os asfaltenos representam a fração mais pesada e polar do ligante asfáltico, sendo estes os mais estudados, considerando que as suas características têm implicações econômicas importantes no processo de pavimentação de estradas [51].

No ligante asfáltico, os asfaltenos se encontram como agregados moleculares com as resinas adsorvidas na superfície, conforme mostrado na figura 2.18, ou como moléculas isoladas. A estabilidade dessa estrutura coloidal é altamente dependente das propriedades interfaciais e da solubilidade dos asfaltenos. Fatores como a temperatura, pressão e reações químicas, podem desestabilizar a estrutura coloidal dos asfaltenos provocando sua precipitação [52].

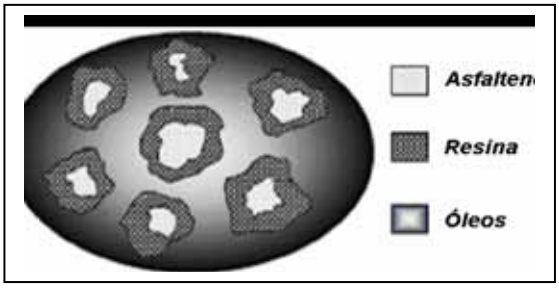


Figura 2.18 - Estrutura coloidal dos asfaltenos [53].

2.13.3 Classificação dos Ligantes Asfálticos

De acordo com a sua aplicação em pavimentação, os asfaltos classificam-se em:

• Cimentos asfálticos;

• Asfaltos diluídos;

• Emulsões asfálticas;

• Asfaltos modificados;

• Emulsões asfálticas modificadas.

Para obtenção do asfalto, tipos específicos de petróleo são submetidos ao processo de destilação nos quais as frações leves (gasolina, querosene, diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação [54].

O cimento asfáltico de petróleo é obtido em diferentes consistências medidas pelos ensaios de penetração ou de viscosidade dinâmica. Esse material constitui o produto básico a partir do qual se preparam vários tipos de materiais para pavimentação.

O cimento asfáltico é quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno e em bissulfeto de carbono.

Até 2005, a classificação dos cimentos asfálticos era baseada na viscosidade a 60°C que englobava os três tipos seguintes: CAP 7, CAP 20 e o CAP 40.

A resolução da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, n° 19, de 11/06/2005 contém regulamento técnico (n° 03 de 2005), em que os asfaltos para pavimentação voltaram a ser classificados por penetração, a saber:

• 30/45 (semelhante CAP 40); 50/70 (semelhante CAP 20); 85/100 (semelhante CAP 7); e o 150/200.

2.13.4 Aplicação

Os cimentos asfálticos são preparados para apresentar características próprias para uso direto na construção de camadas asfálticas de pavimentos. É um material adequado para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência.

É um material termoplástico que necessita de aquecimento para aplicação. Existem curvas de viscosidade versus temperatura que indicam intervalos ideais de temperaturas a serem empregadas. Esses valores são normatizados. O CAP é utilizado em misturas a quente e serviços de tratamento superficial ou macadame betuminoso.

2.14 Considerações Complementares

A compreensão do efeito memória de forma, especificamente nas ligas de Ti-Ni, foi essencial para se aplicar adequadamente esse efeito no funcionamento do sensor além de prever o seu comportamento ao longo do tempo. As temperaturas de transformação de fase, as mudanças estruturais ocorridas durante as transformações, a variação de resistividade e a superelasticidade desses materiais são amplamente exploradas em projetos de sensores inteligentes utilizadas em sistemas de automação [55,56,57,58,59,60,61,62]. Essas propriedades mostram que esse material atende plenamente os requisitos necessários à geração do sinal elétrico necessário ao monitoramento.

Os dados de desempenho mecânico das ligas memória de forma quando

sujeitas a esforços mecânicos, a estabilidade física e resistência à corrosão das ligas de Ti-Ni foram características consideradas importantes. Todos os dados e informações apontam para a viabilidade do uso do material como elemento mecânico no projeto. Há histórico de diversas aplicações bem sucedidas desses materiais como sensores e atuadores inteligentes [62,63,64,65,66,67,68]. Esses dados representam uma segurança no uso do material.

Os recursos dos microcontroladores são essenciais e suficientes para executar todas as funções de controle necessárias ao monitoramento. Enquanto as fontes de corrente e tensão eletrônicas são viáveis de serem implementadas no projeto.

As características do cimento asfáltico de petróleo foram estudadas. Eles são sólidos à temperatura ambiente, possuem considerável resistência mecânica, química e estabilidade dimensional; elevada resistência à corrosão e elevada solubilidade na gasolina. Isso serviu de referência para o desenvolvimento de um material, de comportamento similar, para aplicação como elemento de disparo do sensor.

CAPÍTULO 3 - CONCEPÇÃO DO SISTEMA

3.1 Introdução Geral

Para concepção do sistema, alguns parâmetros de ordem técnica e econômica foram previamente estabelecidos. O projeto deveria contemplar o uso de tecnologias simples que resultassem em baixo custo e simples operação. A facilidade de aplicação do sistema depende diretamente desses fatores.

Várias literaturas técnicas foram consultadas para que fosse possível compor um conjunto de dados e informações suficientes para a concepção dos dispositivos.

A síntese dos assuntos mais importantes foi apresentada no capítulo anterior.

Os principais requisitos estabelecidos, com suas justificativas, são apresentados nas tabelas 3.1, e a descrição dos princípios é discutida ao longo deste capítulo.

3.2 Princípios de Funcionamento

3.2.1 - Introdução

O sistema foi concebido para funcionar segundo a operação conjunta de três dispositivos principais: 1 - Dispositivo para geração do sinal elétrico; 2 – Dispositivo para geração da deformação mecânica; 3 – Dispositivo para monitoramento do sinal de ddp.

Os detalhes dos princípios estão apresentados no capítulo a seguir.

Tabelas 3.1 - Requisitos gerais do sistema de monitoramento.

ITEM	REQUISITO	JUSTIFICATIVA
	SENSOR	
1	Deve possuir dimensões reduzidas;	Possibilitar a instalação no interior de tubos de PVC de diâmetros reduzidos (100, 150 e 200 mm);
2	Operar com tensão e corrente contínua de baixa intensidade; e sem uso de contatos elétricos;	Não apresentar risco de abertura de arco elétrico; por conta do contato com gasolina;
3	Apresentar estabilidade química,	Não apresentar variação de

	dimensional e térmica na faixa de utilização (10 a 40ºC);	sinal por efeito de temperatura; alteração dimensional ou reação química;
4	Possuir resistência à umidade e corrosão;	Devido à aplicação em contato direto com a água;
	DIPOSITIVO DE MONITORAMENTO	
5	Emitir sinais à distância por meios convencionais de comunicação (RF, fibra ótica, GPS, microondas, etc.);	Permitir o monitoramento remoto;
6	Operar com tensão e corrente contínua de baixa intensidade;	Facilidade construtiva e operacional;
7	Emitir sinais de comando externo.	Acionar alarmes, bombas, motores, etc.

3.2.2 Concepção do Dispositivo de Geração do Sinal Elétrico

O comportamento das ligas memória de forma e o método dos 4 pontos para medição da resistividade elétrica em condutores elétricos forneceram as bases para a concepção do dispositivo de geração do sinal elétrico. O sensor foi concebido para atuar pela deformação mecânica de um condutor elétrico, em forma de mola helicoidal de Ti-Ni. A mola é percorrida por uma corrente contínua (Icc) de valor constante fornecida por uma fonte de corrente estabilizada. Valores diferentes de tensão elétrica (U), ou diferença de potencial (ddp), são gerados nos terminais internos da mola quando esta se encontra no seu estado natural de repouso e quando é distendida. A figura 3.1 mostra o esquema representativo do princípio.

A diferença no valor da tensão U ocorre devido à variação de resistividade elétrica (ρ) da mola, que sofre uma alteração na sua estrutura cristalina (ver item 2.2.2).

As grandezas elétricas: corrente (I), tensão (U), resistência elétrica da mola(R)

e resistividade (ρ) da LMF podem ser relacionadas através das equações da eletricidade básica [69]:

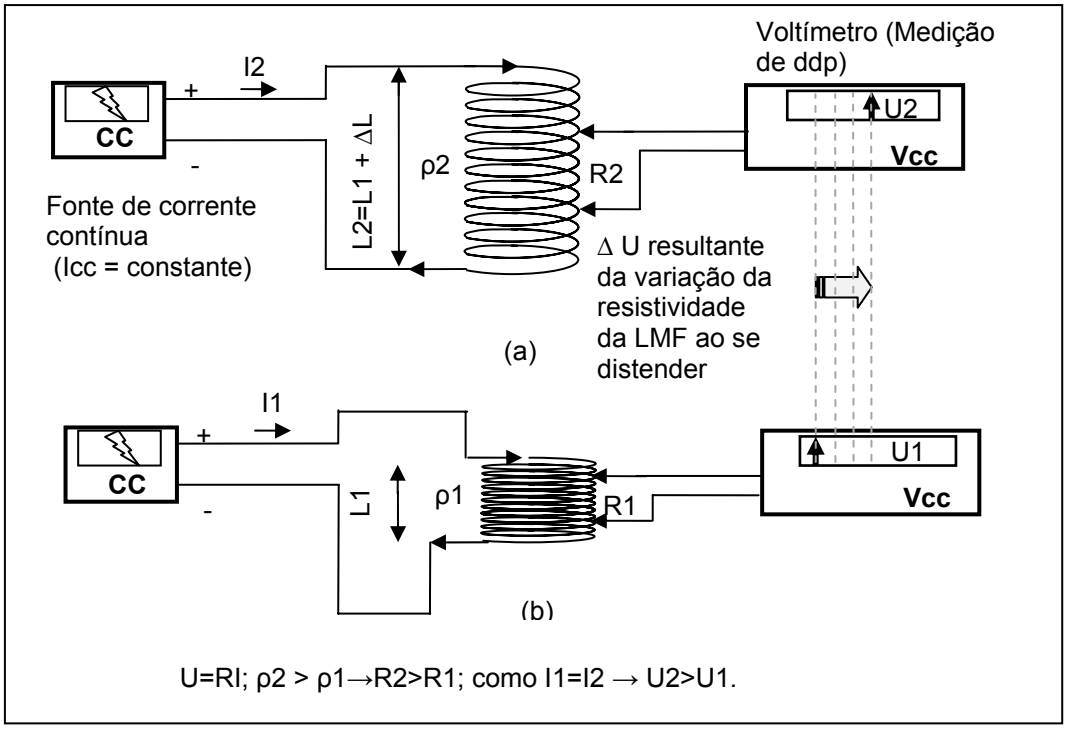


Figura 3.1 - Esquema mostrando o princípio de geração do sinal elétrico no sensor: (a) Mola distendida; (b) Mola no estado natural de repouso.

Pela lei de Ohm temos que:

$$I = U/R \qquad (3.1)$$

Logo,

$$U = RI \qquad (3.2)$$

Temos ainda que a resistência elétrica de um condutor depende de suas dimensões (comprimento total "L" e área da secção transversal "A") e das características de condutividade do material (sua resistividade elétrica "ρ"). Essas grandezas se relacionam pela equação abaixo:

$$R = \rho L/A. \qquad (3.3)$$

O condutor em questão, em formato de mola, foi confeccionado de um fio de LMF, de Ti-Ni, de comprimento e secção definidos (L e A constantes). Desse modo, podemos introduzir na equação (3.3) uma constante K1 = L/A. Assim, a equação (3.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$R=K1\rho \qquad (3.4)$$

E a equação (3.2) passa a ser:

$$U = K1\ \rho\ I \qquad (3.5)$$

Como o valor da corrente I, fornecida pela fonte de corrente estabilizada, é constante, podemos introduzir uma nova constante K2 = K1I. Desse modo, a equação (3.5) passa a ser:

$$U = K2\ \rho \qquad (3.6)$$

A equação (3.6) mostra que, nas condições assumidas de funcionamento do sensor, a tensão U, gerada nos terminais internos da mola, varia proporcionalmente com resistividade ρ da liga Ti-Ni.

A figura 3.2 mostra o circuito elétrico equivalente do sistema.

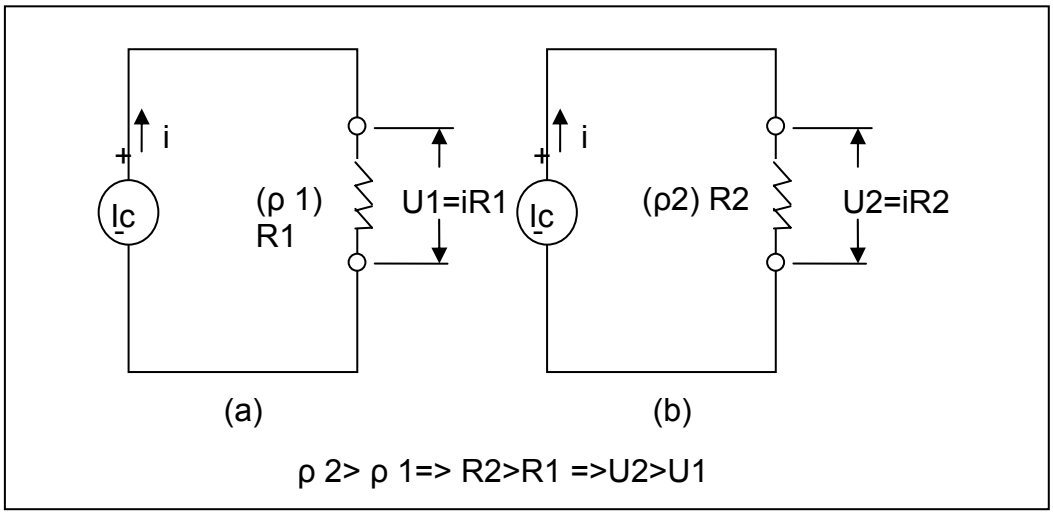


Figura 3.2. Circuito elétrico equivalente do sistema de alimentação do sensor:(a) Mola de Ti-Ni no seu estado natural (material com resistividade ρ1);(b) Mola de LMF distendida (material com resistividade ρ2 > ρ1).

3.2.3 Concepção do dispositivo de Geração da Deformação Mecânica

A facilidade de deformação das molas helicoidais permitiu a concepção do dispositivo de deformação mecânica. O comportamento do material polimérico permitiu a concepção do elemento de disparo do sensor. O princípio da deformação mecânica é explicado a seguir.

Uma mola de Ti-Ni é articulada num dispositivo, que funciona como gatilho de disparo do sensor. A mola é mantida na posição de repouso por um pequeno bloco de material polimérico, medindo 50x50 mm de base por 10 mm de altura.

Como o polímero é extremamente solúvel na gasolina, ocorre sua diluição, no momento em que houver o contato dele com a gasolina presente na água, provocando a distensão da mola.

3.3 Concepção do Dispositivo Eletrônico de Monitoramento

Os recursos dos microcontroladores permitiram a concepção do dispositivo de monitoramento. Principalmente, a leitura de sinais de tensão, de pequena intensidade, através de suas entradas analógicas; que permitiu a concepção do sistema de medição de sinal. A corrente elétrica de pequena intensidade, necessária para sensibilizar a mola de Ti-Ni, foi obtida por meio de fonte eletrônica de corrente. O microcontrolador e a fonte de corrente são dispositivos de baixa potência, o que permitiu o uso de uma fonte de tensão, também de baixa potencia elétrica, para alimentar todo o circuito. Isto viabilizou a montagem do conjunto em uma única placa, formando um conjunto simples, compacto e de baixo custo [70,71,72,73,74].

O esquema da figura 3.3 mostra o princípio de funcionamento do dispositivo de medição e transmissão de sinais à distância.

Os principais elementos do circuito são a fonte de tensão Vcc, uma fonte de corrente Icc, um microcontrolador PIC e uma régua de bornes.

A fonte CC tem a função de gerar a corrente que irá circular pela mola.

Do PIC são explorados os seguintes recursos:

- Uma entrada analógica serve para fazer a leitura da ddp gerada nos terminais internos de medição no sensor, operando como um voltímetro;

- Os periféricos de comunicação podem ser configurados para o envio dos sinais via rede de computadores, sistema de rádio freqüência, GPS, microondas, fibras óticas, etc. [75,76]. Desse modo, os valores da ddp medidos no sensor podem ser transmitidos e monitorados em tempo real, à distancia;

- As portas I/O do PIC podem ser utilizadas ainda como entradas e saídas de sinais digitais que podem ser utilizados para os mais diversos fins de controle de processo; como por exemplo, alerta de sinais sonoros, luminosos, interrupção de sistemas de bombeamento, fechamento de válvulas servo-acionadas, etc.[77].

Através da régua de bornes, é feita a conexão dos elementos internos do circuito eletrônico com os dispositivos externos.

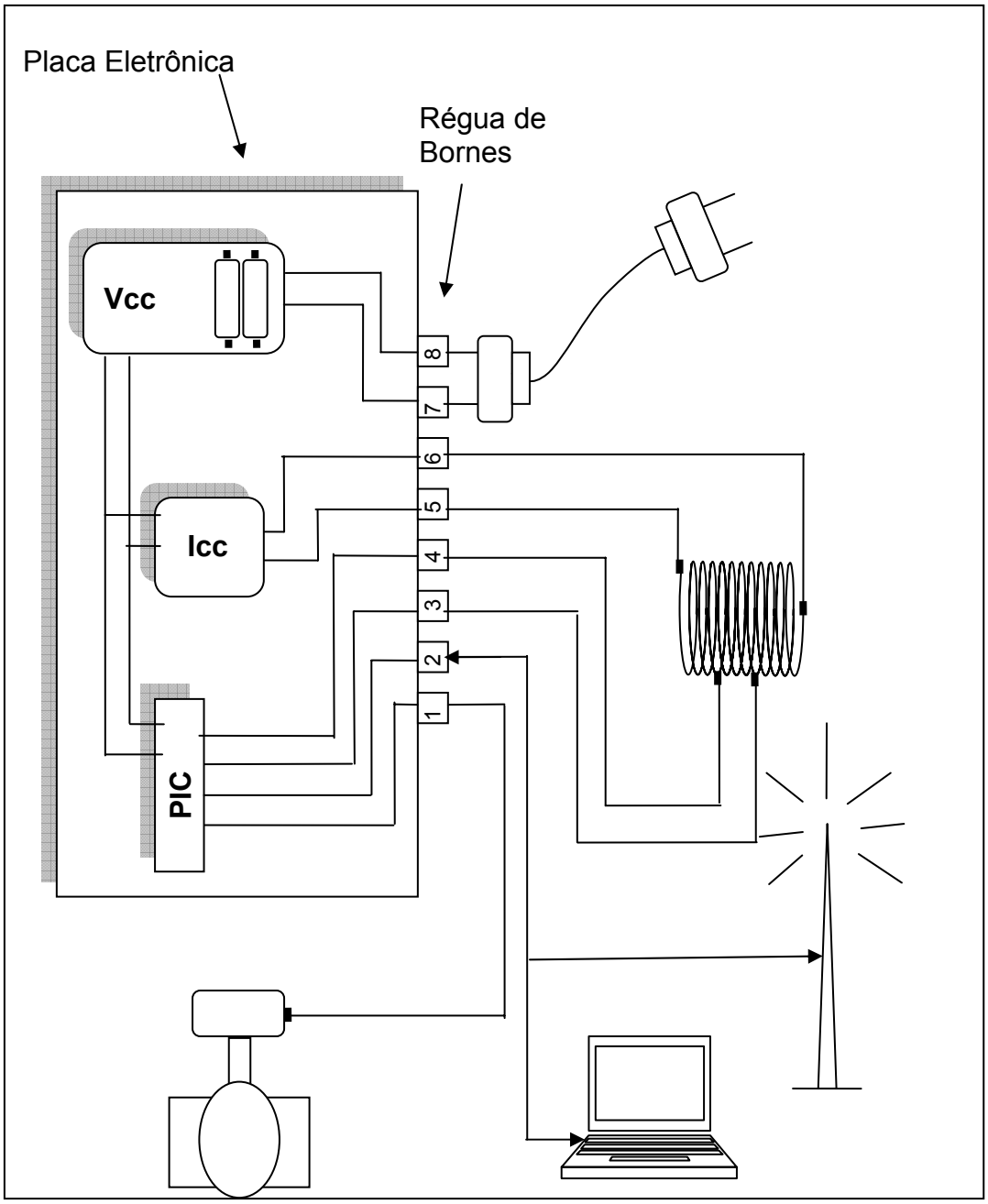


Figura 3.3 - Princípio de funcionamento do sistema de monitoramento e envio de sinais à distância.

O esquema de utilização do PIC também pode ser visto no esquema da figura 3.3 com a seguinte configuração:

- O borne 1 está sendo utilizado para desligar uma válvula servo-acionada por meio de um sinal de corrente vindo de uma saída digital do PIC;

- O borne 2 interliga a porta de comunicação do PIC com os meios externos de transmissão de sinais;

- Os bornes 3 e 4 estão sendo utilizados para interligar a entrada analógica do PIC com os terminais de medição de ddp na mola;
- Os bornes 5 e 6 permitem o fornecimento da corrente CC que percorrerá a mola;
- Os bornes 7 e 8 estão sendo utilizados para interligar as baterias recarregáveis da fonte de tensão à unidade fotovoltaica externa.

O PIC é programado para efetuar leituras consecutivas de valores ddp na sua entrada analógica, segundo um algoritmo de comparação. Um valor máximo de variação de ddp é armazenado na memória e serve de referência para o monitoramento. Essa variação é um pouco menor do que a variação máxima observada entre os valores medidos na mola no estado de repouso e distendida. O PIC faz leituras em intervalos de tempo definidos. O estado das saídas é mantido inalterado enquanto o valor da variação da ddp medida for inferior ao valor de referência. No momento em que esse valor for igual ou maior ao valor de referência, o PIC altera o estado das saídas e comunica o evento através da sua porta de comunicação.

Se ocorrer a ruptura da mola, por algum motivo acidental (por exemplo, impacto com algum corpo estranho que caiu no poço), o circuito elétrico é interrompido, levando sua resistência elétrica ao infinito, uma vez que o circuito estará em aberto. O PIC possui recurso para detectar tal evento e emitir um sinal de falha; sendo possível diferenciar a natureza da causa do sinal: se por vazamento ou se houve falha no sensor.

O fluxograma da figura 3.4 apresenta os principais passos do funcionamento do sistema. Enquanto a mola de Ti-Ni encontra-se comprimida no seu estado natural de repouso, o sistema fica preso em loop, testando ciclicamente a entrada do sensor. Até que este estado se altere e passe a uma rotina definida de energização de saídas e transmissão de sinais.

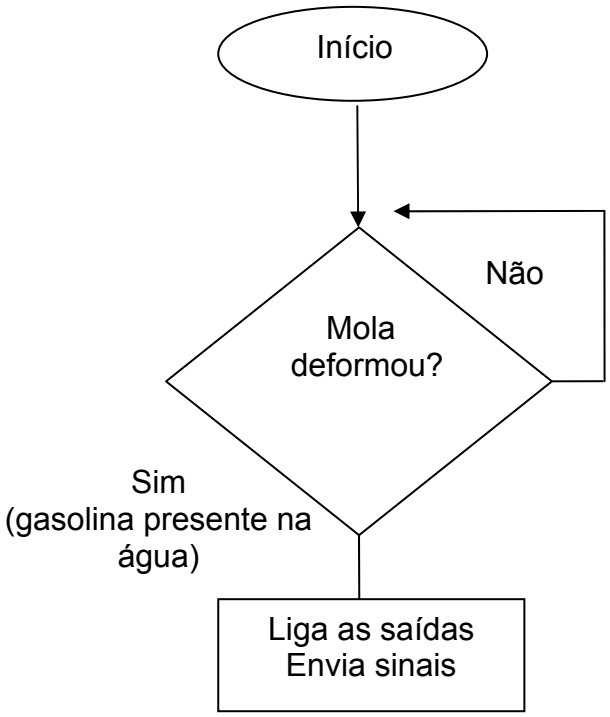


Figura 3.4 - Fluxograma do sistema de monitoramento.

3.4 Princípio de Funcionamento do Protótipo

Esses efeitos foram conjuntamente associados no projeto do protótipo do sistema, através do uso dos componentes dispostos da seguinte forma: a mola, de Ti-Ni, articulada num bloco polimérico, uma fonte de corrente para fornecer a corrente de sensibilização da mola, o microcontrolador para medição e monitoramento da variação da ddp na mola. O princípio é descrito a seguir:

A mola de Ti-Ni permanece no seu estado natural de repouso, enquanto não houver a contaminação. Nesse estado, ela é continuamente percorrida pela corrente fornecida pela fonte. Um mesmo valor de ddp é verificado no interior da mola e medido pela entrada analógica do microcontrolador. Ocorrendo a contaminação por gasolina, o combustível entra em contato com o polímero dissolvendo-o, provocando a distensão da mola de Ti-Ni. A mola, que se encontra no estado superelástico (ver

item 2.2.6), ao se distender, sofre uma transformação martensítica induzida por tensão, ocasionando o aumento da sua resistividade elétrica. Como a corrente elétrica que é fornecida pela placa eletrônica é a mesma, um novo valor de ddp é gerado na mola e essa alteração é informada ao microcontrolador. Este, segundo um algoritmo de programação, pode desencadear uma rotina qualquer de eventos como sinalizações, acionamento ou interrupção de ciclos de operação, envio de sinais à distância e outros.

3.5 Considerações Complementares

Os princípios de funcionamento foram concebidos utilizando-se das características dos materiais e componentes estudados. Os requisitos para o sistema estabelecidos no item 3.1 foram observados.

As informações apontaram para a possibilidade da montagem do sistema. Os principais indicativos são relacionados a seguir:

- O sistema de monitoramento pode ser montado em uma placa de circuito integrado, compacta e de dimensões bastante reduzidas, uma vez que os componentes eletrônicos necessários são de pequenas dimensões;
- Todos os componentes sugeridos são disponíveis, comercialmente, o que sugere um baixo custo de aquisição;
- A concepção do sensor dispensa contatos elétricos, e sugere uso de corrente e tensão elétrica de pequena intensidade. Esses dois fatores tornam desprezíveis a possibilidade de abertura de arco elétrico e geração de faíscas; o que traz segurança na operação do sensor;
- O material sugerido para confecção da mola foi uma liga de Ti-Ni, com efeito memória de forma. Esse material apresenta como principais características: elevada resistência à corrosão; estabilidade química, térmica e dimensional;

- A dispositivo de deformação da mola pode ser confeccionada de material plástico, de elevada resistência à corrosão; estabilidade química, térmica e dimensional;

CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução Geral

Todos os elementos concebidos foram desenvolvidos e testados. Os testes

serviram para verificar se os materiais e dispositivos podiam atender, de fato, aos requisitos funcionais e de desempenho mecânico apontados pela literatura.

A viabilidade do projeto estava condicionada aos resultados desses ensaios. Alguns deles estão relacionados a seguir.

- Verificou-se que os fios de Ti-Ni deveriam ser submetidos a tratamentos termomecânicos para obtenção de molas helicoidais. Foi necessário se verificar se esses tratamentos não levariam o material da mola a perder a propriedade de superelasticidade. Os ensaios de calorimetria de varredura (DSC) foram fundamentais para se avaliar as temperaturas de transformação martensítica da liga utilizada após o tratamento;
- A mola de Ti-Ni precisava ser percorrida por uma corrente elétrica constante, de pequena intensidade, capaz de gerar no seu interior uma ddp também de pequena intensidade. Isto era fundamental para viabilizar o uso de dispositivos eletrônicos para o monitoramento do sinal e garantir níveis seguros de tensão e corrente para operação do sensor na presença de gasolina. Por meio dos ensaios de medição de ddp em condutores foi possível se conhecer a ordem de grandeza desses valores;
- A eficiência do sistema está condicionada à rapidez no tempo de resposta de atuação do sensor. Este tempo era ditado pelo tempo de diluição do polímero e do CAP, que foram testados como gatilho de disparo do sensor. Esses ensaios foram fundamentais para se levantar as curvas de tempo de disparo.
- Os testes de separação dos componentes do CAP, o malteno e asfalteno, serviram para entender melhor o comportamento desse material;
- Os testes do software e hardware do dispositivo eletrônico de monitoramento serviram para comprovar a eficiência do dispositivo;
- Os testes finais de operação do protótipo do sensor serviram para comprovar a eficiência do sistema como um todo.

As metodologias desses ensaios estão descritas detalhadamente nas seções deste capítulo.

4.2 Ensaios de Medição de DDP e DSC

Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados na seguinte ordem:

1- Foi utilizada uma mola helicoidal de dimensão reduzida para testes preliminares de análise do comportamento do efeito memória de forma na mola;

2 - Foi analisado se o comportamento da mola atendia aos requisitos do projeto;

3 - Repetiram-se os testes em molas de diâmetro maiores, para se verificar a repetibilidade do comportamento;

4 - O material das molas foi submetido a ensaios de DSC.

Equipamentos:

As medidas da ddp nos terminais internos das molas foram adquiridas utilizando um dispositivo desenvolvido no Laboratório de Materiais Inteligentes do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, associado a um sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments*, modelo NI 4351. As correntes de sensibilização da mola foram fornecidas por meio de uma fonte de corrente e tensão estabilizadas; a deformação da mola foi realizada por carregamento axial controlado por meio de uma haste de transmissão conectada a um LVDT (linear *variation dislocation transducer*). Um dispositivo próprio de banho térmico programável, da marca Cole Parmer permitiu realizar os ensaios em temperaturas diferentes com controle rígido das temperaturas de ensaio, utilizando óleo de silicone como fluido térmico na mola de 15 mm.

As molas receberam tratamento térmico em um forno a resistência elétrica tipo

mufla, com as temperaturas sendo monitoradas por um termopar tipo K.

Os resultados dos ensaios de DSC foram obtidos em um calorímetro diferencial de varredura da marca e modelo Mettler Toledo 823e.

Métodos

4.2.1 Método de Medição de ddp na Mola de 15mm de comprimento

Para medição da ddp, a mola é conectada ao LVDT, por meio de uma haste de transmissão. Os valores são transmitidos para um sistema de aquisição de dados. Uma fonte eletrônica fornece uma corrente de valor constante, que percorre a mola. Um canal de medição do sistema de aquisição é utilizado para realizar a medição da ddp gerada no interior da mola quando ela é distendida. Os dados de ddp e deslocamento são compilados através de software específico numa mesma tela, permitindo a análise do comportamento da ddp versus deformação.

Um esquema representativo do sistema é demonstrado na figura 4.1.

A ddp foi medida segundo o método dos quatro pontos para medição da variação da resistividade elétrica em condutores; localizando os terminais de leitura da ddp em três configurações diferentes: com 1 espira entre os terminais internos, 2 espiras e 4 espiras, respectivamente (conforme mostrada na figura 4.2.) . Os ensaios foram realizados em duas condições diferentes: 1ª) 25ºC, sem controle de temperatura ambiente, 2ª) Com controle de temperatura em banhos térmicos de 10, 20 30 e 40ºC.

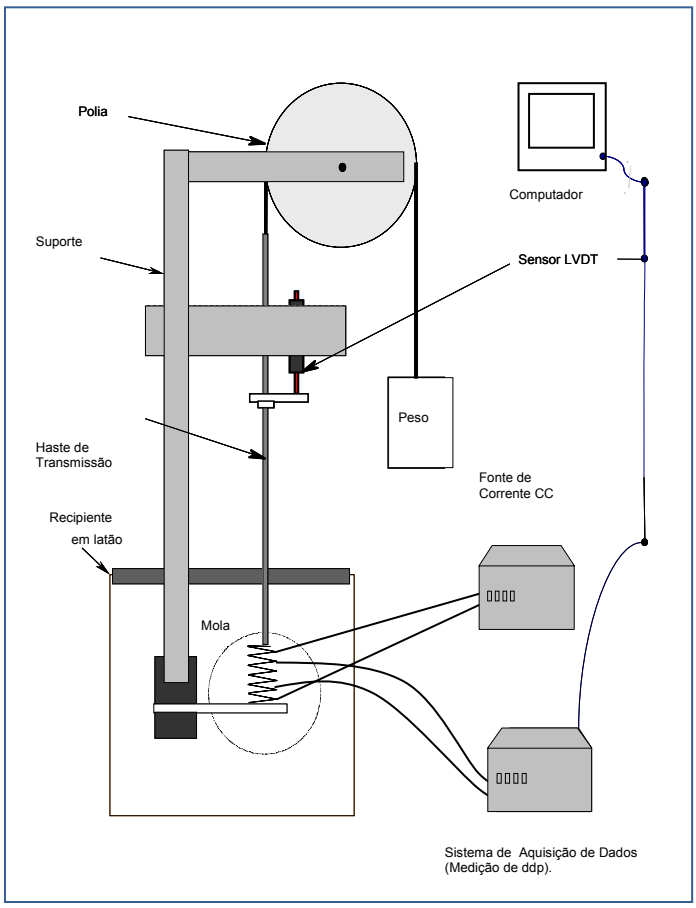


Figura 4.1 – Equipamento utilizado para medição da ddp nos terminais internos da mola.

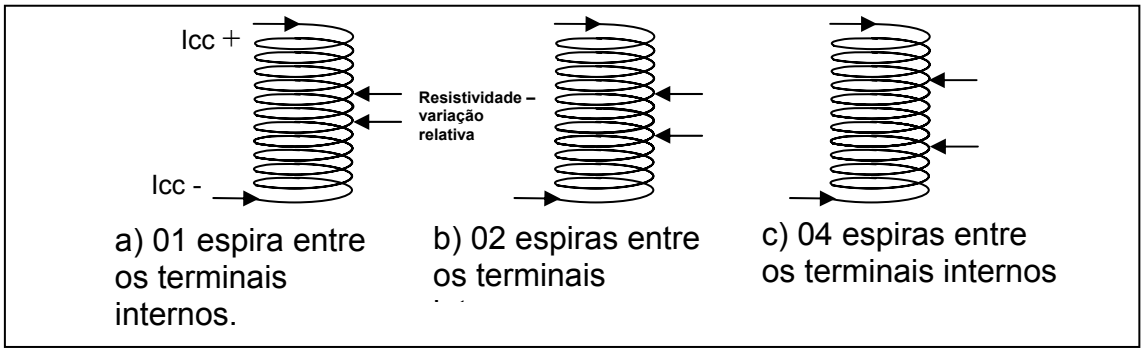


Figura 4.2 - Esquema de disposição dos terminais internos de medição de ddp na mola. a) Com 01 espira entre os terminais. b) Com 02 espiras entre os terminais. c) Com 04 espiras entre os terminais.

A medição de ddp com controle de temperatura foi realizada para se confirmar, em condições reais de variação de temperatura, a superelasticidade da mola nessa faixa. A ddp foi medida sob aplicação de corrente constante igual a

0,5A. Foram realizadas as medições de ddp com a mola em repouso e sendo distendida de 10, 20 e 30 mm respectivamente. As taxas de aquecimento do banho foram estimadas em 5ºC/min.

4.2.2 Método de Medição de ddp em Molas Superiores a 15 mm de Comprimento

O método utilizado foi o mesmo para mola de comprimento igual a 15 mm; porém foram localizando os terminais de leitura da ddp com 4 espiras entre os terminais internos. A temperatura foi de 25º C. As molas foram distendidas até o comprimento final de 3 vezes o seu comprimento nominal e realizadas as leituras de ddp.

4.2.3 Método de Obtenção de Molas de Ti-Ni

Todas as molas utilizadas nos experimentos foram obtidas por tratamento termomecânico, segundo o método de obtenção de molas de Cu-Zn-Al [33]. As principais etapas do método são descritas a seguir:

1) O fio de Ti-Ni é envolvido em torno de um parafuso tendo suas extremidades presas no parafuso;

2) O conjunto é submetido a um tratamento de homogeneização a alta temperatura em um forno de temperatura controlada, seguido de têmpera; conforme esquematizado na figura 4.3. O fio toma o formato de uma mola helicoidal, com diâmetro e comprimento iguais aos do parafuso. O ângulo e espaçamento das espiras são os mesmos das hélices do parafuso.

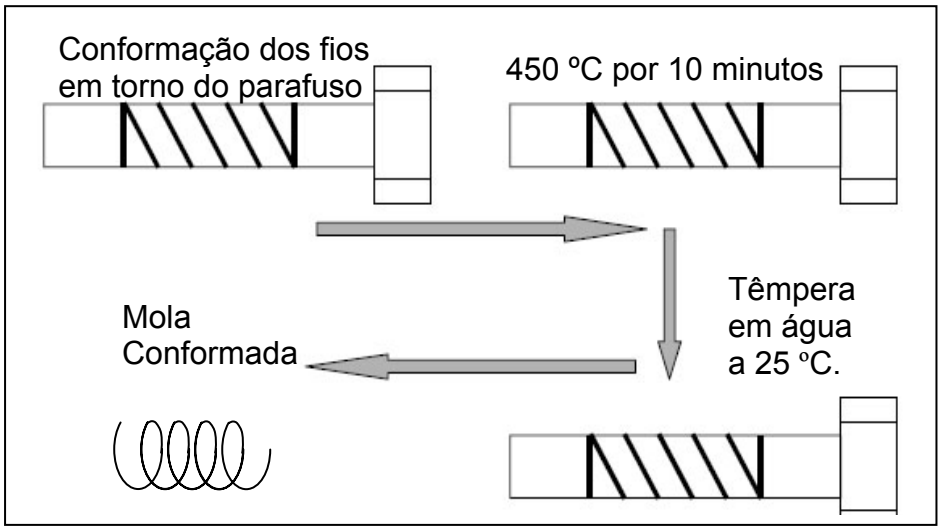


Figura 4.3 - Esquema de conformação termomecânica das molas [33].

As de molas de 15 mm foram submetidas a dois tipos de tratamentos diferentes:

1º) Algumas amostras foram obtidas sendo aquecidas a 450ºC, durante 10 minutos, e têmpera em água a 25ºC;

2º) Outras foram aquecidas a 550ºC, durante 10 minutos, seguido de têmpera em água a 25ºC.

Nas molas de comprimento superior a 15 mm, foi aplicado apenas o 1º tratamento, visto que neste tratamento as propriedades de superelasticidade apropriadas ao projeto puderam ser alcançadas.

Material

- Para os testes preliminares do efeito memória de forma foram confeccionadas molas de 15 mm de comprimento, 5 mm de diâmetro, com 12 espiras ativas.

- Molas de 30 mm de comprimento com 7 espiras ativas de 10 mm de diâmetro foram selecionadas como as de dimensão mais apropriada para aplicação no sensor

(conforme será detalhado mais adiante). Por isso foram utilizadas para testes de funcionamento do protótipo do sistema.

- Molas de outras dimensões foram utilizadas para outras verificações cujos objetivos estão detalhados no capítulo 5.

- Os ensaios de DSC foram realizados com pequenas amostras de fios, com massa aproximada de 10 mg, retiradas das molas utilizadas nos ensaios de medição de ddp (tratados termicamente e sem tratamento térmico). Os fios utilizados são constituídos da liga equiatômica de Ti-Ni (50at%Ti, 50at%Ni).

4.3 Ensaios para Determinação do Melhor Polímero a ser Utilizado como Gatilho de Disparo do Dispositivo de Distensão da Mola

O polímero a ser utilizado como gatilho tinha que apresentar duas características principais:

1 - Ser inerte em água, ou seja, não apresentar nenhuma reação química na presença d'água, nem alteração das propriedades mecânicas;

2 - Possuir uma elevada solubilidade na gasolina; sendo capaz de dissolver-se em curto intervalo de tempo.

O primeiro material a ser exaustivamente testado, por apresentar propriedades bem próximas das exigidas, foi o CAP (Cimento asfáltico de petróleo). Em seguida, foi desenvolvido um material polimérico apresentando um desempenho superior ao CAP.

Ensaios de diluição em gasolina foram realizados para se avaliar o comportamento dos materiais.

4.3.1 Ensaios de Diluição do CAP

Introdução

Os ensaios foram realizados em pequenos blocos de cimento asfáltico de petróleo – CAP, que foram colocados em contato com gasolina em água, para se avaliar a solubilidade e tempo de diluição.

Esse material foi selecionado por possuir um histórico de desempenho mecânico bastante sugestivo para a aplicação como material de gatilho do sensor. Como visto no item 2.13, esse material é comumente utilizado como material impermeabilizante de superfícies na proteção contra umidade. Ou seja, é inerte em água. Além disso, apresenta excelente estabilidade química, resistência mecânica e razoável estabilidade térmica na temperatura ambiente. Essas características atendem o requisito 1 listado no item 4.3 para o material.

Outra característica que motivou o estudo do CAP para aplicação como gatilho foi o fato de ser um material derivado do petróleo, disponível comercialmente no estado sólido; ou seja, possivelmente solúvel em gasolina.

Essa característica se aproxima do requisito 2 apontado no item 4.3 para o polímero desejado.

Método

Cada bloco foi colocado em recipientes cilíndricos de diâmetro e altura definidos, em determinados volumes d'água. Os blocos de CAP foram colocados flutuando nos recipientes e as medições foram realizadas para se levantar as características de diluição do material na gasolina.

O tempo de diluição dos blocos de CAP em recipientes de 100, 150 e 200 mm de diâmetro, respectivamente (com 30 mm de altura de lâmina d'água) foi levantado, a partir da adição de volumes mínimos de gasolina (10, 15 e 20 ml).

Materiais

Foram confeccionados pequenos blocos de CAP, com base quadrada

medindo 50x50 mm, e altura 10 mm.CAP 35/40, marca LWART – PROASFAR QUÍMICA, cujas principais características técnicas foram coletadas da ficha técnica do produto e são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Características técnicas do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 30/45, LWART – PROASFAR QUÍMICA.

Características	Unidade	Mínimo	Máximo
Penetração	0,1 mm	30	45
Ponto de Amolecimento	°C	52	-
Viscosidade Brookfield 135° - SP21 20 RPM	cp	374	-
Viscosidade Brookfield 150° C – SP21	cp	203	-
Viscosidade Brookfield 177°C – SP 21	CP	76	285
RTFOT – Penetração Retida	%	60	-
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	-	8
RTFOT – Ductilidade a 25°C	cm	10	-
RTFOT – Variação em Massa	cm	60	-
Solubilidade em Tricloroetileno	% massa	99,50	-
Ponto de fulgor	°C	235	-
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	-1,5	0,7
Densidade Relativa a 20/4°C	g/cm3	Anotar	
Aquecimento a 175 GC	-	NESP (1)	

(1) NESP – Não espuma

4.3.2 Separação das Principais Frações do Ligante: Maltenos e Asfaltenos

Método

Os testes foram realizados para separar os compostos dos CAP, isolando os maltenos, de modo a serem utilizados como material do gatilho do dispositivo de distensão da mola de Ti-Ni. O principal objetivo desses testes foi obter um bloco que

apresentasse um menor tempo de diluição.

Os maltenos são os componentes do CAP menos reativos com a água, por possuírem baixa polaridade (ver item 2.13.2). Sendo assim, apresentam melhores características de dissolução na gasolina, sem perder a estabilidade na água.

A extração dos asfaltenos foi realizada através de uma adaptação da norma IP-143 [78], que descreve a metodologia para quantificação das frações pesadas em petróleo. O método para a extração consistiu em misturar 5,0 g de CAP com o solvente hexano na razão 1:40. A solução foi agitada por 72 horas em um agitador magnético de bancada QUIMIS. Em seguida, o material foi retirado do agitador e filtrado, em filtro Whatman 1. Na parte filtrada, estão os compostos de maltenos e no sólido retido no filtro estão os asfaltenos.

Os compostos de maltenos foram secados em estufa a 70°C, por 15 min, para extração parcial dos solventes, e o material final foi testado como revestimento de corpos de prova, para se avaliar as propriedades mecânicas do revestimento e do comportamento frente à água e à gasolina.

Materiais

O material foi o mesmo usado nos ensaios de diluição. O CAP 35/40, marca LWART – PROASFAR QUÍMICA.

Após a obtenção do malteno, por filtragem, aplicou-se o material sobre pequenos blocos cilíndricos prensados de alumina, com grau de pureza igual a 99%. Os blocos tinham 10 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

4.3.3 Ensaios de Diluição do Material Polimérico

Método

Os ensaios foram realizados em pequenos blocos do material colocados em contato com gasolina em água, para se avaliar a solubilidade e tempo de diluição. Foram confeccionados pequenos blocos, com base quadrada medindo 50x50 mm, e altura 10 mm. Cada bloco foi colocado em recipientes cilíndricos de diâmetro e altura definidos, em determinados volumes d'água. Os blocos do material polimérico foram colocados flutuando nos recipientes, e as medições foram realizadas. Foram realizados os seguintes ensaios:

1 - Estimativa da concentração mínima de gasolina, num volume definido de água, capaz de acionar o sensor; aqui chamada de "concentração mínima de disparo";

2 - Levantamento da curva de tempo de disparo do sensor, com o aumento da concentração de gasolina, em volume específico.

3 - Análise do comportamento da curva de tempo de disparo, com o aumento do volume d'água.

4 – Análise do comportamento da curva de tempo de disparo, com o aumento do da área de contato da gasolina (com aumento do diâmetro do tubo).

5 - Avaliação da perda de resistência à compressão do bloco, imerso em água, sob a pressão do dispositivo mecânico de distensão da mola.

6 - Avaliação da influência do grau de salinidade da água na resistência à compressão do bloco.

Os detalhes dos métodos e os resultados estão apresentados no item 5.15.

Material

O Material polimérico foi testado no Laboratório de Materiais Compósitos - COMPOLAB, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, para avaliar suas principais propriedades. Os principais resultados, e as respectivas normas de referência utilizadas nas medições, estão apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Principais características do Material Polimérico.

Propriedades	Norma	Unidade	Valor
Densidade nominal	NBR 11949	Kg/m3	15,00
Densidade Mínima	NBR 11949	Kg/m3	13,00
Tensão por compressão com deformação de 10%	NBR 8082	KPa	≥70
Absorção de água	ABNT NBR 7973	g/cm2x100	≤1
Toxidade			Atóxico
Flamabilidade	NBR 11948/80		Retardante a chama

- Gasolina Comum

A gasolina utilizada foi um produto da PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A, Código do produto 01.000.078- gasolina comum – LI; cujas características principais estão apresentadas nas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 - Características gerais da gasolina comum. BR- DISTRIBUIDORA S/A.

PRODUTO: GASOLINA COMUM	
PREPARADO	
Natureza química	Hidrocarboneto e álcool
Sinônimos	Gasolina, gasolina C
Ingredientes ou impurezas contribuam para o perigo	Hidrocarbonetos saturados: 27-47% (p/p); Hidrocarbonetos olefínicos: 15-28% (p/p); Hidrocarbonetos aromáticos: 26-35% (p/p); Álcool etílico anidrido combustível (CAS 64-17-5): 13-25% (p/p); Benzeno (CAS 71-43-2): < 1% (p/p).

Tabela 4.4 - Características específicas da gasolina comum, produto cod. 01.000.078- BR DISTRIBUIDORA S/A.

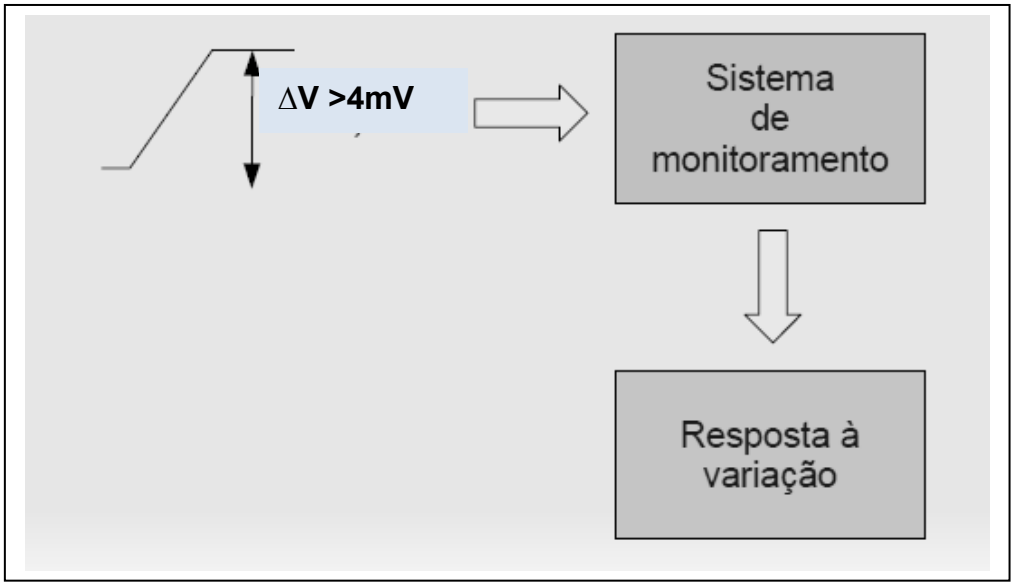
Cód. Produto 01.000.078		Nº Lote controle 050000478098	Cliente LINS & LEITE LTDA	
Característica	Und	Especificação	Resultado	Método

		Lim.Inf.	Lim.Sup		
Aspecto límpido e isento de impurezas				Corresponde	Visual
Cor incolor/amarelada isenta de corante				Conforme	Visual
Destilação:10%	ºC		65	54	D86
Destilação:50%	ºC		80	74	D86
Destilação:90%	ºC	145	190	175	D86
Destilação:PFE	ºC		220	208	D86
Massa específica a 20/4ºC	Kg/m3			750	D1298
Resíduo	%		2,0	1,0	D86
Álcool etílico anidro	%(V)	24,0	26,0	25,0	NBR 13992

4.4 Testes No Protótipo

4.4.1 Método de Testes da Parte Eletrônica de Aquisição e Processamento de Dados

Foram utilizados os recursos do microcontrolador para medição da variação de ddp nos terminais internos da mola de Ti-Ni. Os valores medidos foram monitorados através de um LCD e um LED; que informavam cada vez que a diferença entre duas medições consecutivas era maior que a diferença máxima armazenada na memória do PIC como valor de referência (4mV). Isso aconteceu sempre que a mola de Ti-Ni foi distendida de três vezes o seu comprimento nominal. Nessa condição, ocorre a indução da fase martensita na sua estrutura, por deformação, acompanhada de um aumento de resistividade do material. Como a mola é percorrida por uma corrente elétrica constante de 0,5 A, um novo valor de ddp (4mV) é gerado no momento da distensão, provocando o estouro de range programado, sinalizando o evento. A figura 4.4 mostra o diagrama de blocos do funcionamento geral do sistema.



A figura 4.4 - Diagrama de blocos do funcionamento geral do sistema.

Material

O microcontrolador utilizado foi o PIC16F877A, da Microchip, que possui as seguintes características principais:

- 5 conjuntos de portas de entrada e saída (total de 33 portas);

- Conversor analógico-digital de 10 bits de resolução e 8 canais de entrada;

- Periférico de comunicação paralela e serial;

- 2 Módulos CCP (Comparação, Captura e PWM);

- 3 *Timers* (1 de 16 bits e 2 de 8 bits);

O PIC16F877A é mostrado na figura 4.5.

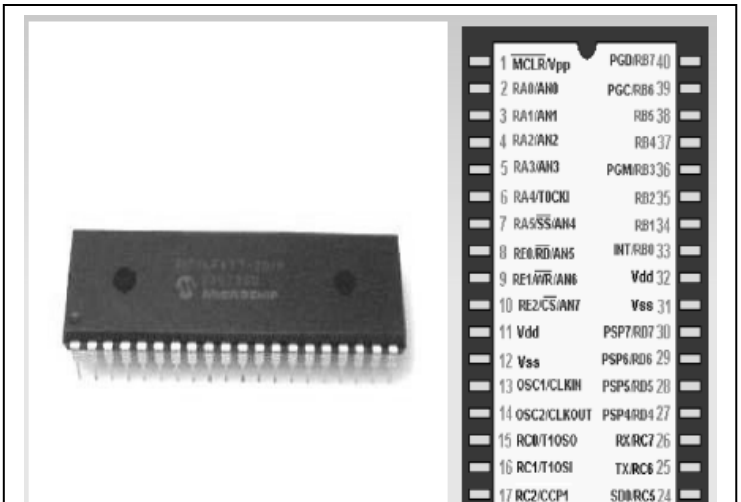


Figura 4.5 - PIC 16F877A da Microchip [79].

4.4.2 Método de Desenvolvimento do Hardware do Sistema

No sistema projetado, houve a necessidade de amplificação do valor de ddp gerado na mola de Ti-Ni, que foi de aproximadamente 4 mV. A ordem de grandeza desse valor é muito baixo quando comparado com a incerteza de medição estimada para o PIC16F877A, que é de 0,019607843V, ou seja, aproximadamente 2mV (como será mostrada mais adiante).

Foi necessário se calcular um fator capaz de amplificar o sinal adequado à resolução do módulo de conversão analógica/digital do microcontrolador para que fosse possível ser realizada a adequada aquisição de dados.

A amplificação do sinal foi possível por meio do uso de um amplificador de instrumentação. O diagrama de blocos mostrado na figura 4.6 dá a noção do fluxo do processo de aquisição de dados.

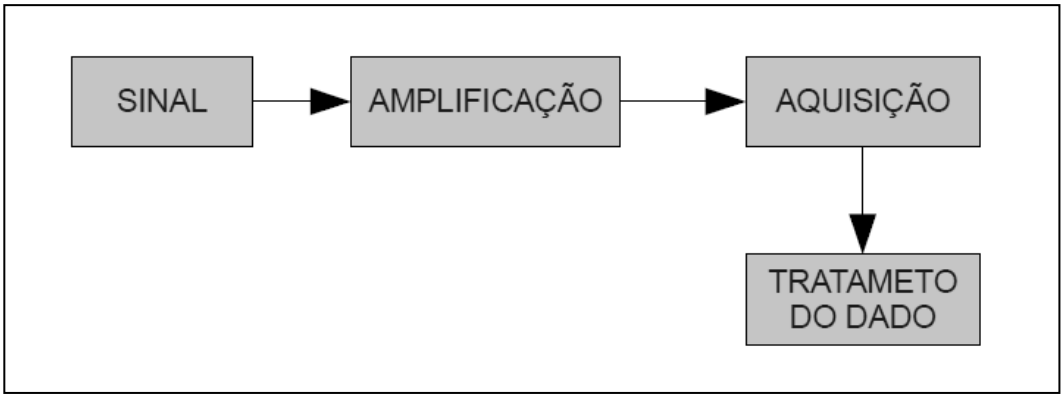


Figura 4.6 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

Após o desenvolvimento do sistema de aquisição, foi desenvolvido um software para processar a lógica de monitoramento do valor digitalizado da tensão, ou seja, realizar o tratamento de dados. Essa etapa é a parte da programação do projeto.

- Detalhes do Projeto de Amplificação do Sinal:

O estágio de amplificação é um estágio necessário em todo projeto de aquisição de dados por oferecer ao sinal amplificação e confiabilidade.

A amplificação trivialmente é necessária para amplificar sinais de baixa intensidade para um múltiplo valor desejado de uma grandeza específica.

No caso de amplificador de tensão, temos a seguinte fórmula

V Saída=K V Entrada (4.1)

Sob a perspectiva de que sinais indesejados (ruídos) podiam ser amplificados junto com o sinal de monitoramento, foi necessária a aplicação de técnicas diferenciadas para amplificar unicamente o sinal desejado. Desse modo, o processo de amplificação do sinal não consistiu apenas em amplificar o sinal, mas também eliminar os ruídos de modo comum. O diagrama mostrado na figura 4.7 dá uma noção do processo de eliminação de ruídos.

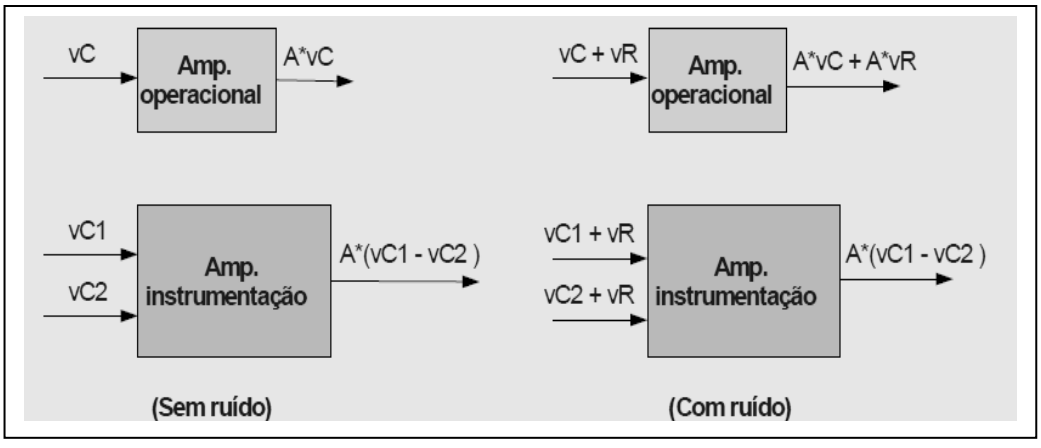


Figura 4.7 - Diagrama do processo de condicionamento de sinais com ruídos. O diagrama mostra que o uso dos amplificadores de instrumentação elimina o ruído na amplificação.

Foi utilizado um amplificador de instrumentação com a função de filtragem de ruídos.

- Detalhes do Esquema Elétrico do Sistema

Foram utilizados os seguintes componentes na composição do hardware do sistema:

- PIC16F877A;

- LCD (Mostrador de Cristal Líquido);

- Fonte de corrente (projetada);

- Transistor TIP122;

- LEDs;

- Resistores;

O diagrama elétrico utilizado é mostrado na figura 4.8.

O circuito foi projetado para ser alimentado a partir de um único ponto, utilizando uma fonte de tensão elétrica dc de 5V com capacidade máxima de corrente de 500mA. O circuito é apresentado na figura 4.8.

A fonte será responsável por alimentar todo o sistema inclusive a fonte de corrente.

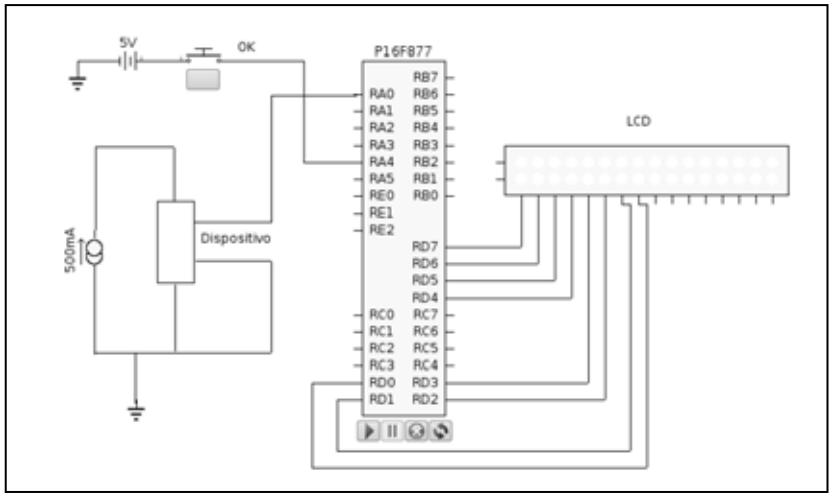


Figura 4.8 - Diagrama elétrico do sistema de monitoramento de sinais.

- Detalhes do Projeto do Circuito de Sinalização

Foi utilizado no circuito de sinalização um led de cor vermelha conectado ao pino RB6, uma entrada digital do microcontrolador, que foi programada para indicar a ultrapassagem do valor de referência de ddp, ou seja, sinalizar que houve um estouro de range. O sistema monitora um $\Delta V = 4$ mV. Caso ultrapasse o LED indica.

Foi utilizado também um circuito adicional de sinalização usando um LCD (*display cristal liquid*). O PIC foi programado para sinalizar através do LCD os seguintes estados de operação do circuito:

- “Operação” – depois de energizado o circuito, uma informação é projetada no visor do LCD, informando que o dispositivo está habilitado para iniciar o monitoramento;
- “Aquisição” – Essa informação aparece no visor do LCD durante o período no qual o PIC permanecer fazendo a leitura de valores de ddp através da sua entrada analógica. O PIC permanecerá nesse estado enquanto não houver estouro do range programado;
- “Estouro de Range” – Esta informação aparece no visor do LCD no instante em que o valor de ddp monitorado for excedido.

A informação anterior é sinalizada, simultaneamente, pelo acendimento do LED. Nesse caso, o LED pode ser considerado como o atuador do circuito. Ao invés do LED, outros atuadores poderiam ser acionados por meio desse sinal; como, por exemplo, sinalizador sonoro, como uma buzina, ou até mesmo interromper a operação de bombas hidráulicas.

O esquema apresentado na figura 4.9 mostra o diagrama de blocos detalhado do circuito geral do dispositivo.

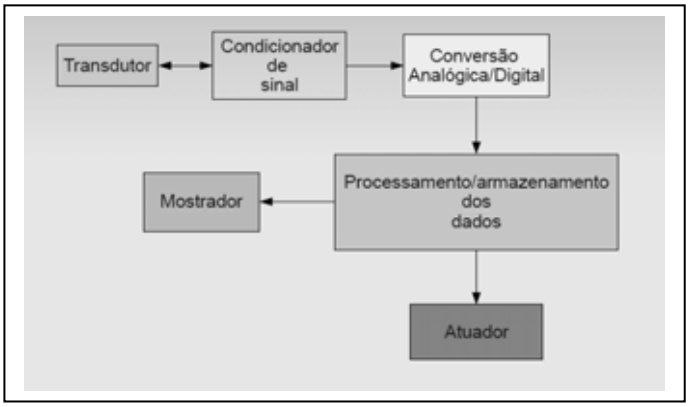


Figura 4.9 - Diagrama de blocos detalhado do circuito geral do dispositivo de monitoramento.

O PIC16F877A faz a aquisição de dados analógicos e converte em digital para o tratamento e monitoração da tensão elétrica do dispositivo. Considera-se o dispositivo com o sinal após o estágio de amplificação.

- Detalhes do Projeto da Fonte de Corrente

O projeto da fonte de corrente utilizou a configuração de espelho de corrente para se obter o valor e estabilidade desejados. A figura 4.10 mostra o circuito do espelho de corrente utilizado.

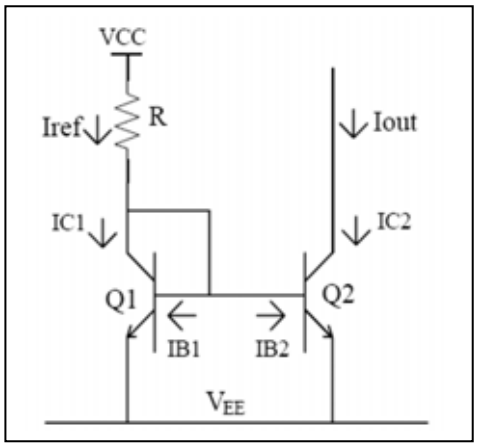


Figura 4.10 - Circuito do espelho de corrente elétrica utilizado no dispositivo de monitoramento.

Foi utilizado no coletor do primeiro transistor, um resistor 20R e no coletor do segundo transistor, um resistor 12R.

A necessidade do uso de transistores no projeto do espelho de corrente requereu uma atenção especial quanto às características de desempenho daqueles componentes; uma vez que os transistores são sensíveis à variação de temperatura (ver item 2.7.2). Desse modo, uma variação de temperatura poderia ocasionar uma variação na intensidade da corrente de sensibilização da mola de Ti-Ni, que, por sua, vez poderia acarretar um aumento da ddp na mola, e uma possível sinalização de estouro de range, sem que necessariamente houvesse a distensão da mola.

Foram selecionados transistores com valores de β muito maiores que 1 na configuração do espelho de corrente, de modo a eliminar a dependência da temperatura. Conforme demonstrado a seguir:

$$I_{OUT} = \frac{I_{REF}}{1+ \beta/2} \qquad (4.2)$$

Se $\beta \gg 1 \rightarrow I\ OUT = IREF$ (4.3)

Onde,

$$I_{REF} = \frac{V_{cc}}{R} \qquad (4.4)$$

4.4.3 Método de Desenvolvimento do Software do Sistema

- Definição do Sistema de Conversão Analógica/Digital

Na configuração do microcontrolador, foi adotada a conversão de 8 bits por simplificar o algorítmo do software.

A Resolução na conversão digital de 8 bits é de 0,019607843 V conforme mostrada na tabela 4.5. No projeto há a necessidade de se monitorar uma variação

de tensão de 4 mV. Porém os dados do microcontrolador PIC16F877A mostram que o mesmo não dispõe de tal resolução, pois ele possui uma resolução de 0,019607843 V. Essa limitação foi contornada, utilizando-se a amplificação do sinal, conforme explicado no item 4.4.2.

- Análise da Precisão na Conversão Analógica/Digital

O erro absoluto associado à conversão analógica/digital é menor ou igual à resolução do microcontrolador, que é de 0,019607843 V.

A Microchip garante que conversão analógica possui uma incerteza de mais ou menos 1 LSB (bit menos significativo).

Esse valor pode ser calculado como segue:

$$u_{MI} = \frac{V_{referência}}{2^n} \qquad (4.5)$$

Onde

n - n° de bits do conversor A/D

Vreferência - é o valor de tensão adotado como referência na conversão A/D.

Tabela 4.5 - Resolução na conversão digital de 8 bits.

BIT	TENSÃO (V)
8	2,509803904
7	1,254901952
6	0,627450976
5	0,313725488
4	0,156862744
3	0,078431372
2	0,039215686

1	0,019607843

Como n = 8 bits e Vref = 5 V

Temos, então:

$$u_{MI} = \frac{5}{2^8}$$

U_{MI} = 0,019607843 V.

4.4.4 Método do Teste de Funcionamento do Protótipo

O protótipo foi montado e testado num recipiente de 100 mm de diâmetro com uma lâmina d'água de 30 mm de altura. O protótipo foi posto flutuando na água e então se adicionou gasolina de 10 em 10 ml ao recipiente, simulando um processo gradativo de contaminação da água.

Os testes mais importantes realizados no protótipo tiveram por objetivos:

1- Verificar o "Tempo de resposta de sinalização", ou seja, o tempo decorrido entre o instante de adição da gasolina na água e o instante de acionamento do led.

2- Verificar se a variação da corrente (fornecida pela fonte de corrente), para sensibilizar a mola, não provocava uma ddp > 4mV;

3- Verificar a precisão na resposta de sinalização quando a mola se distendia.

Outras verificações realizadas são descritas no capítulo 5.

Utilizou-se, para alimentação elétrica da placa eletrônica, uma fonte CA/CC entrada: 100-240V~50/60Hz; saída 5,0V - 0,550A. O aspecto final da placa eletrônica é mostrado na figura 4.11, enquanto o do protótipo é mostrado na figura 4.12. A configuração geral do sensor e as interligações dos vários componentes do sistema podem ser vistas na figura 3.3 (ver item 3.3)

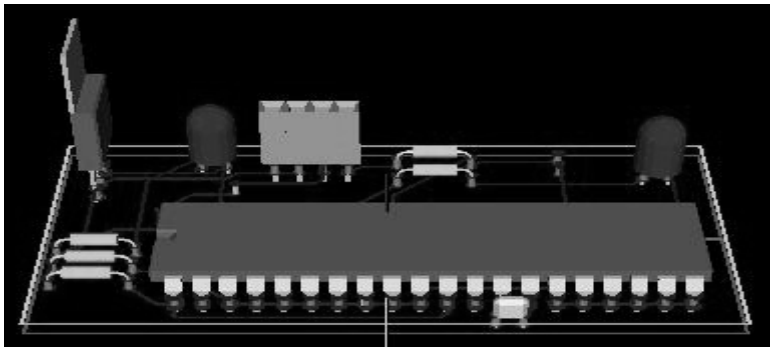


Figura 4.11. Aspecto geral da placa eletrônico do sensor.

O PIC foi programado para sinalizar a contaminação através do acionamento de um led. Poderia ter sido programado para gerar um sinal a partir do qual se poderia acender uma lâmpada, acionar uma sirene, enviar uma mensagem à distância via internet, através de uma rede de comunicação, etc.

Uma análise criteriosa do desempenho dos componentes do sensor foi necessária. O comportamento individual das molas foi estudado e depois do dispositivo de distensão.

Alguns requisitos foram pré-estabelecidos para as molas (conforme será detalhado adiante no item 5.9). As características dimensionais e de desempenho mecânico das molas e do dispositivo foram projetadas de modo a atender aqueles requisitos.

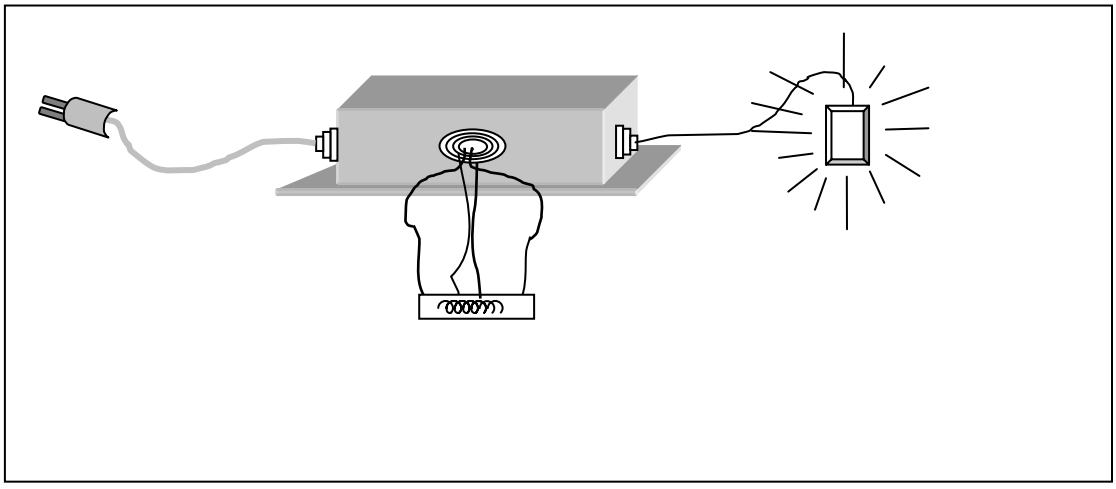


Figura 4.12 - Aspecto final do protótipo.

4.5 Método de Análise do Desempenho Mecânico do Sensor

As curvas de deformação versus deslocamento das molas de Ti-Ni foram levantadas. Depois, a mola do dispositivo de distensão foi selecionada com a constante elástica maior, e feita análise do balanço de forças para se avaliar se o dispositivo teria força suficiente para distender a mola de Ti-Ni. Ao final, foram analisados os esforços de compressão sobre o bloco polimérico, para verificar se não ocorria o esmagamento do bloco por esforço excessivo.

Os resultados são apresentados no item 5.11.

Um dispositivo desenvolvido no laboratório de materiais inteligentes da UFPE foi utilizado para levantamento das constantes elásticas. Massas padronizadas foram adicionadas às molas e um sistema de aquisição de dados mediu os deslocamentos. As curvas foram geradas por meio do programa *OriginPro8*, da *OriginLab Corporation*.

Para se avaliar a força exercida pelo dispositivo de distensão da mola, foi feita uma pequena adaptação ao sistema utilizado para levantamento da constante elástica da mola de Ti-Ni, onde foi possível se levantar a curva “força versus deformação” do dispositivo. As figuras 4.13 e 4.14 mostram o esquema utilizado.

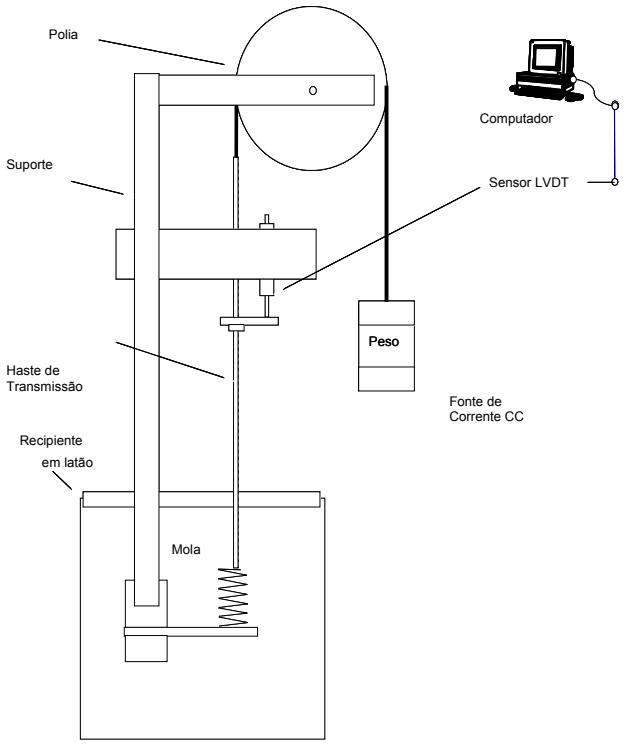


Figura 4.13 - Equipamento utilizado para definição da constante elástica da mola de Ti-Ni, comprimento nominal de 30 mm.

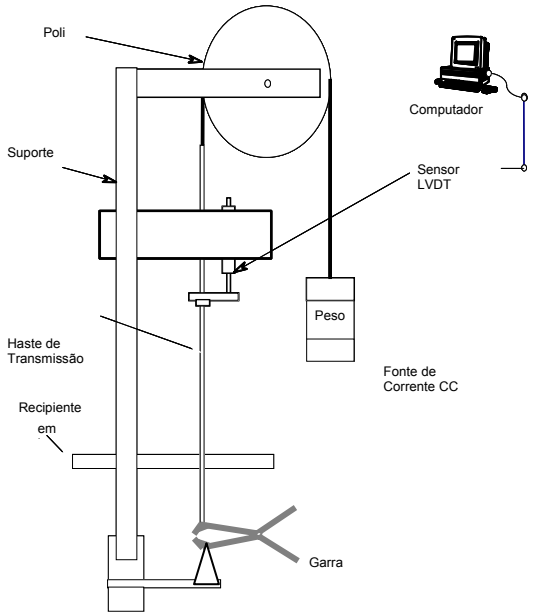


Figura 4.14 - Equipamento utilizado para definição da curva força versus deformação do dispositivo de distensão da mola.

4.6 Considerações Complementares

Neste capítulo, foram reunidos todos os procedimentos metodológicos necessários à investigação do comportamento dos componentes do sistema. Há métodos que já possuem metodologia própria como os de medição de ddp e curvas de DSC. Outros, porém, tiveram que ser adaptados como o método de separação do CAP. Os métodos de diluição dos blocos do material polimérico e de CAP são inéditos e tiveram de ser desenvolvidos de acordo com o objetivo pretendido. Os testes de funcionamento dos sistemas eletrônicos também tiveram que ser elaborados de acordo com as necessidades do projeto. Essas metodologias formaram as bases necessárias para análise do desempenho funcional do protótipo.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução Geral

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos segundo os procedimentos experimentais descritos no capítulo anterior. Basicamente, são apresentados os resultados dos três assuntos principais abordados no trabalho:

- Medição da diferença de potencial (ddp) ou tensão elétrica em molas helicoidais de Ti-Ni;
- Obtenção das curvas das temperaturas de transformação martensíticas do material das molas, por DSC;
- Ensaios para determinação da sensibilidade de resposta, do material polimérico e do cimento asfáltico de petróleo, de detecção da gasolina na água.

Adicionalmente, esse capítulo apresenta as curvas de tensão-deformação das molas de Ti-Ni e do dispositivo de distensão com os cálculos das constantes

elásticas das mesmas. Esses dados foram abordados neste capítulo por fazer parte dos resultados das análises do desempenho mecânico do dispositivo de distensão da mola de Ti-Ni.

5.2 Ensaios de Medição de ddp na Mola de 15 mm em Temperatura Ambiente

RESULTADOS

O valor ideal de corrente para sensibilizar a mola de Ti-Ni é de 0,5A. Esse é um valor comumente fornecido por fontes de corrente eletrônicas configuráveis em placas de circuito integrado. Esse valor atende a dois requisitos importantes estabelecidos para o sistema: 1) Valor de pequena intensidade; 2) Valor obtido por meio de fonte de baixo custo. Por esses motivos, I = 0,5A foi o valor escolhido para se fazer os experimentos.

Conforme previsto no item 4.2.1, os ensaios de ddp foram realizados com três disposições diferentes dos terminais de medição. A tabela 5.1 mostra os resultados consolidados das três configurações, para a corrente de 0,5 A.

O valor ∆Vmax é calculado pela subtração do valor máximo da tensão menos o mínimo. Esses valores são obtidos com a mola distendida e em repouso, respectivamente. A figura 5.1 mostra o gráfico correspondente.

Tabela 5.1 - Medição de tensão feita na mola de 15 mm em três configurações diferentes com a corrente de 0,5 A.

Configuração (n° de espiras entre os terminais)	Deformação (mm)				∆Vmax (mV)
	0,00 mm	10,00 mm	20,00 mm	30,00 mm	
	Tensão (mV)				
1	48,5	49,8	51,1	52,5	4,0
2	79,4	81,8	82,5	84,1	4,7
4	128,9	130,3	131,8	133,7	4,8

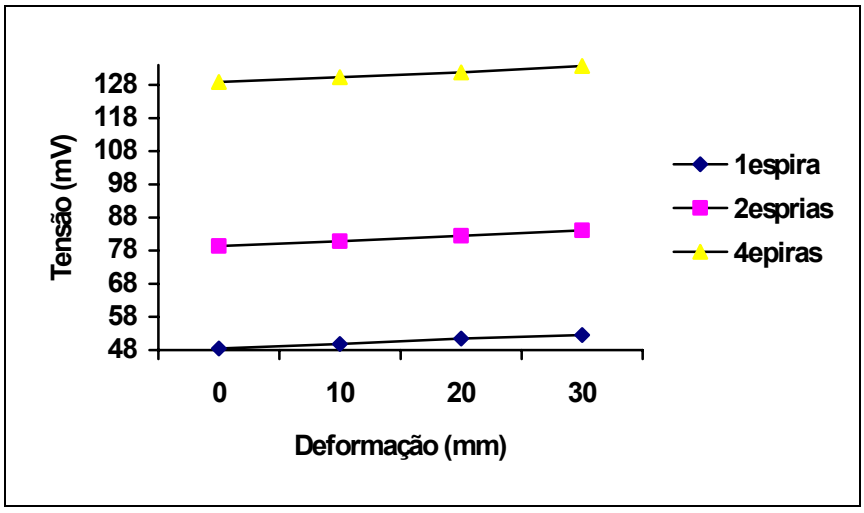


Figura 5.1 - Gráfico da tensão elétrica na mola de Ti-Ni, em três configurações diferentes dos terminais de medição. Corrente de ensaio de 0,5A.

DISCUSSÕES:

A ordem de grandeza da corrente de sensibilização da mola e o valor da ddp foram satisfatórios ao desenvolvimento do projeto, segundo confirmam os resultados abaixo:

1 - A corrente de sensibilização de 0,5A foi capaz de gerar um valor de ΔVmax de aproximadamente 4,5 mV em todas as configurações;

2 – Foi possível obter 133,7mV na configuração com 4 espiras entre os terminais de medição.

- Considerações importantes:

Os resultados apontaram a viabilidade técnica do uso dos seguintes dispositivos eletrônicos para o monitoramento dos sinais:

1 - Sistema eletrônico de geração da corrente para sensibilização da mola (fonte de corrente de 0,5 A):

Que pode ser montado em placa eletrônica de baixo custo e dimensões bastante reduzidas;

2 - Sistema de medição da ddp nos terminais da mola (medição de sinal analógico de tensão contínua, ddp máxima menor que a capacidade de leitura do microcontrolador):

É viável o uso de entradas analógicas de microcontroladores para esse fim, uma vez que medições nesse nível de tensão são perfeitamente usuais nesses tipos de dispositivos;

3 - Sistema de aquisição, tratamento de sinal de tensão e comunicação:

A ordem de grandeza da corrente e tensão elétrica necessária ao funcionamento do dispositivo sensor é perfeitamente compatível com microcontroladores. Isso permite que todos os recursos desses dispositivos possam ser utilizados no monitoramento; como por exemplo, sinalização por alarmes sonoros ou luminosos, interrupção de processos, comunicação à distância via rede de computadores, internet, radiofrequência, microondas, fibra ótica, GPS, e outros.

Um tratamento digital dos dados pode ser incrementado para determinar rotinas de programa subsequentes ao evento.

5.3 Ensaios de DSC

Os ensaios de DSC foram aplicados para verificar quais os efeitos do tratamento térmico nas propriedades de superelasticidade do material. Esse tratamento foi aplicado aos fios para obtenção das molas de Ti-Ni na forma de mola helicoidal. Pois não foi possível conformar o material pelo método convencional de obtenção de molas.

O método convencional consiste em envolver um fio metálico em torno de um parafuso com suas extremidades presas ao mesmo. O fio sofre esforço de torção e passa por um processo de conformação mecânica, tomando a forma de uma mola helicoidal, com diâmetro e comprimento iguais aos do parafuso. O ângulo e

espaçamento das espiras são os mesmos das hélices do parafuso.

Os fios utilizados apresentam a temperatura Af = 19°C. Portanto superelástica na temperatura ambiente. Desse modo, quando suas extremidades são desprendidas do parafuso, o fio recupera o seu estado original. Por isso foi aplicado o mesmo método de conformação termomecânica utilizado para obtenção de molas de Cu-Zn-Al (conforme descrito no item 4.2.3) como tentativa de obtenção da mola.

A mola foi obtida com sucesso, mas, como o material foi submetido a aquecimento a alta temperatura e resfriamento brusco, foram necessários os ensaios de DSC para levantamento das curvas de transformação do material.

RESULTADOS

As figuras 5.2 e 5.3 e 5.4 mostram detalhes das curvas DSC, destacando as temperaturas de transformação de fase ocorridas na mola.

Os picos à direita e à esquerda do gráfico da curva são atribuídos ao instante em ocorre a transformação de fase. O pico da esquerda corresponde à transformação austenítica. O valor *endset* equivale à temperatura final austenítica Af; enquanto o *onset* equivale à temperatura inicial As. O pico da direita corresponde ao instante da transformação martensítica. O valor *endset* deste pico equivale à temperatura final martensítica Mf; enquanto o *onset* equivale à temperatura inicial Ms.

As curvas foram obtidas pelo ensaio de um fio Ti-Ni tratados a 450°C, 550°C e sem sofrer tratamento.

Com esses resultados, foi possível conhecer as temperaturas de transformação de fase da mola sem tratamento térmico e após ter sofrido tratamento, e, com isso, confirmar a manutenção da superelasticidade da mola na segunda condição. Foi possível conhecer também a temperatura de estabilização da austenita

(Af=-0,63ºC, para fio tratado a 450°C) e, com isso, prever que a mola apresenta mudança de resistividade elétrica predominantemente pelo efeito de deformação mecânica acima desta temperatura (com improvável alteração com a variação da temperatura ambiente).

- Considerações importantes:

1 - A mola manteve a propriedade de superelasticidade após sofrer tratamento térmico:

A aplicação do mesmo procedimento utilizado para obtenção de molas, à base de ligas de Cu-Zn-Al, trouxe excelente resultado, uma vez que, além de estabilizar o fio na forma desejada, não alterou sua propriedade de superelasticidade, que era fundamental para o funcionamento do sensor.

2 - Temperaturas Af acima de 18º para molas sem tratamentos e abaixo de 0ºC para molas tratadas termicamente:

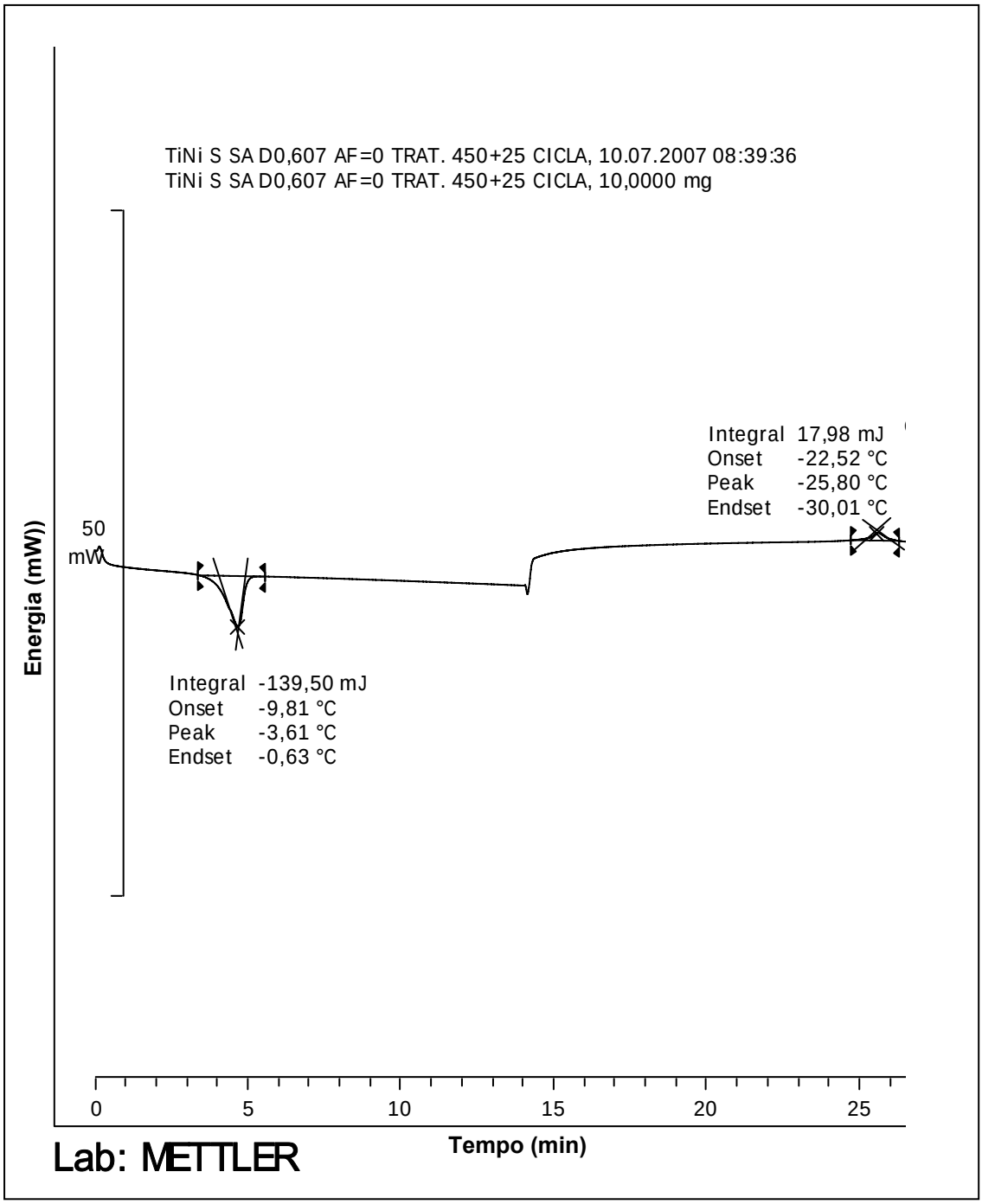


Figura 5.2 - Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni tratada termicamente (aquecida a 450°C por 10 minutos, resfriada a 25°C).

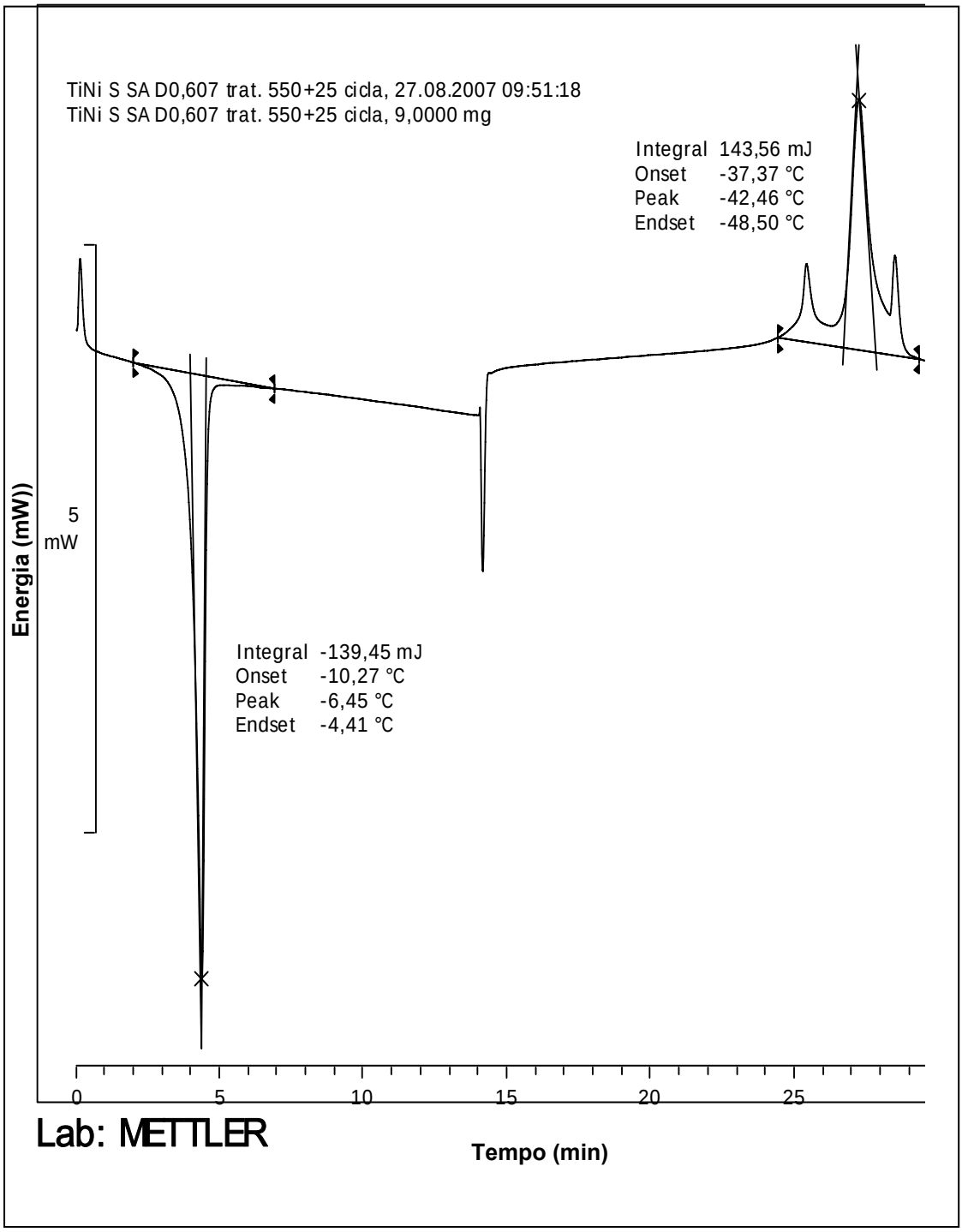


Figura 5.3 - Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni tratada termicamente (aquecida a 550°C por 10 minutos, resfriada a 25°C).

.

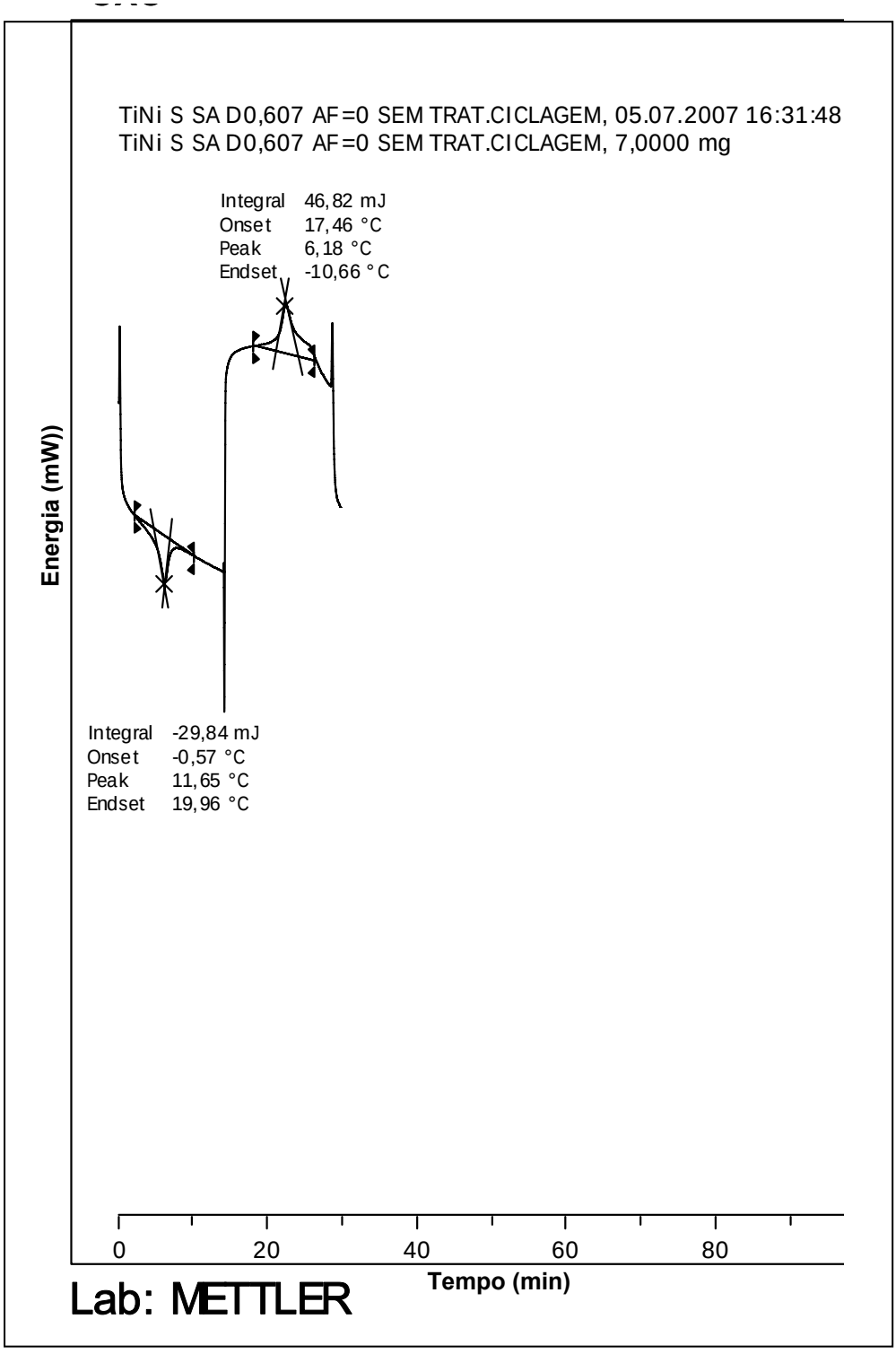


Figura 5.4 - Curva DSC de uma amostra de fio de Ti-Ni que não sofreu tratamento térmico.

DISCUSSÃO

Algumas conclusões extremamente importantes podem ser destacadas a

partir desse resultado:

- A mola sem tratamento apresentou Af próxima de 19ºC. Esse valor é muito alto dentro da faixa de temperatura de utilização do sensor (10 a 40ºC). Na ocorrência de temperaturas ambientes abaixo desse valor, é possível haver uma transformação de fase (de austenita para martensita) por efeito de temperatura, mesmo estando a mola em repouso. Isso implicaria um envio de sinal falso de deformação da mola comprometendo a confiabilidade de funcionamento do sensor.
- As molas tratadas termicamente a 450°C apresentaram Af abaixo de 0ºC (-0,63ºC). Isso representa uma garantia de que a mola se encontra no estado superelástico dentro da faixa prevista para utilização (10 a 40ºC). A estabilização da austenita a partir de valores tão baixos de temperatura oferece uma garantia adicional de que o sensor irá atuar, predominantemente, por efeito de deformação da mola.
- Os resultados do ensaio a 550°C mostram que com o aumento da temperatura de ensaio há uma tendência de deslocamento de Af para a esquerda; ou seja, é possível condicionar as molas para aplicações em temperaturas mais baixas através de tratamento adequado;

5.4 Ensaios de Medição de ddp na Mola de 15 mm sob Condições Controladas

Os resultados de DSC mostraram que as amostras da liga de Ti-Ni se apresentam no estado superelástico a partir de -0,63°C. No entanto foi necessário verificar o comportamento da mola quando sujeita a uma variação controlada de temperatura. O ensaio de medição de ddp foi realizado com a mola submersa em banho térmico de silicone.

RESULTADOS:

A tabela 5.2 e gráficos das figuras 5.5 e 5.6 mostram os valores obtidos nos ensaios de medição de ddp, ou tensão elétrica, com a deformação da mola em

várias temperaturas diferentes.

Tabela 5.2- Medição de ddp, ou tensão elétrica, feita na mola imersa em banho de silicone, nas temperaturas de 10,20,30 e 40º C.

Temperatura do banho (ºC)	Deformação (mm)			
	0,00	10,00	20,00	30,00
	Tensão (mV)			
10	128,6	130,2	131,4	132,8
20	128,7	129,9	131,5	132,6
30	128,9	130,4	131,5	132,9
40	128,5	130,3	131,7	132,8
Valores médios	128,7	130,2	131,5	132,8
Desvio Padrão	0,147902	0,187083	0,108972	0,108972
Referência	128,9	130,3	131,8	133,7

*valores medidos na mola de 15 mm, na temperatura ambiente (25°C) (ver tabela 5.1).

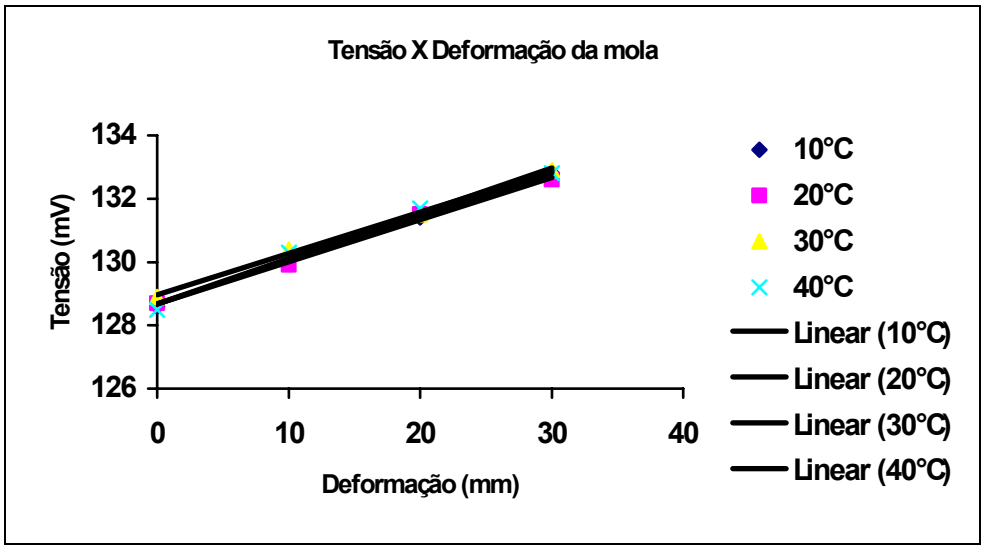


Figura 5.5 - Gráfico da ddp, ou tensão, com a deformação, em várias temperaturas, numa mola de Ti-Ni de 15 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro.

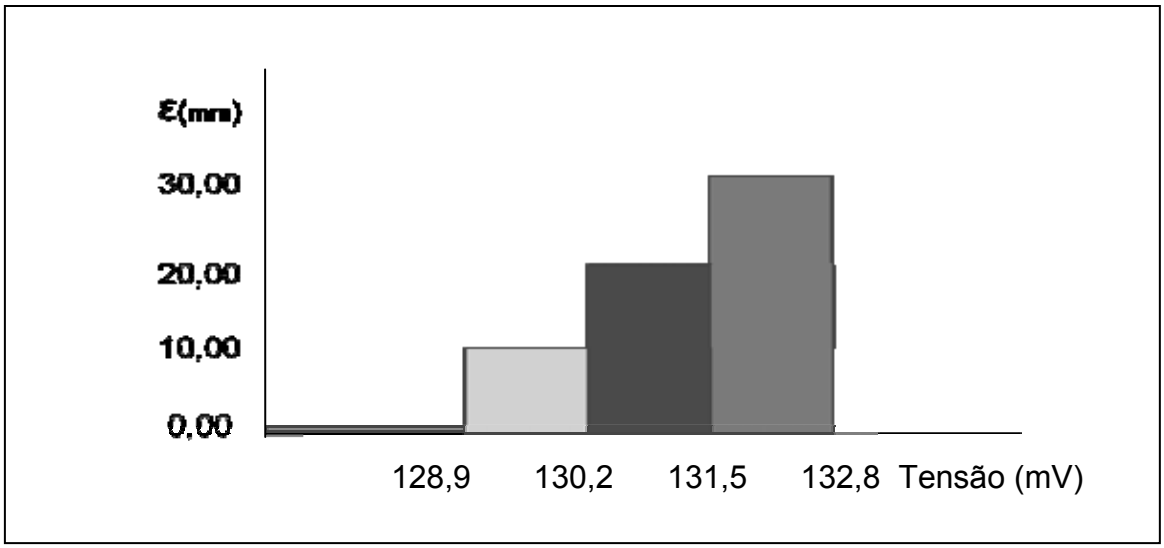


Figura 5.6 - Gráfico dos valores médios de tensão versus deformação na mola de Ti-Ni,15 mm de comprimento.

DISCUSSÕES:

A partir dos resultados desse ensaio, foi possível se conhecer os valores da ddp gerada nos terminais de medição; nas temperaturas entre10ºC e 40ºC; em condições reais de variação de temperatura. Os dados da tabela 5.2 e o gráfico da figura 5.5 mostram que os valores de ddp praticamente não variam com o aumento da temperatura. A figura 5.6 mostra que valores de ddp são associados com a deformação sofrida pela mola.

- Considerações importantes:

- A partir dos resultados foi possível observar que as molas apresentam praticamente o mesmo comportamento nas várias temperaturas de ensaio, diferentemente do que ocorre quando a mola é distendida. Isso prova que a mola se apresenta no estado superelástico nessa faixa de temperatura.

- Outro resultado importante pode ser obtido a partir dos dados da tabela 5.2 que mostram que é possível fazer uma correlação entre a ddp medida nos terminais da mola e o nível de deformação experimentado pelo sistema monitorado. Pode-se verificar, assim, que, para cada valor de deformação, existe um valor de ddp

associado, o que permite, de fato, fazer a programação do dispositivo eletrônico de leitura para monitorar uma faixa de valores ou um valor específico.

5.5 Ensaios de Medição de ddp numa Mola 100 mm de Comprimento e 20 mm de Diâmetro

- Detalhes adicionais do método

Essa mola foi confeccionada com os seguintes objetivos:

1 - Obter uma mola maior que facilitasse a conexão dos terminais de medição na mola;

2 - Verificar se ocorreriam maiores valores de variação de ddp ao se deformar a mola;

3 - Verificar o comportamento da variação de ddp na mola ao ser comprimida.

As dimensões dessa mola foram escolhidas aleatoriamente, visando obter uma mola que permitisse maior facilidade de conexão dos terminais de medição nela. Foram obtidas a partir de fios de Ti-Ni enrolados num parafuso de 15 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento, usinado com passo de 4 roscas por polegada.

RESULTADO 1:

Aumento de diâmetro da mola termoconformada

A mola obtida apresentou um acréscimo de 5 mm no diâmetro em relação ao diâmetro nominal do parafuso utilizado, diferentemente do que ocorreu com as molas de 15 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro, que reproduziram exatamente o mesmo diâmetro do parafuso utilizado.

DISCUSSÃO

O nível de esforços mecânicos induzidos na mola durante a conformação é menor à medida que o diâmetro aumenta. Além disso, a relação de troca de calor entre o parafuso e a mola durante o tratamento é diferente quando se aumenta o

diâmetro do parafuso, uma vez que a massa do conjunto parafuso mais mola é aumentada. É provável que esses fatores influenciem a conformação da mola, levando-as a apresentar um comportamento diferente a partir de diâmetros superiores.

É provável que, para se alcançar o mesmo efeito, tenha-se que aumentar o tempo do tratamento térmico. Isso não foi realizado porque levaria o fio de Ti-Ni a apresentar características diferentes daquelas nas quais foram realizados os testes preliminares para análise do efeito memória de forma, ou seja, aquecimento a 450º C por 10 minutos e têmpera em água a 25ºC.

RESULTADO 2:

Valores de ddp

A tabela 5.3 mostra os valores médios de ddp obtidos durante a distensão da mola até o comprimento final de 3 vezes o seu comprimento original. A figura 5.7 mostra o gráfico do comportamento da variação da ddp com a deformação.

DISCUSSÃO

A ordem de grandeza dos valores de ddp aumentou significativamente (o que já era esperado devido à mola de 100 mm possuir um comprimento efetivo maior do que a mola de 15 mm pelo aumento do comprimento e do diâmetro do parafuso utilizado).

Um importante dado que pode ser obtido na tabela 5.3 é que as molas apresentam um valor médio de Δddpmax = 4,9 mV. Esse valor possui ordem de grandeza próxima da verificada nas molas de 15 mm de comprimento (4,5 mV).

Tabela 5.3 - Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, numa mola de 20 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo distendida.

I (A)	Deformação (mm)	Δddpmax

	0,0	100	200	300	(mV)
	Tensão (mV)				
0,50	361,2	362,1	363,8	366,3	5,1
	360,9	362,2	364,2	365,8	4,9
	361,3	361,9	364,1	365,8	4,6
	361,1	362,3	363,9	366,2	5,1
Valores Médios	361,12	362,12	364,0	365,9	4,92
Desvio Padrão	0,147902	0,147902	0,158114	0,227761	0,204634

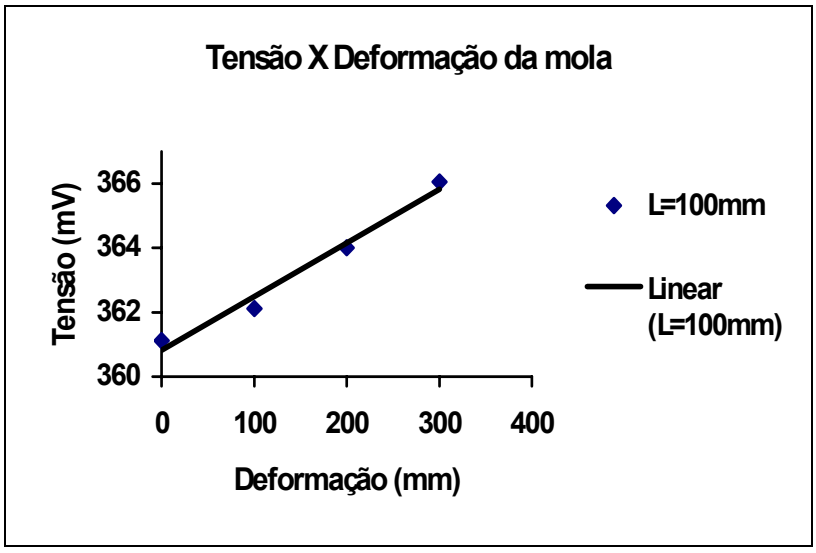


Figura 5.7 - Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão, gerada numa mola de Ti-Ni, de 100 mm de comprimento, ao ser distendida.

- Considerações importantes:

As molas de Ti-Ni parecem apresentar um mesmo nível de indução de martensita, com consequente variação de ddp, quando distendidas para um comprimento final de 3 vezes o seu comprimento original, independentemente do seu comprimento.

Este resultado conduziu à investigação de outros comprimentos de mola, 80 e 50 mm, para avaliar se o efeito se repetia.

5.6 Medição de ddp, ou tensão elétrica, nas Molas de 80 e 50 mm de Comprimento, com 20 mm de Diâmetro

RESULTADOS:

Os resultados da medição de ddp das duas molas são apresentados na tabela 5.4 e 5.5 e os gráficos das figuras 5.8 e 5.9.

DISCUSSÃO:

Pelos resultados apresentados, foi possível fazer as seguintes verificações:

1 - A proporcionalidade da ordem de grandeza da ddp com o comprimento efetivo da mola;

2 - A manutenção do valor de aproximadamente 4,5 mV entre o valor máximo, quando a mola tem seu comprimento final acrescido para 3 vezes o comprimento original, e o valor mínimo medido na mola em repouso.

- Considerações importantes:

Os resultados obtidos confirmaram que o comportamento da variação de ddp nas molas de Ti-Ni é adequado à aplicação; permitindo, inclusive, confecção de molas de tamanho reduzido, com as mesmas propriedades das molas maiores. Isso foi um indicativo da possibilidade de se confeccionar a mola com a dimensão adequada à aplicação em tubulações de PVC de pequeno diâmetro (conforme requisito descrito no item 3.1 para o sensor)

Tabela 5.4 – Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, numa mola de 80 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, sendo distendida.

I (A)	Deformação (mm)				∆ddpmax
	0,0	80	160	240	

0,5	Tensão (mV)				(mV)
	264,2	265,1	266,8	268,7	4,5
	263,9	265,1	266,6	268,8	4,9
	264,3	264,8	266,5	268,6	4,3
	264,1	265,3	266,9	268,8	4,7
Valores Médios	264,12	265,08	266,7	268,72	4,60
Desvio Padrão	0,147902	0,178536	0,158114	0,082916	0,223607

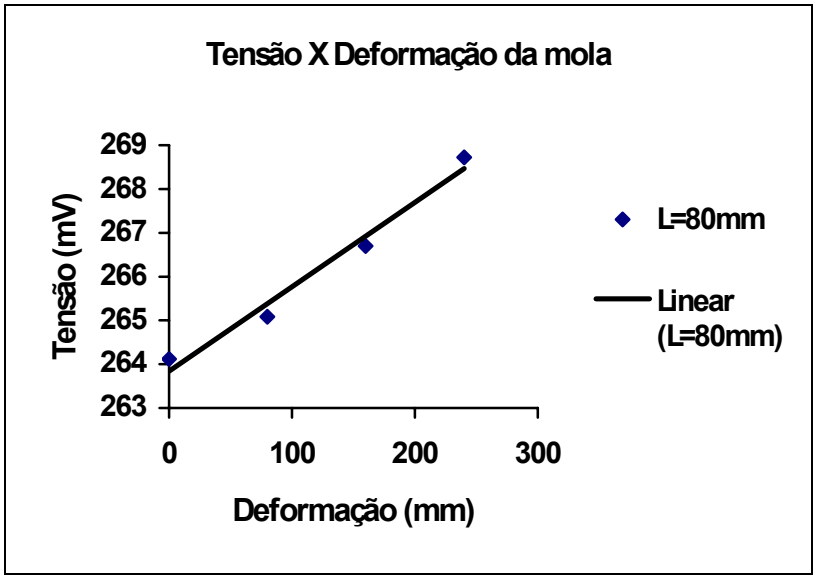


Figura 5.8 - Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão elétrica, gerada numa mola de Ti-Ni, de 80 mm de comprimento, ao ser distendida.

Tabela 5.5 – Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente aproximadamente 0,5A, numa mola de 20 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, sendo distendida.

I (A)	Deformação (mm)				Δddpmax
	0,0	50	100	150	

	Tensão (mV)				(mV)
0,5	237,2	238,1	239,7	241,6	4,4
	236,9	237,8	239,5	241,2	4,3
	236,8	238,0	239,6	241,3	4,3
	237,1	238,1	239,5	241,5	4,7
Valores Médios	237,0	238	239,6	241,4	4,42
Desvio Padrão	0,158114	0,122474	0,082916	0,158114	0,163936

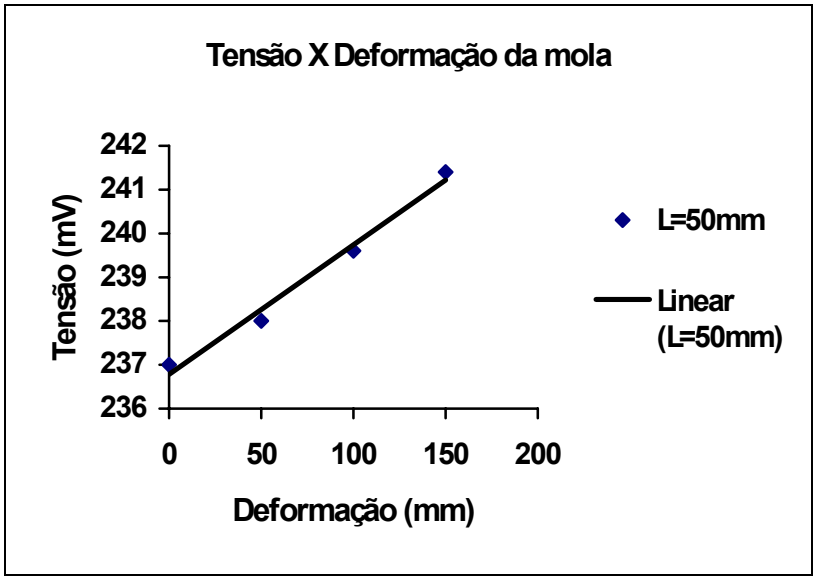


Figura 5.9 - Gráfico do comportamento da variação da ddp, ou tensão elétrica, gerada numa mola de Ti-Ni, de 50 mm de comprimento, ao ser distendida.

5.7 Medição de ddp na Mola de 100 mm de Comprimento, Durante a Compressão

Após a verificação do comportamento satisfatório da variação de ddp das molas ao serem distendidas, buscou-se investigar o comportamento de molas ao sofrer compressão. O objetivo principal desse ensaio foi analisar se os efeitos verificados durante a distensão se reproduziam durante a compressão. Caso isso fosse verificado, simplificaria bastante o princípio de funcionamento do sensor,

facilitando sua confecção; uma vez que bastaria encapsular a mola, comprimida, num bloco polimérico, que, quando se dissolvesse, liberaria a mola que retornaria ao seu estado natural de repouso apresentando valor diferente de ddp, gerando o sinal para o monitoramento. Os testes foram realizados numa mola de 100 mm de comprimento.

RESULTADOS:

Os resultados são mostrados na tabela 5.6 e na figura 5.10. A mola de 100 mm foi confeccionada possuindo um passo de 4 fios por polegada para apresentar melhores condições de ser comprimida.

DISCUSSÃO

Os resultados apresentados levaram às seguintes conclusões:

1 - Uma maior diferença entre os valores máximos e mínimos medidos na mola comprimida de 2/3 do seu comprimento nominal e em repouso chamaram a atenção e apontaram para um melhor desempenho da mola ao ser comprimida do que aquele apresentado ao ser distendida. Porém o fato de os valores no estado comprimido serem menores do que no estado em repouso contrariou os dados teóricos. Era esperado que, com a compressão, houvesse a indução da martensita e o respectivo aumento da resistividade e de ddp, ao contrário do que aconteceu.

2 - Os valores de ddp praticamente não se alteraram quando a mola foi comprimida de metade do seu comprimento total e de 1/3.

Tabela 5.6 – Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,5A, numa mola de 100 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, durante a compressão.

I (A)	Deformação (mm)				∆ddpmax (mV)
	~2/3 do L total (33mm)	1/2 do L total (50mm)	~1/3 do L total (67mm)	Totalmente distendida (100mm)	

	Tensão (mV)				
0,5	340,5	360,9	360,9	361,1	20,6
	338,5	360,8	360,9	360,8	22.3
	337,7	361,1	361,1	361,1	23.4
	340,2	361,1	361,1	361,9	21.7
Valores Médios	339,22	360,98	361,00	361,22	
Desvio Padrão	1,16485	0,129904	0,1	0,408503	

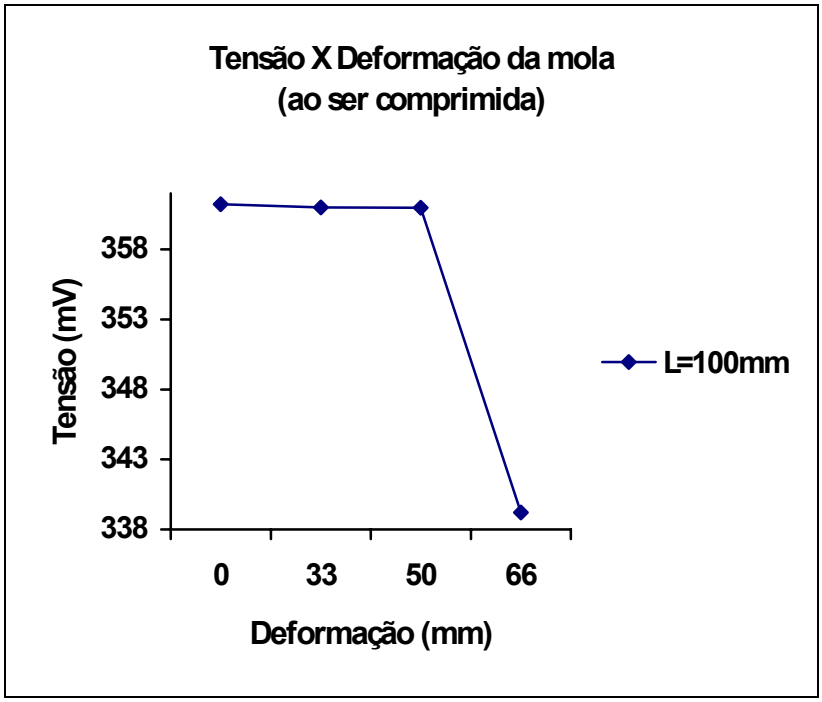


Figura 5.10 - Gráfico da variação da ddp versus deformação de uma mola de Ti-Ni, 100 mm de comprimento, ao ser comprimida. Destacando a queda brusca do valor de DDP quando a mola é comprimida de 2/3 do seu comprimento total, contrariando os dados teóricos que prevêem um aumento da resistividade com a deformação.

- Considerações importantes:

Esses resultados levaram a uma investigação mais criteriosa do método de medição e foi possível se chegar à seguinte conclusão:

Durante a compressão, a mola é submetida a esforços mecânicos de intensidade bem menor do que aqueles aplicados durante a distensão. A intensidade desses esforços não é suficiente para induzir a martensita nessa temperatura de

trabalho. Por isso os valores praticamente permanecem os mesmos quando a mola é comprimida de 1/3 e metade do seu comprimento total (a pequena variação de ddp é atribuída às pequenas variações no valor da corrente de sensibilização fornecida pela fonte de corrente).

O valor menor de ddp verificado com a mola comprimida de 2/3 do seu comprimento nominal é atribuído ao seguinte fato: quando a mola é comprimida desse valor, ocorre o toque acidental entre algumas espiras. Isso faz com que o percurso da corrente de sensibilização seja reduzido. Para o sistema de leitura, isso é equivalente à diminuição do condutor, o que resulta num valor menor de ddp medido.

Esses resultados mostraram a inviabilidade de se explorar o efeito de compressão da mola para operação do sensor.

5.8 Resultado Geral das Molas

O comportamento geral das molas de TI-Ni, quanto à variação da ddp versus deformação, pode ser avaliado reunindo todos os resultados em um só gráfico.

A figura 5.11 mostra todos os resultados das molas resumidos num só diagrama.

DISCUSSÃO

1 - Verificou-se que, com o aumento do comprimento nominal da mola, é possível obter-se valores de ddp cada vez maiores. Isso é conseqüência do aumento do comprimento efetivo do condutor nas molas maiores e consequente aumento da resistência elétrica total.

2 - Foi possível verificar a diferença aproximada de 4,5 mV entre o valor máximo e mínimo medidos em todas as molas, quando são distendidas para um comprimento final 3 vezes maior que o nominal. Isso leva a concluir que molas de comprimentos variados, quando submetidas a esse nível de deformação, sofrem o mesmo nível de

indução de martensita, apresentando o mesmo nível de aumento de resistividade.

- Considerações importantes

Estes resultados foram de suma importância para o dimensionamento da mola de Ti-Ni. Os valores mostraram que é possível obter 4,5 mV em molas idênticas à estudada, a partir de uma corrente de 0,5A; independente do comprimento nominal, quando este é aumentado de 3 vezes.

Esses resultados permitiram o dimensionamento das molas nas dimensões desejadas.

5.9 Determinação dos Requisitos da Mola de Ti-Ni e do Dispositivo de Distensão

- Detalhes adicionais do método

Os resultados obtidos no item anterior apontaram para a possibilidade de se obter uma mola dentro das dimensões ótimas para o sensor, ou seja, inferior a 100 mm, quando distendida. Desse modo, foram definidos requisitos para o projeto dimensional do dispositivo de distensão da mola. Os principais itens estão relacionados abaixo:

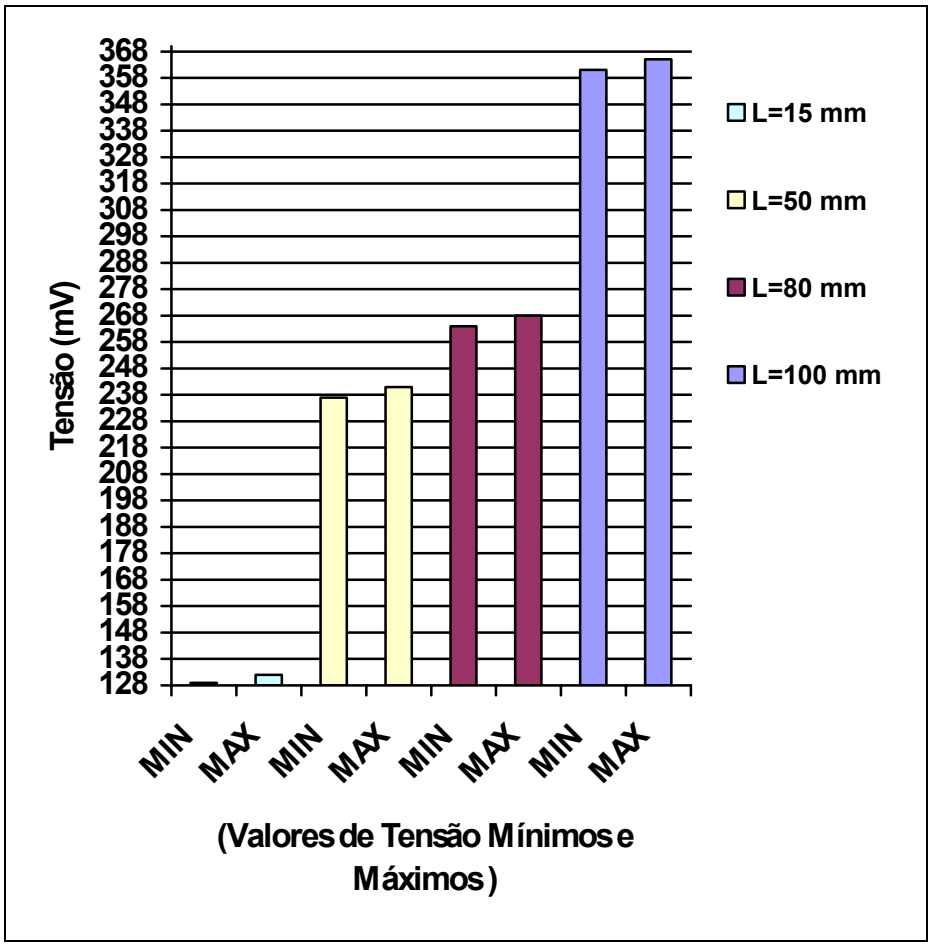


Figura 5.11 - Gráfico do resultado geral dos ensaios de medição de ddp (máxima e mínima) nas molas de 15,50,80 e 100 mm de comprimento quando distendidas.

Da mola de Ti-Ni:

1 - O comprimento da mola, quando distendida totalmente, deve ser um pouco menor que 100 mm. Isso decorre do fato de que o sensor está sendo projetado para trabalhar no interior de tubos de diâmetros no mínimo iguais a 100 mm (ver item 1.6);

2 - A mola no seu estado de repouso deve possuir comprimento máximo inferior a 33 mm. De modo que quando se distender de 3 vezes, não ultrapasse o limite de 100 mm imposto pelo diâmetro do tubo. Do contrário, a mola ficará impedida de se distender totalmente, e a ddp de 4,5 mV, necessária ao monitoramento, não poderá ser gerada;

3 - A mola tem que apresentar uma constante elástica menor que a constante elástica da mola do dispositivo de distensão. Isso garante que o dispositivo seja

capaz de distender a mola de Ti-Ni quando houver a dissolução do polímero.

Do Dispositivo de Distensão:

4- A força exercida pelo dispositivo tem que ser menor que a resistência à compressão do bloco polimérico, para evitar que o dispositivo não comprima o bloco, sem que ocorra a sua dissolução.

5 - As dimensões do dispositivo têm que ser tais que permita a completa distensão da mola de Ti-Ni. Desse modo, o dispositivo deve apresentar uma abertura maior que o comprimento da mola totalmente distendida e menor que o diâmetro nominal do menor tubo usado em poços.

Os principais dados adotados no projeto dos componentes estão relacionados a seguir:

1- Optou-se por confeccionar molas com 30 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro;

2 - O dispositivo de distensão foi dimensionado com as laterais com 45 mm de comprimento, articulada na parte central;

3 - Novos ensaios de medição de ddp foram realizados para se certficar que na mola com esse comprimento era gerada a ddp aproximada de 4,5 mV quando distendida;

4 - Foram realizados ensaios para se levantar a constante elástica da mola de Ti-Ni para se proceder com a seleção da mola do dispositivo;

5 – Após a selecionada a mola do dispostivo, foram realizados os testes do conjunto para avaliar o desempenho dos elementos integrados.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos com o detalhamento dos métodos utilizados.

5.10 Medição de ddp, ou tensão elétrica, na Mola de 30 mm de Comprimento

RESULTADOS:

Os resultados da medição de ddp feita numa mola de 30 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro são mostrados na tabela 5.7 e figura 5.12. Já o comportamento da variação da resistência elétrica na mola pode ser visto nos resultados da tabela 5.8 e na figura 5.13.

Tabela 5.7 – Medição de ddp, ou tensão, feita com 04 espiras entre os terminais com corrente de 0,50A, numa mola de 10 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, sendo distendida.

I (A)	Deformação (mm)				∆ddpmax
	0,0	30	60	90	
0,5	Tensão (mV)				
	210,2	211,1	212,4	214,6	4,4
	209,8	210,9	212,5	214,7	4,9
	209,9	210,9	212,5	214,5	4,6
	210,3	211,2	212,6	214,6	4,3
Valores Médios	210,05	211,02	212,5	214,6	4,6
Desvio Padrão	0,206155	0,129904	0,070711	0,070711	0,229129

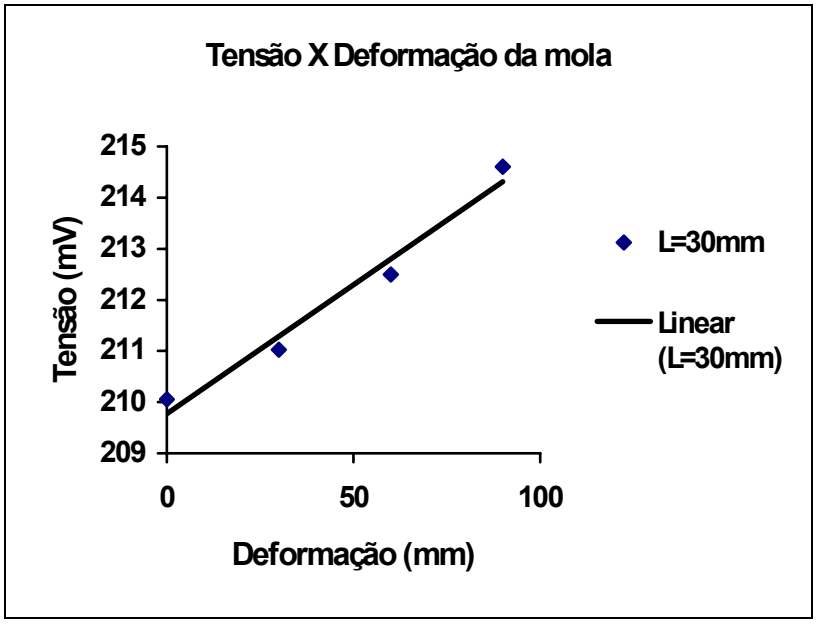


Figura 5.12 - Gráfico do comportamento da variação da ddp gerada numa mola de Ti-Ni, de 30 mm de comprimento, ao ser distendida.

Tabela 5.8 - Valores médios da resistência elétrica na mola de 30 mm de comprimento, com 4 espiras entre os terminais.

R=V/I	Deformação (mm)				ΔRmax
	0,00 mm	10,00 mm	20,00 mm	30,00 mm	
R (mΩ)	420,1	422,04	425,0	429,2	9,1

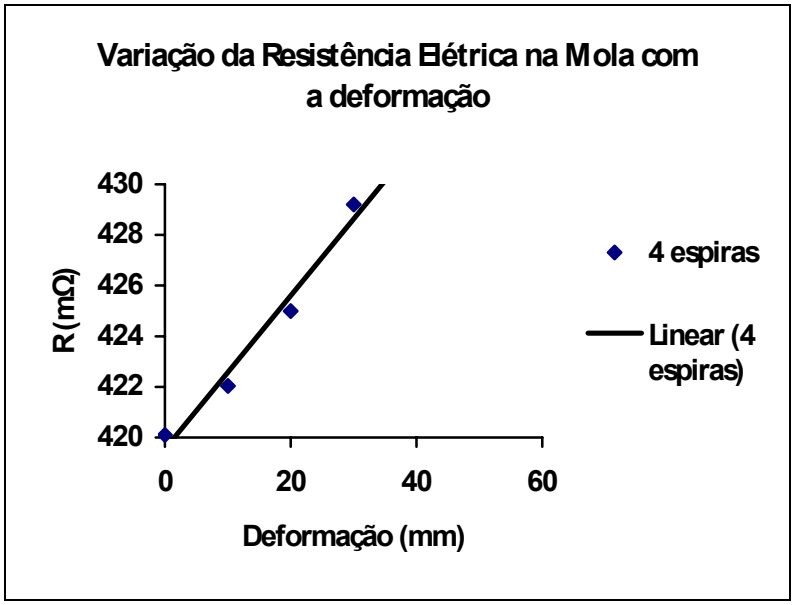


Figura 5.13 - Gráfico da variação da resistência elétrica na mola, de 30 mm de comprimento, com medição feita com 4 espiras entre os terminais internos.

DISCUSSÃO

A mola de 30 mm de comprimento repetiu o comportamento apresentado pelas molas anteriores; ou seja:

1 - Nível de ddp inferior às molas de maior comprimento e superior à mola de 15 mm de comprimento, confirmando a proporcionalidade da ddp com o comprimento da mola;

2 - A manutenção da diferença em torno de 4,5 mV entre o valor mínimo e máximo medida para a mola em repouso e distendida para um comprimento final de 3 vezes o seu comprimento nominal.

- Considerações importantes:

Os resultados mostraram que a mola de 30 mm atende os requisitos 1 e 2 (dimensional e comportamento elétrico), estabelecidos para a mola no item 5.9. Portanto podem ser perfeitamente utilizadas.

5.11 Análises de Desempenho Mecânico do Sensor

5.11.1 Análise das Constantes Elásticas das Molas

RESULTADOS

As figuras 5.14 e 5.15 trazem as curvas obtidas com as respectivas constantes elásticas calculadas.

DISCUSSÃO

O valor da constante elástica da mola de Ti-Ni foi bastante importante para o projeto. A viabilidade do uso do material polimérico como gatilho de disparo do sensor, em relação à resistência mecânica de compressão, dependia desse valor. Conforme será explicado adiante.

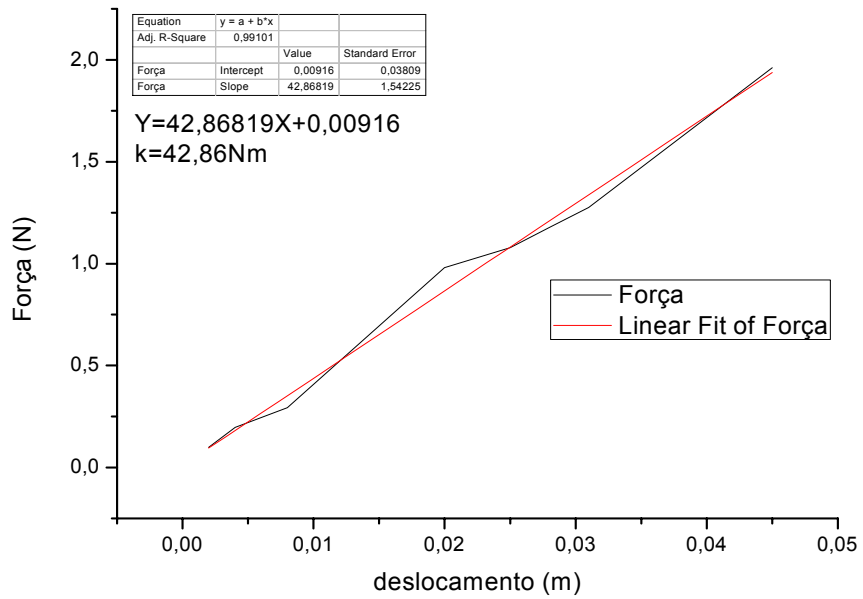


Figura 5.14 - Curva “Força versus Deslocamento” da mola de Ti-Ni, 30 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro.

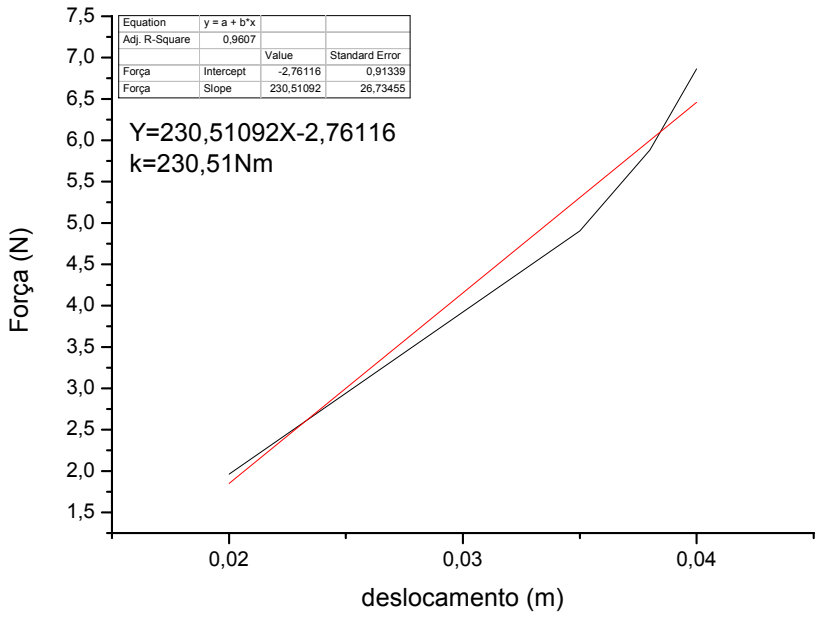


Figura 5.15 - Curva “Força versus Deslocamento” do dispositivo de distensão.

As dimensões da mola de Ti-Ni foram determinadas levando em consideração duas exigências principais:

1) O comprimento máximo da mola quando distendida foi limitado a 100 mm; por conta do diâmetro mínimo dos tubos comerciais previstos para instalação do sensor (ver requisito 1 do item 5.9);

2) Os resultados obtidos nos ensaios de ddp mostraram que as molas necessitam ter seu comprimento acrescido de 3 vezes para que a ddp ideal seja gerada.

Por essas exigências, a mola foi selecionada com comprimento nominal igual a 30 mm. Essa mola deveria apresentar uma constante elástica de valor baixo, pois, do contrário, seria necessária a utilização de uma mola do dispositivo com uma constante elástica elevada. O valor da constante deveria permitir a distensão da mola de Ti-Ni com razoável facilidade pela mola do dispositivo, mas não deveria resultar em esforço de compressão elevado sobre polímero.

O valor da constante da mola de Ti-Ni, K= 42.868 N.m, é aproximadamente

5,5 vezes menor do que a constante da mola do dispositivo, K=230,51N.m. Esta, por sua vez, produz um esforço de compressão de valor inferior ao limite de resistência a compressão do material polimérico.

A análise do balanço das forças do dispositivo de distensão mostra que a relação entre os valores das constates é suficiente para garantir que dispositivo distenda totalmente a mola de Ti-Ni (até o valor desejado) e não esmaga o polímero na condição de repouso.

5.11.2 Análise do Balanço de Forças No dispositivo de Distensão e da Mola de Ti-Ni

O dispositivo de distensão foi projetado de modo a facilitar o processo de deformação da mola de Ti-Ni. O artifício utilizado foi posicionar o ponto de fixação da mola de Ti-Ni e o ponto de aplicação da força do dispositivo, equidistantes do ponto central do dispositivo. Essa configuração faz com que o momento resultante das forças das molas só dependa da intensidade delas mesmas. Como visto, a constante da mola do dispositivo é em torno de cinco vezes a constante da mola de Ti-Ni, assim, o momento gerado pela força do dispositivo é cinco vezes a do momento resistente da mola de Ti-Ni. Essa configuração simplifica a análise numérica do balanço das forças, uma vez que há uma relação direta do momento resultante com ordem de grandeza das forças aplicadas.

O efeito dessa configuração pode ser avaliado pela análise em apenas um dos lados do dispositivo, conforme mostrado na figura 5.16.

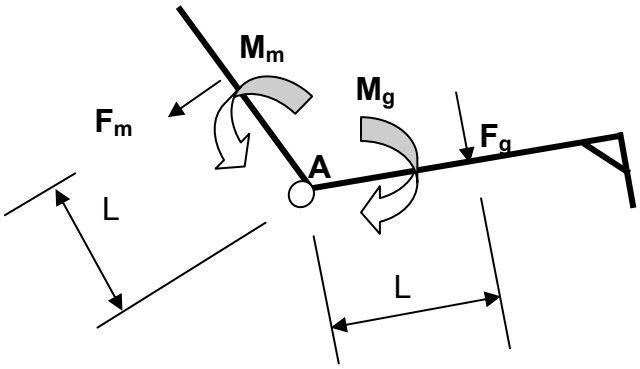


Figura 5.16 - Sistema de forças simplificado. Mm é momento de FM (força da mola de Ti-Ni) em relação a A; Mg - momento de Fg (força do dispositivo); L é distância do ponto de aplicação das forças ao ponto A.

Como

$Mm = Fm.L$ (5.1)

e $Mg = Fg.L$ (5.2)

Sendo Mr o momento resultante no ponto A, têm-se então:

$Mr = Mg – Mm = Fg.L - Fm.L = L (Fg - Fm)$, (5.3)

Ou seja, o momento resultante é proporcional a intensidade das forças.

Desse modo, a relação entre Fm e Fg traduz o comportamento do sistema. A figura 5.16 é um esquema simplificado da atuação das forças. A análise é feita como se elas estivessem aplicadas no mesmo ponto.

DISCUSSÃO

Quando o dispositivo está aberto, a sua mola está distendida de aproximadamente 50 mm, e a mola de Ti-Ni está em repouso sem sofrer esforço mecânico nenhum. O dispositivo é mantido nessa posição por conta do bloco polimérico que anula o efeito da força elástica, da mola do dispositivo, que tende a fechá-lo. Quando o bloco polimérico é diluído, o dispositivo se fecha, retornando ao seu estado de repouso. Ocorre, ao mesmo tempo, a distensão da mola de Ti-Ni, que,

por possuir uma constante elástica inferior, não é capaz de evitar o fechamento.

Para que isso ocorra, a força Fg do dispositivo tem que ser maior do que a força Fm da mola. É necessária, portanto, a verificação das intensidades das forças Fg e Fm durante o movimento de atuação do sensor.

Quando o dispositivo está aberto, a sua mola está distendida de aproximadamente 50 mm, que é o comprimento do lado do bloco polimérico.

A força máxima exercida pela mola do dispositivo, nesse instante, pode ser calculada usando a equação levantada na figura 5.15. Sendo assim, temos:

Fmax = 230, 51x – 2,76 (5.4)

Onde x é o deslocamento dado em metros, e F é a força em Newtons. Então:

Fg = 230,51.(0,050) – 2,76 = 8,76 N. (5.5)

A análise no instante imediatamente após o início do movimento de fechamento do dispositivo pode ser previsto pelo calculo da força exercida pela sua mola no momento em que ela se fechou 1 mm. A mola do dispositivo estará distendida, nesse instante, 1 mm a menos, ou seja, x = 49 mm, ou 0,049 m.

Assim:

Fg = 230,51.(0,049) – 2,76 = 8,53 N (5.6)

Admitindo que, nesse mesmo instante, a mola de Ti-Ni tenha se distendido de 1 mm, a força na mola de Ti-Ni será de oposição ao fechamento do dispositivo, que pode ser calculada a partir da equação da curva levantada na figura 5.14.

Fm = 42,86x + 0,0092. (5.7)

Assim:

Fm = 42,46. (0,001) + 0,0092 = 0,052 N. (5.8)

Essa força é muito inferior ao valor de fechamento do dispositivo. Portanto a mola de Ti-Ni não é capaz de impedir o início do processo de fechamento, e será arrastada pela força de fechamento da mesma.

A força que a mola de Ti-Ni exercerá quando estiver totalmente distendida precisa ser considerada. Nesse ponto a mola terá um comprimento de 90 mm, ou seja x = 0,090 m.

Assim Fm pode ser calculada:

Fm = 42,46. (0,090) + 0,0092 = 3,83 N (5.9)

A força na mola do dispositivo não pode ser inferior a esse valor. Ou seja, é necessário se calcular o valor de x mínimo que resulte Fg > 3,83

Como na equação (5.4) temos Fg = 230,51 – 2,76

Tem-se que:

230,51.x – 2,76 > 3,83

230,51 x > 3,83 + 2,76

230,51 x > 6,59

x > 6,59 / 230,51

x = 0,0286

ou seja:

x= 28,6 mm.

DISCUSSÃO

Se a mola do dispositivo for impedida de recuperar totalmente seu comprimento nominal, restando uma deformação de aproximadamente 30 mm, o dispositivo será capaz de arrastar a mola de Ti-Ni até o valor desejado de distensão, ou seja, 90 mm. Isso foi conseguido selecionando as abas laterais do dispositivo com altura próxima desse valor.

- Considerações principais:

1 - Os gráficos mostram que a constante elástica do dispositivo (K=230,51Nm) é muito maior do que a constante da mola de Ti-Ni (K= 42,86 Nm). Consequentemente, a força do dispositivo é muito maior do que a força da mola de

TI-Ni. Isso quer dizer que o dispositivo distenderá completamente a mola de Ti-Ni caso seja liberada pela dissolução do material polimérico;

2 - O requisito 3, definido no item 5.9, portanto, é completamente atendido pelo conjunto.

5.11.3 Análise do Esforço Mecânico Exercido pelo Dispositivo sobre o Bloco Polimérico

Essa análise foi necessária para verificar o atendimento do requisito 4, definido no item 5.9, para o conjunto "dispositivo mais bloco polimérico".

CÁLCULOS

A força que o dispositivo aplica sobre o bloco tem intensidade F, e é a força que tende a manter dispositivo fechado. A sua intensidade pode ser calculada pela equação (5.4). O bloco polimérico possui uma base quadrada de 50X50 mm (0,050 m). Portanto, x = 0,050 m será o deslocamento sofrido pelo dispositivo quando está aberto.

Assim,

$F = 230,51. (0,050) – 2,76 = 8,76$ N.

Essa força será aplicada na lateral do bloco, ou seja, na espessura de dois de seus lados. Como a espessura b do bloco é 10 mm (0,010 m), a área lateral do bloco pode ser calculada:

$A = b.x$ (5.10)

Assim,

$A = (0,010).(0,050) = 0,0005\ m^2$

A pressão exercida no bloco pode ser calculada pela equação abaixo:

$P = F / A,$ (5.11)

dada em N/m^2 ou Pascal (Pa).

Onde F é a força exercida pelo dispositivo sobre o bloco;

A é área lateral do bloco.

Assim:

P = 8,76 N/ 0,0005 m2 = 17,52 kPa

O esforço máximo de compressão, Pt, exercido sobre o bloco pode ser calculado multiplicando o valor de P por 2. Ou seja:

Ptotal = 2.P (5.12)

Desse modo temos,

Ptotal = 17,52 x 2 = 35,04 kPa.

DISCUSSÃO

Esse valor é aproximadamente metade da resistência à compressão medida no material (70kPa) (ver tabela 4.2).

- Consideração principal:

O dispositivo mais o bloco polimérico atendem o requisito 4, definido no item 5.9, estabelecido anteriormente para o conjunto.

5.12 Verificação dos Esforços Mecânicos da Mola de Ti-Ni Encapsulada no Polímero

Foram também analisados os esforços mecânicos no bloco polimérico na hipótese de uso da mola de Ti-Ni encapsulada, distendida, no interior do bloco. A hipótese do uso dessa configuração resulta em uma simplificação bastante significativa na construção do protótipo, uma vez que o dispositivo mecânico pode ser dispensado. O esquema dessa configuração está mostrado na figura 5.17.

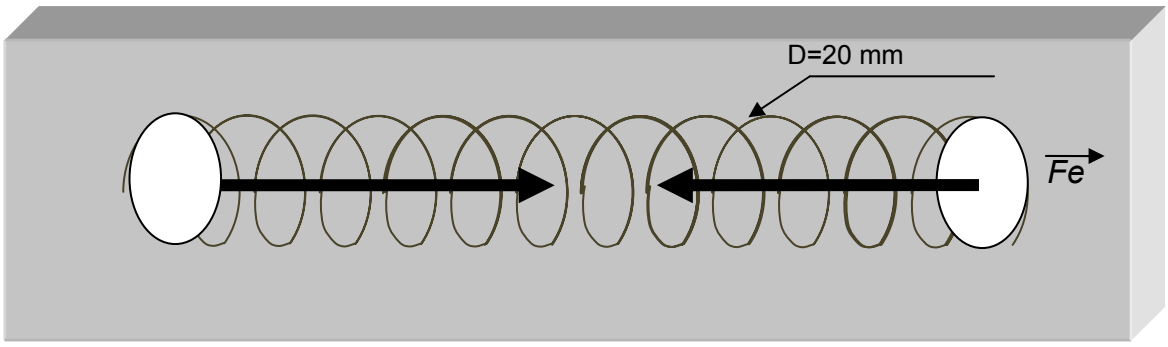


Figura 5.17 - Área do bloco polimérico sujeita à ação da força elástica da mola comprimida (A =πD2/4).

A mola analisada foi a de 100 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro. Esta mola foi a selecionada para início dos testes por apresentar a menor resistência à deformação.

Foi realizada a verificação da resistência à compressão do bloco frente ao esforço realizado pela mola distendida. Isso foi necessário para se garantir que, com o tempo, a mola não deformaria o polímero, distendendo-se sem haver necessariamente a dissolução por gasolina. A curva “Força versus Deformação” do dispositivo de distensão foi levantada, e está mostrada na figura 5.18. Depois foi calculada a pressão que o dispositivo exerceria permanentemente no bloco polimérico. Esse valor foi comparado à resistência à compressão do bloco.

- Cálculo da força exercida pela mola de 100 mm:

O gráfico da figura 5.18 fornece a equação do cálculo da força exercida pela mola de 100 mm.

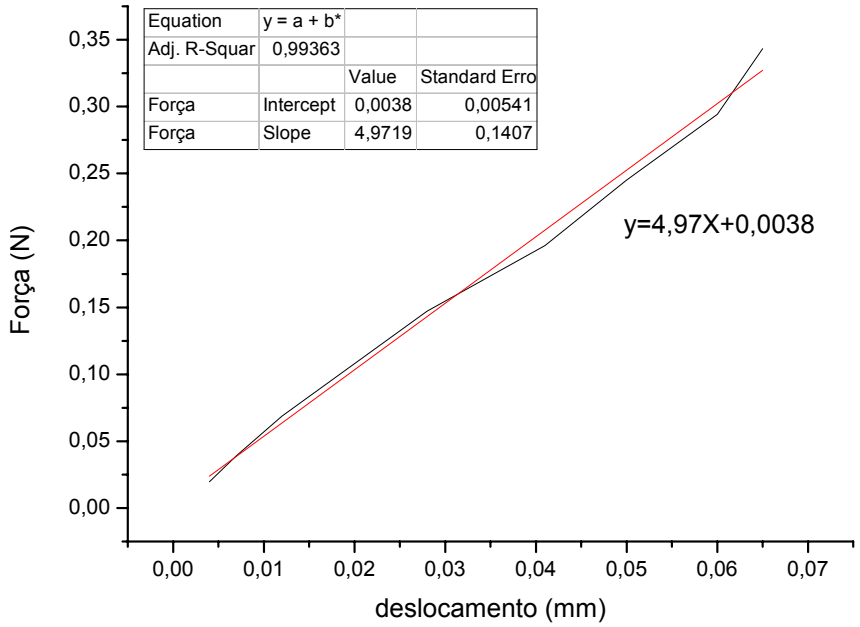


Figura 5.18 - Curva “Força versus Deslocamento” da mola de Ti-Ni, 100 mm de comprimento.

Então a força pode ser calcula pela equação abaixo

F= 4,97x+ 0,0038 (5.13)

Onde F é a força dada em Newton (N) e x é o deslocamento experimentado pela mola em m.

Quando a mola for distendida de 3 vezes o seu comprimento nominal, tem-se x = 300 mm, ou 0,300 m.

Assim, a força que atuará no bloco no sentido de retornar a mola ao seu estado natural de repouso pode ser calculada:

F = 4,97(0,300) + 0,0038 = 1,495 N.

A pressão, em Pascal (Pa), que a mola exercerá no bloco polimérico, pode ser calculada pela equação (5.11) P = F/A

Onde A é a área do bloco sujeita à força da mola.

A área do bloco sujeita a pressão será a área da base de um cilindro de

diâmetro de 20 mm, ou 0,020m, que corresponde ao diâmetro nominal da mola, conforme esquematizado na figura 5.17. O seu valor pode ser calculado pela equação abaixo.

$A = \pi D^2/4$, (5.14)

Onde D é o diâmetro da mola.

Portanto,

A = 3,14.(0,022)/4= 0,000314 m2.

Usando os resultados de F e A na equação (5.11) obtemos:

P = 1,495 N/ 0,000314 m^2 = 4760,5 Pa = 4,76kPa.

Pode-se ver que esse valor está bem abaixo da resistência à compressão de 70kPa medida no material (tabela 4.2)

- Cálculo da força exercida pela mola de 30 mm:

Foram realizados os mesmos cálculos para mola de 30 mm de comprimento nominal conforme segue:

Pelo gráfico da figura 5.14, a força exercida pela mola de 30 mm pode ser calcula pela equação (5.7),

F = 42,86. x + 0,0092

Estando a mola distendida de 3 vezes o seu comprimento nominal e encapsulada no polímero, teremos x = 90 mm, ou 0,090 m.

Assim, a força que atuará no bloco no sentido de retornar a mola ao seu estado natural de repouso pode ser calculada:

F = 42,86. 0,090 + 0,0092 = 3,87 N.

A pressão, em Pascal (Pa), que a mola exercerá no bloco polimérico, pode ser calculada pela equação (5.11)

P = F/A

A área do polímero sujeita à pressão será a área da base de um cilindro de diâmetro de 10 mm, ou 0,010m, que corresponde ao diâmetro nominal da mola, conforme esquematizado na figura 5.17. O seu valor pode ser calculado pela equação 5.14.

$A = \pi D^2/4$,

Portanto,

A = 3,14.(0,012)/4= 0,0000785 m2.

Usando os resultados de F e A na equação 5.11 obtém-se:

P = 3,87 N/ 0,0000785 m2 = 49267,98 Pa = 49,26KPa.

Pode-se ver por esse resultado que, embora a mola de 30 mm exerce um esforço de aproximadamente 10 vezes maior que a mola de 100 mm, ainda é inferior à resistência à compressão do material (70 kPa).

DISCUSSÃO

Esses resultados mostraram que a configuração usando a mola distendida, encapsulada no bloco polimérico é perfeitamente viável em termos de estabilidade mecânica do bloco, mesmo para molas de diâmetro menor. Além disso, apresenta vantagens significativas de simplificação do protótipo, uma vez que o dispositivo de distensão pode ser dispensado.

Esse modelo, porém, não foi preferido porque ainda não são completamente conhecidas as variações do comportamento do efeito memória de forma de molas de Ti-Ni após períodos muito longos, estando distendidas. Ou seja, não existem garantias de que a mola não apresentará alterações no efeito memória de forma estando naquele estado por períodos muito longos.

- Consideração principal:

O modelo anterior, embora use mais elementos mecânicos, apresenta a vantagem de explorar a distensão da mola somente no momento da atuação do

sensor. Nesse estado, os dados de comportamento das molas de Ti-Ni são abundantes e garantem que haverá a transformação de fase de austenita para martensita; uma vez que não há histórico de perda do efeito memória de forma em molas de Ti-Ni sendo distendidas após longos períodos de tempo no seu estado natural de repouso.

5.13 Ensaios para Determinação do Melhor Material do Dispositivo de Distensão da Mola

- Detalhes adicionais do método:

Como explicado no capítulo 4, dois materiais foram investigados por apresentar propriedades que se aproximavam das características predefinidas no item 4.3. O CAP foi o primeiro material analisado. O uso difundido como material impermeabilizante de superfícies sugeriu o bom desempenho diante da água.

Esse material pode ser facilmente removido pela aplicação de gasolina quando é aplicado sobre superfícies, como tinta de proteção, na forma líquida. Esse comportamento sugeriu o bom desempenho de diluição na gasolina.

Os resultados alcançados na prática, no entanto, apontaram limitações na utilização do material. Técnicas de diluição e separação dos constituintes do CAP foram então utilizadas para obter o fracionamento do material. O objetivo foi utilizar apenas o constituinte que respondia pelas propriedades de impermeabilização, o malteno. O descarte da parte mais pesada e polar do material, o asfalteno, foi realizado com o objetivo de acelerar o tempo de diluição dos blocos de CAP utilizados como gatilho. Uma vez que os dados iniciais apontaram um tempo muito elevado. Os resultados, não satisfatórios completamente, conduziram ao estudo de material alternativo. O material desenvolvido, de natureza polimérica, apresentou excelente resistência mecânica, estabilidade física e química, resistência à umidade

entre outras. Os resultados excelentes de dissolução na gasolina confirmaram a perfeita adequação do uso desse material para aplicação no sensor.

Os resultados e detalhes adicionais dos métodos estão apresentados a seguir.

5.14 Ensaios de Diluição do CAP

RESULTADOS:

Os resultados de diluição dos blocos de CAP estão na tabela 5.9

Tabela 5.9 – Tempo de diluição do bloco de CAP em tubos de diâmetros diferentes, com uma lâmina d'água de 30 mm de altura, em volumes fixos de gasolina adicionada à água.

Diâmetro do tubo (mm)	Volume Adicionado de gasolina (ml)		
	10	15	20
	Tempo de diluição do bloco de CAP (h)		
100	>5	>5	>5
150	>5	>5	>5
200	>5	>5	>5

DISCUSSÃO

Os resultados mostram que os blocos de CAP, embora apresentem comportamento satisfatório, em termos de estabilidade na água e solubilidade na gasolina, apresentam tempos de diluição bastante elevados. Nenhum bloco apresentou diluição num tempo inferior a 5 horas; o que representa um tempo bastante elevado para a aplicação.

5.14.1 Estudos Complementares

Estes resultados conduziram aos seguintes estudos aplicados:

1 - Estudo dos ligantes asfálticos para se compreender melhor sua constituição e propriedades físicas e químicas;

2 - As informações técnicas e as características gerais do produto apontaram para a

viabilidade de separação dos constituintes dos ligantes, os maltenos e asfaltenos. Isso sugeriu a separação e uso do malteno. Este componente possui baixa polaridade e, pelo estudo das características, foi possível perceber que talvez separado do asfalteno (cujas características eram, para esta aplicação, dispensáveis) apresentasse melhor resultado no tempo de diluição frente à gasolina e estabilidade física na água;

3 - Os resultados dos estudos conduziram à aplicação de métodos de separação dos constituintes do ligante asfáltico, descritos no item 4.3.2, cujos principais resultados são apresentados a seguir.

5.14.2 Separação das Principais Frações do Ligante: Maltenos e Asfaltenos

RESULTADOS

Os principais resultados desses ensaios estão relatados a seguir:

1 - Foi possível obter com êxito a separação dos dois principais componentes do CAP, os maltenos e os asfaltenos, conforme previa o procedimento descrito no item 4.3.2;

2 - Os asfaltenos podem ser obtidos a partir da lavagem com tolueno e posterior secagem em estufa a 70°C da parte sólida, de cor escura, que fica retida no filtro;

2 - Como os componentes que interessavam eram os maltenos, não foi realizada a extração dos asfaltenos;

3 - Os compostos maltenos apresentaram uma consistência pastosa, de elevada viscosidade. Essa foi a porção resultante da filtragem do CAP após a diluição com hexano no agitador térmico;

4 - Esse material, por conta da sua consistência, não apresentou possibilidade de solidificar-se em formato de paralelepípedos. Por isso foi estudado um material que pudesse servir como núcleo de um corpo de prova e esse, por sua vez, fosse

revestido do malteno, de maneira a formar um filme protetor que permitisse, então, teste de dissolução para se comparar aos blocos poliméricos;

5 - O material utilizado foi a alumina 99% pura, que foi prensada no formato de pequenos blocos cilíndricos de 10 mm de diâmetro e 20 mm de altura, numa prensa mecânica de bancada, a uma pressão de 4Kgf/cm2;

6 - A alumina foi escolhida, por apresentar algumas características que podiam viabilizá-la na confecção dos blocos, caso, os resultados de tempo de dissolução fossem muito superiores aos blocos poliméricos. Principalmente por: a) permitir a obtenção de blocos compactados de alta estabilidade mecânica, uma vez que pode ser encontrada em forma de pó. Isso era necessário para permitir a dissolução dos blocos quando em contato com água; b) Possuir uma elevada resistência à corrosão. Imprescindível para o uso em ambientes úmidos.

7 - Os blocos de alumina quando mergulhados em água, apresentaram um tempo de dissolução em torno de 5 s. Ou seja, caso o filme de malteno se rompesse, o sensor não levaria mais que esse tempo para ser atuado.

8 - O malteno, no entanto, apresentou grandes dificuldades de aplicação sobre os blocos de alumina, devido suas propriedades de viscosidade; o que impossibilita a obtenção de uma regularidade na aplicação do material sobre o bloco; ficando, inevitavelmente, algumas áreas desprotegidas, o que inviabilizou os testes previstos;

9 - O malteno, quando aplicado sobre os blocos, formou uma espécie de filme bastante pegajoso, apresentando uma aparente cristalização superficial, que se tornou enrijecido com o passar do tempo. Alguns corpos de prova, depois de passados alguns dias, apresentaram esse filme quebradiço e de fácil remoção. Esse resultado apontou para inviabilidade do uso do malteno como revestimento dos blocos estudados, uma vez que, poderia, com o tempo, permitir a infiltração da água que, ao atingir o bloco de alumina, poderia provocar sua dissolução do material

polimérico e o fechamento do dispositivo de distensão, atuando o sensor sem que necessariamente fosse provocado por contaminação de gasolina.

- Considerações Importantes:

1 - O Processo de separação dos componentes do CAP é bastante complexo e, mesmo em nível laboratorial, apresentou bastantes dificuldades de ordem prática; o que sugere elevados custos na implementação dos procedimentos em escala industrial;

2 - Dificuldades de ordem prática no uso do malteno como corpo sólido requerem o uso de material adicional como base para revestimento;

3 - A aplicação do malteno como revestimento sobre blocos de alumina apresentou insegurança na manutenção da impermeabilização dos blocos de alumina, devido a seu aspecto, depois de algum tempo, enrijecido e quebradiço;

5.15 Ensaio de Diluição do Material Polimérico

- Detalhes adicionais do método:

Os testes foram realizados em recipientes cilíndricos de diâmetros 100, 150 e 200 mm, para simular o comportamento em tubos comerciais mais comumente utilizados nos poços artesianos.

Foram realizados ensaios para se obter os seguintes resultados:

1 - Estimativa da concentração mínima de gasolina, num volume definido de água, capaz de acionar o sensor; aqui chamada de “concentração mínima de disparo”;

2 - Tempo de diluição do bloco diante da concentração mínima de disparo; aqui chamado de “tempo mínimo de disparo”;

3 - Levantamento da curva de tempo de disparo do sensor com o aumento da concentração de gasolina, em volume específico.

4 - Levantamento da curva de tempo de disparo com o aumento do volume d’água.

5 - Levantamento da curva de tempo de disparo com o aumento do diâmetro da área de contato com a gasolina.

6 - Levantamento da concentração que dispara o sensor em 5 s;

7 - Levantamento do volume adicionado de gasolina a partir da qual o sensor atua em menos de 2s.

8 - Avaliação da perda de resistência à compressão do bloco polimérico, imerso em água, sob a pressão da garra mecânica do sensor.

9 - Avaliação da influência do grau de salinidade da água na resistência à compressão do bloco polimérico.

A seguir apresenta-se uma descrição detalhada dos principais testes realizados e os resultados obtidos.

5.15.1 - Estimativa do Tempo de Disparo do Sensor X Volume Adicionado de Gasolina na Água.

- Detalhes adicionais do método:

Esse ensaio foi importante para se levantar as seguintes estimativas:

a) Tempo de resposta do sensor a partir do momento em que houver a contaminação da água;

b) O volume mínimo de gasolina que é capaz de atuar o sensor. Esse valor foi admitido como sendo o necessário para atuar o sensor em aproximadamente 60s.

c) Volume adicionado de gasolina que é capaz de disparar o sensor em aproximadamente 5s;

d) Volume adicionado de gasolina a partir da qual o sensor dispara em menos de 2s.

O dispositivo de distensão com o bloco polimérico foi colocada flutuando nos cilindros, com uma lâmina d'água de 30 mm de altura. Foram adicionados volumes de gasolina a partir de 1 ml e cronometrado o tempo no qual ocorria a completa

dissolução do bloco.

Esses valores podem ser tomados como indicativos da capacidade de resposta do sensor, no tempo, ou do seu desempenho, a partir da adição de determinados volumes de gasolina. Os resultados gerais do comportamento do sensor em tubos de 100, 150 e 200 mm de diâmetro são apresentados na tabela 5.10. Esses dados foram levantados a partir das curvas de disparo do sensor apresentadas no Anexo-1.

Tabela 5.10 – Análise do desempenho do sensor segundo a adição de volumes de gasolina capaz de disparar o sensor em situações definidas.

Desempenho	Tubo (Diâmetro em mm)		
	100	150	200
	Volume adicionado de gasolina (ml)		
Quantidade mínima capaz de disparar o sensor em 60 s (ml)	3	8	15
Quantidade mínima capaz de disparar o sensor em 5 s (ml)	10	25	50
Quantidade capaz de disparar o sensor em menos de 2 s (ml)	>30	>60	>100

- Consideração Principal:

Os dados mostram claramente que o aumento do volume adicionado de gasolina acelera o tempo de resposta do sensor. Ou seja, quanto maior for o nível de contaminação, mais rápida é a resposta de atuação. Este resultado confere ao sensor uma característica muito importante para o monitoramento.

5.15.2 Verificação do Comportamento do Sensor com o Aumento do Volume d'água

Esse ensaio foi importante para avaliar se haveria alteração no tempo de resposta do sensor com o aumento da lâmina d'água dentro da tubulação do poço.

- Detalhes adicionais do método:

O bloco polimérico foi colocado flutuando nos cilindros, com uma lâmina d'água, inicialmente, de 30 mm de altura. Água foi adicionada ao recipiente, aumentando gradativamente a altura da lâmina d'água. A cada aumento de 10 mm na atura da lâmina d'água foram realizados novos testes seguindo exatamente o mesmo procedimento dos ensaios descritos no item 5.15.1.

RESULTADOS:

Os resultados obtidos no item 5.15.1 foram, basicamente, os mesmos obtidos para lâminas de 30 mm de altura.

DISCUSSÃO

Os resultados mostram que:

1 - A gasolina, por ser menos densa que a água (massa específica igual a 750 Kg/m3 – ver tabela 4.4), distribui-se igualmente por toda a superfície da água, formando um filme, cuja espessura vai variar de acordo com a quantidade de gasolina derramada na água e com o espaço de confinamento dela, independentemente do volume d'água confinado.

2 - Quanto maior for a altura da lâmina de gasolina formada na superfície da água, mais rapidamente ocorrerá a dissolução do bloco polimérico.

- Consideração Principal:

A resposta do sensor está diretamente relacionada com a quantidade de gasolina, independentemente do volume da água (desde que a água esteja confinada). Isso representa uma característica bastante relevante para o funcionamento do sensor, pois o aumento do volume d'água não altera a sensibilidade de atuação deste.

5.15.3 Análise do Comportamento do Sensor com o Aumento da Área de Contato

com a Gasolina

Esta análise objetivou investigar a influência do aumento da área de espalhamento da gasolina com a dissolução do bloco polimérico.

- Detalhes adicionais do método:

Os dados apresentados utilizados para essa análise foram extraídos das curvas de disparo do sensor apresentadas no Anexo-1. Foi analisado o comportamento do tempo de resposta de atuação do sensor, a partir da adição de um mesmo volume de gasolina (20 ml) em tubos de área transversal diferente (tubos de 100, 150 e 200 mm de diâmetro). A tabela 5.11 mostra os valores calculados da área, de cada tubo.

Tabela 5.11 – Valores calculados da área transversal dos tubos de 100, 150 e 200 mm de diâmetro.

TUBO Diâmetro - d (mm)	ÁREA TRANSVERSAL- A (cm^2) $A = \frac{\pi d^2}{4}$
100	78,5
150	176,7
200	314,16

RESULTADOS:

Os resultados estão apresentados na tabela 5.12 abaixo.

Tabela 5.12 – Comportamento do tempo de disparo do sensor com o aumento da área de espalhamento da gasolina (a partir de um mesmo volume de gasolina presente na água)

TUBO (Diâmetro em mm)	Área transversal- (cm2)	Volume de gasolina adicionado no tubo (ml)	Tempo de disparo (s)
100	78,5	20	3
150	176,7	20	10
200	314,16	20	25

DISCUSSÃO

Os resultados mostram que:

1 - Um mesmo volume de gasolina (maior que o mínimo necessário para disparar o sensor) tende a disparar o sensor em um tempo menor, caso a gasolina se espalhe por uma área maior. Observa-se, por exemplo, que o tempo de disparo é aumentado de 3 para 25 s quando a área passa de 78,5 para 314,16 cm^2.

- Consideração Principal:

O comportamento descrito no item anterior era esperado, uma vez que, sendo a gasolina menos densa que a água, distribui-se igualmente por toda a superfície dela, formando um filme, cuja espessura vai diminuindo à medida que área de confinamento aumenta. Com isso, a quantidade de gasolina disponível para reação com o material polimérico é diminuída; aumentando, portanto, o tempo de disparo do sensor.

5.15.4 Análise do comportamento do Sensor em Água Salgada

Este teste foi importante para se avaliar a influência da água salgada no comportamento do material polimérico. Principalmente se o sal poderia provocar ou acelerar a diluição do polímero, independentemente da presença de gasolina na água.

-Detalhes adicionais do método:

O dispositivo de distensão com o bloco polimérico foi colocado flutuando no cilindro de 100 mm de diâmetro, com uma lâmina d'água salgada de 30 mm de altura. A água foi coletada diretamente do mar, na praia de Porto de Galinhas, Ipojuca – PE, em novembro de 2009. O recipiente foi colocado em um lugar protegido do sol para minimizar a evaporação. Porém, a cada semana, o volume foi completado. A abertura do dispositivo de 50 mm (altura do bloco polimérico) foi

medida semanalmente para verificar se estava havendo deformação do bloco de polimérico.

RESULTADOS:

Durante 12 semanas foram feitas as medições e verificado que não houve alteração dimensional na abertura do dispositivo.

DISCUSSÃO:

Esse resultado comprovou a estabilidade dimensional do bloco polimérico, fundamental para o funcionamento do sensor, mesmo em água salgada; apresentando excelente desempenho de estabilidade dimensional e resistência mecânica.

5.16 Resultados dos Testes no Protótipo

Os ensaios de funcionamento do protótipo foram realizados por etapas. Inicialmente foram testados os componentes integrantes do sistema de monitoramento, ou seja, o desempenho dos recursos de hardware e software do sistema. Depois houve a integração com o dispositivo de distensão da mola e avaliado o desempenho do conjunto. Os detalhes dos métodos e os principais resultados são apresentados a seguir.

5.16.1 – Testes no Hardware e Software

- Detalhes adicionais do método:

A placa eletrônica foi montada segundo parâmetros estabelecidos no item 4.4. Para verificação do funcionamento do hardware, foi utilizada uma fonte CA/CC entrada: 100-240V~50/60Hz; saída 5,0V - 0,550A, marca *National Instruments* para alimentação elétrica da placa eletrônica. Utilizou-se um multímetro digital,750,000 ± 0,001V como instrumento auxiliar de medições. Um visor de LCD e um LED de

sinalização serviram para visualização do funcionamento do software.

RESULTADOS:

Nos primeiros testes, quando o sistema era alimentado, o PIC fazia a aquisição do valor de ddp na mola e em seguida já apontava, no visor do LCD, um estouro de range (ΔV> 4mV) mesmo estando a mola em repouso, incorrendo num erro;

2 – A fonte do erro foi investigada. Dois fatores foram investigados: o processo de leitura do PIC, ou o nível de tensão gerada na mola;

3 - Com o auxílio de um amperímetro com precisão de 0,001V, foi verificado que o valor de tensão que estava chegando à entrada analógica do PIC realmente era instável e apresentava picos de valores superiores a 4mV. Ou seja, o sistema de leitura e a programação do PIC estavam funcionando corretamente.

4 – Passou-se então a investigar as causas que estavam gerando essa diferença de tensão mesmo estando a mola no seu estado de repouso. O primeiro passo foi isolar a fonte de corrente da placa (projetada) e alimentar a mola por meio da fonte externa de corrente, marca *National Instruments*, (com capacidade de 5,000±0,001A). A mesma utilizada para sensibilizar as molas nos ensaios de medição de ddp com a deformação.

5- Com o uso da fonte de corrente externa, a placa passou a apresentar o comportamento esperado. Ou seja, ficava em loop fazendo a aquisição dos valores de ddp com a mola em repouso e, no instante em que a mola se distendia, era gerado no visor do LCD a informação “estouro de range”, além de acender o LED vermelho;

6 – Foi feita a medição do valor de ddp na situação da mola em repouso. Foi possível verificar que a tensão gerada na mola apresentava uma variação máxima de 0,001V quando a corrente de sensibilização variava de 0,001A. Como a corrente

da fonte varia, no máximo de 0,001A, estando a mola em repouso não ocorre um $\Delta V > 1mV$. Portanto um valor inferior a 4 mV monitorado pelo PIC. Por isso, nesse estado, o sistema fica em loop de aquisição de dados;

7 - Foi feita a medição do valor de ddp na situação da mola distendida. A diferença medida entre esse valor e aquele, quando a mola estava em repouso, foi superior a 4mV, justificando o estouro de range apontado pelo PIC.

DISCUSSÃO

1 - O que pode ser visto foi que, mesmo projetada dentro dos parâmetros especificados no item 4.4, com comportamento estável previsto no fornecimento da corrente, a fonte de corrente não apresentou o desempenho esperado, apresentando uma instabilidade no valor da corrente fornecida. Essa corrente quando atravessa a mola de Ti-Ni, mesmo estando em repouso, é capaz de gerar valores de ddp diferentes. Esses valores podem exceder os 4mV entre duas medições consecutivas, que leva o PIC a dar um sinal falso de mola distendida;

2 - Os resultados apontaram para uma limitação do uso da fonte de corrente projetada.

- Considerações principais:

-Exceto a fonte de corrente, todas as partes do sistema de monitoramento, hardware e software, funcionaram satisfatoriamente segundo os requisitos determinados;

- O sistema de monitoramento acoplado dispositivo de distensão da mola apresentou um nível de estabilidade satisfatório. Isso mostra que as configurações adotadas no projeto dos sistemas eletrônico e mecânico são compatíveis e podem ser perfeitamente integradas.

5.16.2 - Testes no Protótipo

- Detalhes adicionais do método:

Após os resultados de bancada terem sido satisfatórios, o conjunto, sistema eletrônico acoplado ao mecânico, foi submetido a testes de desempenho simulando uma situação real de contaminação.

1 - O protótipo do sensor foi testado num recipiente cilíndrico de 100 mm de diâmetro, com uma lâmina d'água de 30 mm de altura, sendo adicionada gasolina comum em volumes de 10 em 10 ml, simulando a contaminação gradativa de um poço artesiano. O protótipo foi montado utilizando todos os recursos projetados, conforme descritos no item 4.4. Porém a corrente de sensibilização da mola foi fornecida pela fonte externa de tensão da *National Instruments*, devido às limitações apresentadas no item anterior, e que não foram superadas.

RESULTADOS

1 - O protótipo foi capaz de sinalizar a contaminação 5s após a adição da primeira fração adicionada, o que comprovou a eficiência do sensor no monitoramento da contaminação;

2 - O sensor ficou alimentado por 120hs com o mecânico aberto para se verificar se não haveria a atuação dele em função de uma possível variação na corrente de sensibilização da mola. O sensor não atuou durante esse intervalo;

3 - Após o período de 120hs em repouso, o sensor foi disparado, provocando a distensão da mola de Ti-Ni. Houve a sinalização imediata do evento, mostrando que, de fato, o sensor opera satisfatoriamente;

4 - Os testes do protótipo foram realizados no laboratório COMPOLAB da UFPE (Departamento de Engenharia Mecânica) numa temperatura próxima a 17°C. O sensor foi deixado com a mola em repouso durante 120hs. O sensor não sinalizou estouro de range, exceto quando o gatilho do dispositivo foi disparado, distendendo a mola de Ti-Ni. Esse resultado comprovou a estabilidade do sensor e o funcionamento adequado em uma temperatura considerada baixa.

5 - O ensaio descrito no item anterior foi aplicado estando o laboratório com o sistema de refrigeração desligado. A temperatura ambiente foi medida, próxima a 35°C. O sistema não apresentou nenhuma alteração nas funções de monitoramento.

DISCUSSÃO

Esses resultados foram importantes para se avaliar se a placa eletrônica, depois de integrada a todos os dispositivos do sistema, não apresentaria alterações de desempenho. Isso, considerando a sensibilidade dos componentes eletrônicos utilizados na montagem dos circuitos (principalmente, os transistores).

Considerações Principais:

- O protótipo repetiu o desempenho apresentado pelos componentes em separado, ou seja, da placa eletrônica e do dispositivo mecânico;

- A estabilidade do sistema na condição de monitoramento, ou seja, quando realizando as medições na mola, foi essencial para comprovação da aplicabilidade do sensor;

- A estabilidade do sistema, mesmo com a variação da temperatura ambiente, representou segurança de operação do sistema;

- O protótipo atendeu a todos os requisitos estabelecidos de operação; demonstrando a viabilidade de implementação do projeto.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho, em que são apresentadas as sínteses conclusivas dos principais temas abordados. As conclusões gerais foram construídas a partir das conclusões parciais dos experimentos e servem para destacar os efeitos e resultados mais relevantes alcançados.

A seguir estão listadas as principais conclusões sobre o sensor (o dispositivo mecânico mais a mola de Ti-Ni mais o bloco polimérico), o dispositivo de monitoramento (a parte eletrônica de medição e envio de sinais) e do protótipo (o sensor mais o dispositivo de monitoramento).

1 - O sensor foi desenvolvido, baseado no teste dos quatro pontos para medição de resistividade elétrica em condutores. O princípio do teste mostrou-se perfeitamente adequado para o desenvolvimento do sensor;

2 - A liga de Ti-Ni utilizada para a confecção do sensor apresentou resultados de estabilidade física e do efeito memória de forma, dentro da faixa de temperatura prevista para aplicação (10 a 40ºC). Permitiu a obtenção do elemento sensor na forma de mola helicoidal e apresentou uma variação de resistividade elétrica, com consequente sinal de ddp, adequada ao monitoramento via microcontroladores;

3 – O sensor não usa abertura ou fechamento de contatos eletromecânicos e opera com correntes e tensão elétrica de pequena intensidade. Isso impossibilita a abertura de arcos elétricos e surgimento de faíscas. Essa configuração representa segurança no uso do sensor em contato com gasolina;

4 - A mola utilizada no sensor, uma vez tratada termicamente, oferece confiabilidade no monitoramento; já que, em temperaturas acima de -0,63ºC, a sua resistividade elétrica é predominantemente afetada pela deformação mecânica; podendo ser

considerada desprezível a influência da variação de temperatura ambiente;

5 - O material polimérico utilizado como gatilho do sensor mostrou-se perfeitamente adequado ao uso, atendendo às características esperadas tanto de reação ao contato com a gasolina, como de estabilidade de desempenho mecânico;

6 - Não houve resultado algum no uso do CAP que justificasse o abandono do material polimérico como material preferencial para uso como gatilho do dispositivo de distensão;

7 - O bloco polimérico tem uma massa de aproximadamente 0,4 mg. Sendo que aproximadamente 98% da massa total do bloco é preenchida pelo ar, e apenas 2% pela matéria prima, efetivamente. Assim, apenas cerca de 0,008 mg, ou 8μg do polímero dissolvido é lançado na água no momento do disparo. Portanto, o sensor pode ser considerado de efeito poluente desprezível quando comparado com a gasolina monitorada;

8 - Uma fonte de corrente pode ser utilizada para gerar a corrente de sensibilização da mola, enquanto a entrada analógica de um microcontrolador foi perfeitamente viável de ser utilizada para medir a variação da ddp no sensor. Desse modo, foi possível obter o sistema de monitoramento;

9 - A utilização dos microcontroladores permite agregar ao sistema todos os recursos deste dispositivo. O que representa grande flexibilidade no tratamento dos sinais e projetos de aplicação;

10 - Um dos principais ganhos com o uso dos microcontroladores é possibilidade da comunicação de eventos por sinais digitais de comunicação à distância (como redes de computadores, microondas, internet, radiofreqüência, GPS, etc.), permitindo o monitoramento de modo remoto;

11 – Os testes realizados no protótipo mostraram sua eficiência no monitoramento da contaminação por gasolina. O protótipo foi capaz de sinalizar a contaminação em

tubo de 100 mm de diâmetro 5 s após a adição de 10 ml de gasolina e em menos de 2 s para adição acima de 30 ml;

12 - Os componentes empregados foram de dimensões reduzidas, operações simples e comercialmente disponíveis. Essas características apontam para a viabilidade de produção do sistema a um baixo custo e de simples operação;

Os resultados referem-se ao desempenho mecânico, elétrico, físico e químico dos materiais empregados. O desempenho final do protótipo mostrou que os componentes foram satisfatoriamente selecionados.

A estabilidade do sensor durante operação por longo tempo, embora em condições laboratoriais, mostrou que a filosofia do projeto é adequada à aplicação.

Assim, tudo apontou para a viabilidade técnica e econômica da produção do sensor e do sistema de monitoramento.

CAPÍTULO 7 - RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES

Alguns detalhes funcionais e requisitos para fabricação requerem maior estudo. Alguns são necessários para a otimização da operação do sistema; outros podem agregar-lhe valor significativo, uma vez que, através dos resultados, pode haver uma adequação ou ampliação da aplicação. Os tópicos sugeridos para esses estudos são apresentados a seguir.

1 - Otimização do projeto do sensor (miniaturização dos componentes);

2 - Aprimoramento do projeto da fonte de corrente;

3 - Estudos do comportamento do sensor em temperaturas mais elevadas;

4 - Estudo de novos polímeros para reação com óleo diesel, álcool, lubrificantes e outros contaminantes;

5 - Aplicar outros tratamentos térmicos, ou testar outras composições de liga Ti-Ni, visando obter molas com temperatura Af o mais baixa possível; para viabilizar a aplicação do sensor em temperaturas abaixo de 0°C.

6 - Estudos do CAP, especificamente as propriedades do malteno para aplicações específicas;

7- Estudo do comportamento do efeito memória de forma em mola de Ti-Ni, após longo período de tempo distendida;

8 – Estudos da estabilidade dimensional do polímero após longos períodos sob tensão, para se definir o tempo máximo de utilização do material como gatilho de disparo.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Fiúza, A.,M., A. Considerações Sobre Tecnologias De Reabilitação De Solos Contaminados. Centro de Investigação em Geo-Ambiente e Recursos (CIGAR),

Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Revista Indústria e Ambiente, N.54. Jan/Fev.2009.

[2] Sugimoto, L., Sensores Detectam E Monitoram Contaminação De Águas Subterrâneas, Jornal da Unicamp, 22 a 28 de novembro de 2004.

[3] Corseuil, H.X., Marins, M.M., Contaminação De Águas Subterrâneas Por Derramamento De Gasolina: O Problema É Grave? Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.2, p.50-54, 1997.

[4] Tirbutius, E.,R.,L; Peralta-Zamora, P.; Emmel, A. Degradação De Benzeno, Tolueno E Xilenos Em Águas Contaminadas Por Gasolina, Utilizando-Se Processos Foto-Fenton. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, p.2058-2063, 2009.

[5] Quitério, G., C., M.; Almeida, T., I., R.; Filho, C., R., S. Caracterização Espectral De Brachiaria Brizantha Cultivada Em Solo Contaminado Por Hidrocarbonetos Como Instrumento De Detecção De Vazamentos Em Dutos. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, , INPE, p. 5381-5388. 25-30 abril 2009.

[6] Bratberg, D., Hopkins, L., Risk Based Corrective Action And Risk Assessment Procedures In The United States: A 1995 Survey. In: Proceedings Of The 1995 Petroleum Hydrocarbon And Organic Chemicals In Ground Water: Prevention, Detection, And Restoration Conference, Houston, Texas, p. 25-31, Nov.,1995.

[7] PETROBRÁS. Relatório Anual De Atividades, Rio de Janeiro, 1995.

[8] Brasil, Agência Nacional do Petróleo, Anuário Estatístico 2007, Seção 3 – Comercialização, em: http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2007.asp., consultado em: 14 de abril de 2008.

[9] Brasil, Agência Nacional do Petróleo, Dados Estatísticos, Venda De Combustíveis, em: http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp., consultado em: 14 de abril de 2008.

[10] Cadorin, M., Comunicação Pessoal, Presidente da Fundação de Meio Ambiente, Joinville, SC., 1996.

[11] JC Online, Jornal do Comércio de Pernambuco, Lençol Freático Contaminado Por Combustível, em: http:www.jc.com.br/JC_Cidades, consultado em:15 de abril de 2009.

[12] Kermanshahi, A.; Karamanev, D.; Margaritis, A.; Biochem. Eng. J, 27, 204. 2006.

[13] Langwaldt, J. H.; Puhakka, J. A.; Environ. Pollut. 2000, 107, 187.

[14] Queiroz,S.; Maximiano, A.; Siqueira, A., F.; Cruz, Z., M., A. Parâmetros Físico-Químicos E Microbiológicos Do Processo De Atenuação Natural Monitorada Em Área Contaminada Por Solventes Clorados. Revista Natureza On-Line, ESFA, 7p. 2007.

[15] Santos, E.,S.; Santos, R., L., C.; Rizzo, L., A., C.; Telhado, M., C., S., C., L. Monitoramento da Atenuação Natural de Solo Contaminado por Petróleo. XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM. p.290-296. 2008.

[16] Derrite, F., M. Estudo Da Viabilidade Do Método De Remediação Atenuação Natural Monitorada. Universidade Estadual Paulista
Júlio De Mesquita Filho- Campus de Sorocaba – SP. Projeto de Pesquisa.13p. 2009.

[17]. Corseuil, H.X., Weber, W.J., Jr., Potential Biomass Limitations On Rates Of Degradation Of Monoaromatic Hydrocarbons By Indigenous Microbes In Subsurface Soils, Wat. Res., v.28, p.1407-1414, 1994.

[18] Corseuil, H.X., Alvarez, P.J.J. Natural Bioremediation Perspective For Btexcontamineted Groundwater In Brazil. Rev. Microbiol., S. Paulo v.27, n.1,p. 43-50, 1996.

[19] Celino, J., J. Hidrocarbonetos Aromáticos E A Qualidade Da Água Subterrânea Da Região Metropolitana De Salvador, Bahia. CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico. Projeto de Pesquisa. 14p. 2009.

[20] Mspc Engenharia, Contaminação De Águas Subterrâneas, em:

http://www.mspc.eng.br/fldetc/topdiv_agua_10.shtml, consultado em 08 de outubro de 2009.

[21] Júnior, A., G. Determinação De Selênio Em Água Subterrânea Utilizando A Espectrometria De Absorção Atômica Com Atomização Eletrotérmica Em Forno De Grafita (Gfaas) E Geração De Hidretos (Hgaas). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo – Dissertação de Mestrado. 131p. 2008.

[22] Lescano, G., M., A. Geração Descentralizada De Reservas Operativas Através Do Aproveitamento Dos Resíduos Sólidos Urbanos Como Fonte De Energia Renovável. XLI SBPO - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento. 12p. 2009.

[23] Braga, A., C., O. Moreira, C., A. Cardinali, M., T. Variação Temporal Da Resistividade Elétrica Em Contaminação Por Gasolina. São Paulo, UNESP/Campus Rio Claro, Geociências, v.27, n.4, p.517-525, 2008.

[24] Peirs J.; Revnaerts D.; Brussel, V.H. “Shape Memory Micro-Mechanisms For Medical Applications”. ICAR '97, Monterey, CA, July 7-9, 1997.

[25] Stockel.D.”The Shape Memory Effect - Phenomenon, Alloys, Applications”. NDC, Nitinol Devices & Components, Inc., Fremont, CA. EUROflex G. RAU GmbH. 2000.

[26] Naganuma, T.; Kyo, M.; Ueki, T., Takeda, K.; Ishibashi5, J.I. “A New, Automatic Hydrothermal Fluid Sampler Using A Shape-Memory Alloy”. Journal of Oceanography. 1998.Vol. 54. p. 241 - 246.

[27] Laurentis, K. J.; Mavroidis, C. “Mechanical design of a shape memory alloy actuated prosthetic hand”. Technology and Health Care. 2002. Vol. 10. p. 91–106.

[28] Maeda, S.; Abe, K.; Yamamoto K.; Tohyama, O; Ito, H. “Active Endoscope With SMA (shape memory alloy) Coil Springs”. Fundamental Research Department. 1996. p. 290-295.

[29] Duerig, T. M.; Pelton, A.; Stöckel, D. “An Overview Of Nitinol Medical Applications”. Materials Science and Engeneering, 1999 .A273-275.

[30] Oliveira C.A.N.; Caracterização Termoelástica De Molas Da Liga Cu-Zn-Al Com Memória De Forma. Dissertação (Mestrado) - UFPE-PE / DEMEC, 2007. 79p. 1. Molas helicoidais. 2. Efeito memória de forma. 3. Transformações martensíticas. 4. Deformação termoelástica.

[31] Otsuka, K.; Wayman, C. M.. “Shape Memory Materials”, Cambridge University Press, Cambridge, UK 1998, p. 1 – 131.

[32] Funakubo, H.; “Shape Memory Alloys”, University of Tokyo.1986.Vol 1. P. 275.

[33] Gonzalez, C. H. “Etude Des Comportements Electro-Thermomécaniques Et De La Stabilization Martensitique D’alliages Monocristallins À Mémoire De Forme Base Cuivre”. :Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Villerbonne. France. 2002. p.20 – 24, 40 – 141.

[34] Melconian, Sarkis. “Elementos De Máquinas”. Editora Érica. Edição 1º. São Paulo. 1990. p. 1-60.

[35] Carvalho, J. R.; Moraes, P. L. J. “Órgãos De Máquinas Dimensionais”. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Edição 3º. Rio de Janeiro. 1984. p. 85-92.

[36] Norton, Robert L. “Projeto De Máquinas Uma Abordagem Integrada”. Trad. João Batista de Águia, José Manoel de Aguiar...[et al]. Editora Bookman. Edição 2º. Porto Alegre. 2004. p.475-498.

[37] Bezerra, M. de A; Franca, P. B. Microcomputadores: Arquitetura, Projeto, Programação. Rio de Janeiro: L.T.C, 1985. 223 p.

[38] Shimizu, T. Programação Assembler Para Microcomputadores 68000, 68010, 68020. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1987. 331 p.

[39] Amadeu, V., Microcontroladores PIC, em: http://www.cerne-tec.com.br., consultado em 16 de junho de 2006.

[40] Boylestad, Robert L. Dispositivos Eletrônicos E Teoria Dos Circuitos, 8ª Edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2004.

[41] Fontes De Alimentação De Tensão E Corrente; disponível em: http://www.ifi.unicamp.br/~kleinke/f540/e_bjt2.htm, 2009.

[42] Callister Jr., W.D., Materials Science and Engineering. John Wiley e Sons, New York.1996.

[43] Blass, A. Processamento de Polímeros. UFSC, Florianópolis. 1985.

[44] Michael, W.; Greif, H.; Kaufmann, H. & Vosseburger, F.J. Tecnologia dos Plásticos, Edgard Blucher, São Paulo. 1995.

[45] Telles, P. C.S. Materiais para Equipamentos e Processo. 6ª Ed. Rio de Janeiro, Interciência.2003.

[46] Almeida, R. N.1, Kielling, J. A.1 e Machado, R. F. Investigação da aplicação de Polímeros Biodegradáveis para Confecção de Filmes. Departamento de Engenharia Química e de Alimentos – Laboratório de
Controle de Processos - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

[47] CAP, Cimento Asfáltico De Petróleo, disponível em: www.lwart.com.br, 2009.

[48] Senço, W. Manual De Técnicas De Pavimentação; Ed. Pini, São Paulo, 1997.

[49] Lucena, M.C.C. Caracterização Química E Reológica De Asfaltos Modificados Por Polímeros. Tese (Doutorado em Química Inorgânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2005.

[50] Morales, M. G.; Partal, P.; Navarro, F. J. Viscous Properties And Microstructure Of Recycled EVA Modified Bitumen. Fuel, v. 83, p.31-38. 2004.

[51] OH, K.; Ring, T. A.; Deo, M. D. Asphaltene Aggregation In Organic Solvents. Journal Of Colloid And Interface Science, v. 271 p. 212-219, 2004.

[52] Madge, D. N.; Garner, W. N. Theory Of Asphaltene Precipitation In A Hydrocarbon Cyclone. Minerals Engineering, v.20, p.387-394, 2007.

[53] Murgich, J.; Rodrigues, J. M.; Aray, Y. Molecular Recognition And Molecular Mechanics Of Micelles Of Some Model Asphaltenes And Resins. Energy & Fuels, v. 10, p. 68-76, 1996.

[54] Ligantes Asfálticos; disponível em: http://www.betunel.com.br/produtoseservicos.htm, 2009.

[55] Boyer, R. R. Titanium And Titanium Alloys. In: Mills, K.; Davis, J. R.; Destefani, J. D.; Dieterich, D. A.; Crankovic, G. M.; Frissel, H. J.; Jenkins, D. M. (Ed.) Metals Handbook, Ninth Edition. Volume 9: Metallography and Microstructures. Metals Park, Ohio, 1985. p. 458-475.

[56] ASTM F-2004-03, 2004. Standard Test Method For Transformation Temperature Of Nickel-Titanium Alloys By Thermal Analysis. 3p.

[57] Chang, S. H.; Wu, S. K.; Chang, G. H. Grain Size Effect On Multiple-Stage Transformations Of A Cold-Rolled And Annealed Equiatomic Tini Alloy. Scripta Materialia, v.52, p.1341–1346, 2005.

[58] Coluzzi, B., Biscarini,A., Dimassol,L. Phase Transition Features Of Nickel-Titanium Orthodontic Wires Subjected To Constant Bending Strains. J. Alloys Compounds. V.233,p.197-205,1996.

[59] Elias, C.N., Lopes, H.P. Materiais Dentários – Ensaios Mecânicos. São Paulo; Livraria santos Editora. 266 p., 2007.

[60] Fisher- Brandies, H., Es-Souni, M., Kock, N., Raetzke, K., Bock,O. Transformation Behavior, Chemical Composition, Surface Topography And Bending Properties Of Five Selected 0.016” X 0.022” Niti Archwires. Journal of Orofacial Orthopedics, v.64 (2), p.88-99,2003.

[61] Gravina, M.A.: Motta, ATS; Quintão,CCA; Mendes, AM. Histórico De Fios Utilizados Em Ortodontia. Revista Ortodontia Gaúcha, v.VII, n. 1, p. 65-70, 2003.

[62] Gravina, M.A.; Quintão, Abdo, C.C.; Koo, D.; Elias, Nelson, C. Mechanical

Properties Of Nickel Titanium And Steel Alloys Under Stress-Sstrain Test. The Korean Journal of Orthodontics.v.33,n.n.6,p.465-474, 2004.

[63] Otsuka, K.; Ren, X. Physical Metallurgy Of Ti–Ni-Based Shape Memory Alloys. Progress in Materials Science, v.50, p.511–678, 2005.

[64] Hesse, T.; Ghorashi, M.; Inman, D. J. Shape Memory Alloy In Tension And Compression And Its Application As Clamping-Force Actuator In A Bolted Joint: Part 1– Experimentation. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.15,p.577-587, 2004.

[65] Antonio, C.; Inman, D. J.; Smaili, A. Experimental And Theoretical Behavior Of Self-Healing Bolted Joints. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.17, p.499–509, 2004.

[66] SINTEF, Petroleum Research. Datailed Study Of Shape Memory Alloys In Oilwell Applications. Report, July 1999.

[67] Queiroga, S. L. M. Estudo De Uma Liga Cu-Al-Ni Com Memória De Forma Visando Aplicações Em Sistemas De Proteção Contra Sobrecargas Elétricas. 2006. 77 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.

[68] Saadat,S., Salichs, J. Noori, M., Hou, Z., Davoodi, H., Bar-on, I ., Suzuki, Y., Masuda, A. An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy. Smart Materials And Structures, Institute Of Physics Publishing, Smart Mater, Struct, 11 p. 218–229,2002.

[69] Cavalcanti, P.J.M., Fundamentos De Eletrotécnica; 21Edição; Editora Freitas Bastos; 122p., 2005.

[70] Stanislau, V.Tairov., Eletrônica Básica, Editora EDUCS; 146p., 2001.

[71] Alfred W. Franke; A Micro Revolução (the micro revolution), Ed. Reverté, RJ,

190p., 1983.

[72] Bogart. Dispositivos De Circuitos Eletrônicos;Ed. Makron Books; 604p., 2001.

[73] Arthur P.Salsberg; Eletronic Experimenters Handbook; Ed.Ziff-Davis Publishing, EUA; 126p., 1979.

[74] Taub, H. Digital Circuits And Microprocessors. New York: McGraw-Hill, 541 p., 1982.

[75] Amazonas, J.R.A. Projetos De Sistemas De Comunicação Opticos. Ed.Manole;2005;698p.

[76] Julian, S. Martins; Eletronics Theory Handbook; 1979; Ed. Davis Publications, EUA.

[77] I. Kaganov. Eletronics IIndustry. Ed. Peace Publishers, Moscou; 2001;504p.

[78] INSTITUTE OF PETROLEUM. IP 143 - Standard Methods For Analysis And Testing Of Petroleum And Related Products. 1989.

[79] Bezerra, J.,S. Medição De Ddp Em Uma Mola Helicoidal De Ti-Ni., Seminário De Tecnologia – COMPOLAB-DEMEC-UFPE, 2010.

ANEXO 1 – RESPOSTA DE ATUAÇÃO DO SENSOR COM A CONCENTRAÇÃO DE GASOLINA NA ÁGUA

Tabela A.1 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 100 mm de diâmetro.

Volume adicionado de gasolina (ml)	Tempo médio de resposta (s)
1,0	∞
2,0	∞
3,0	60
4,0	25

6,0	20
8,0	10
10,0	5
20,0	3
30,0	2
>30,0	<2

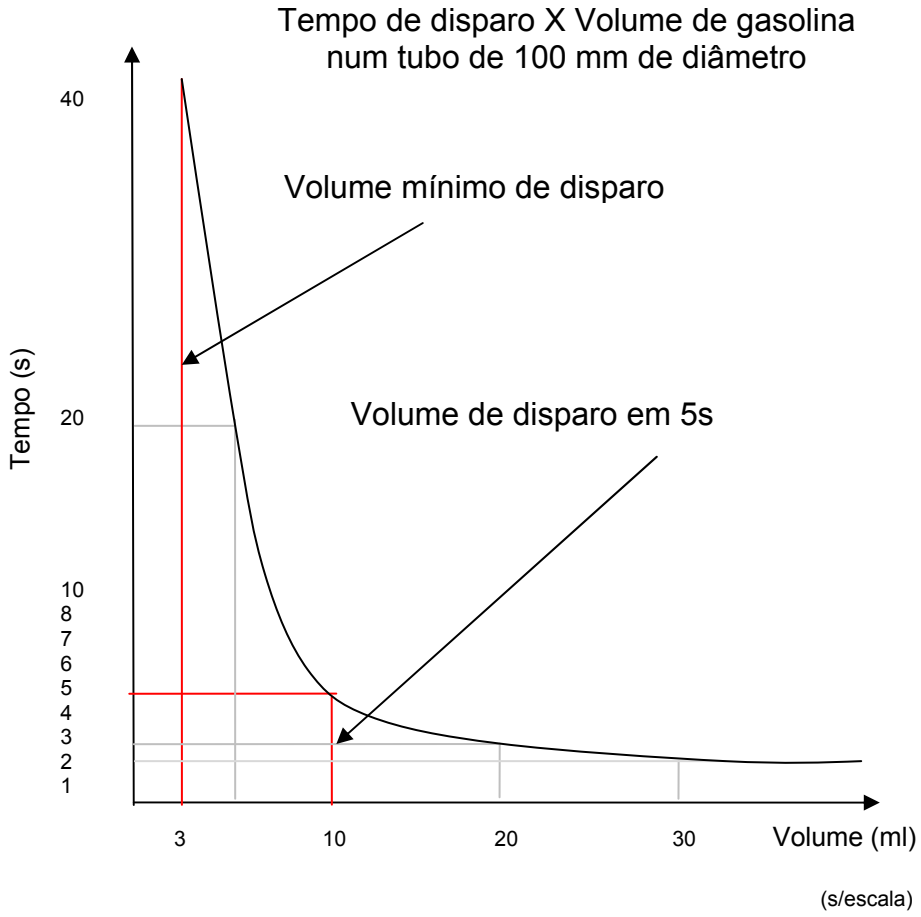


Figura A.1- Gráfico do tempo de disparo do sensor com o volume de gasolina na água num tubo de 100 mm de diâmetro. Em destaque dois pontos importantes: a) Volume mínimo de disparo do sensor; b) Volume de disparo em 5s.

Tabela A.2 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 150 mm de diâmetro.

Volume adicionado de gasolina	Tempo de resposta (s)
3	∞
4	∞
6	∞
8	60
15	20
20	10
25	5
40	3
60	2
>60	<2

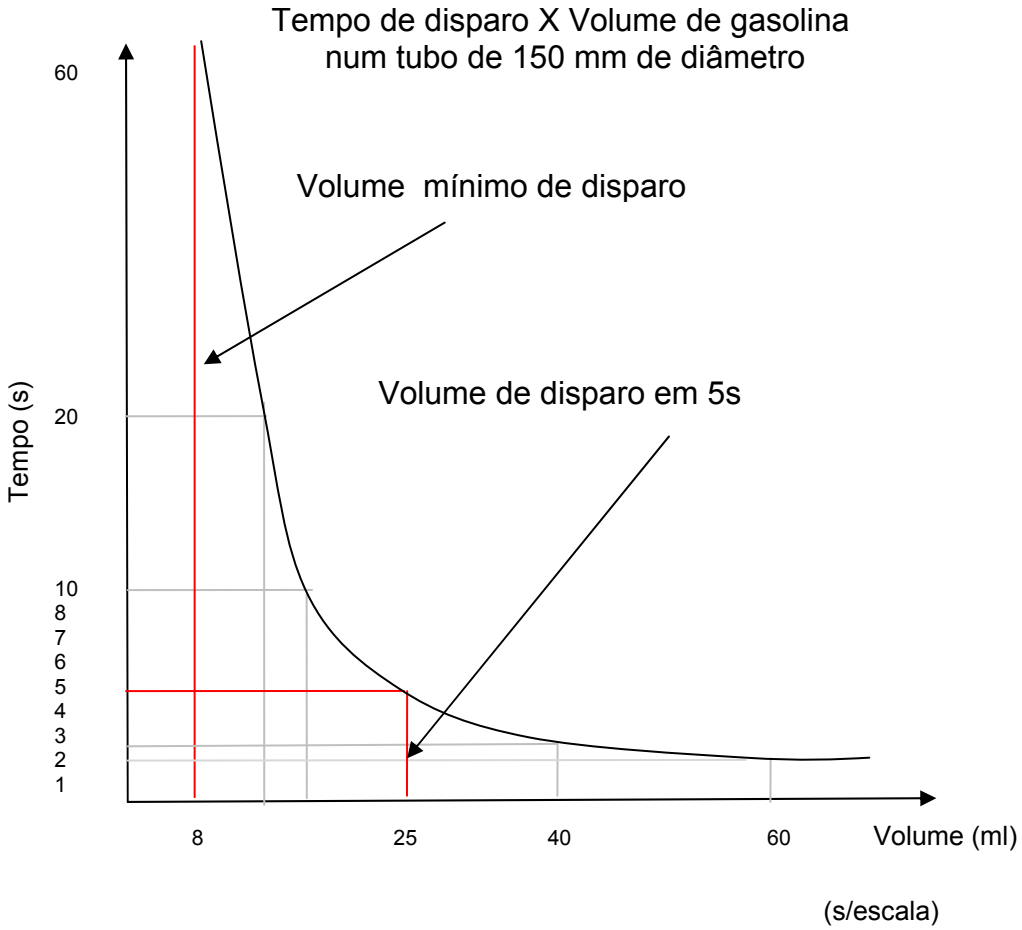


Figura A.2 - Gráfico do tempo de disparo do sensor com a concentração de gasolina na água num tubo de 150 ml. Em destaque dois pontos importantes: a) Volume mínimo de disparo do sensor; b) Volume de disparo em 5s.

Tabela A.3 - Tempo de resposta de atuação do sensor no tubo de 200 mm de diâmetro.

Volume adicionado de gasolina (ml)	Tempo de resposta (s)
5,0	∞
6,0	∞
8,0	∞
10,0	∞
15,0	60
20,0	25
25,0	20
30,0	15
40,0	10
50,0	5
80,0	3
100,0	2
>100,0	<2

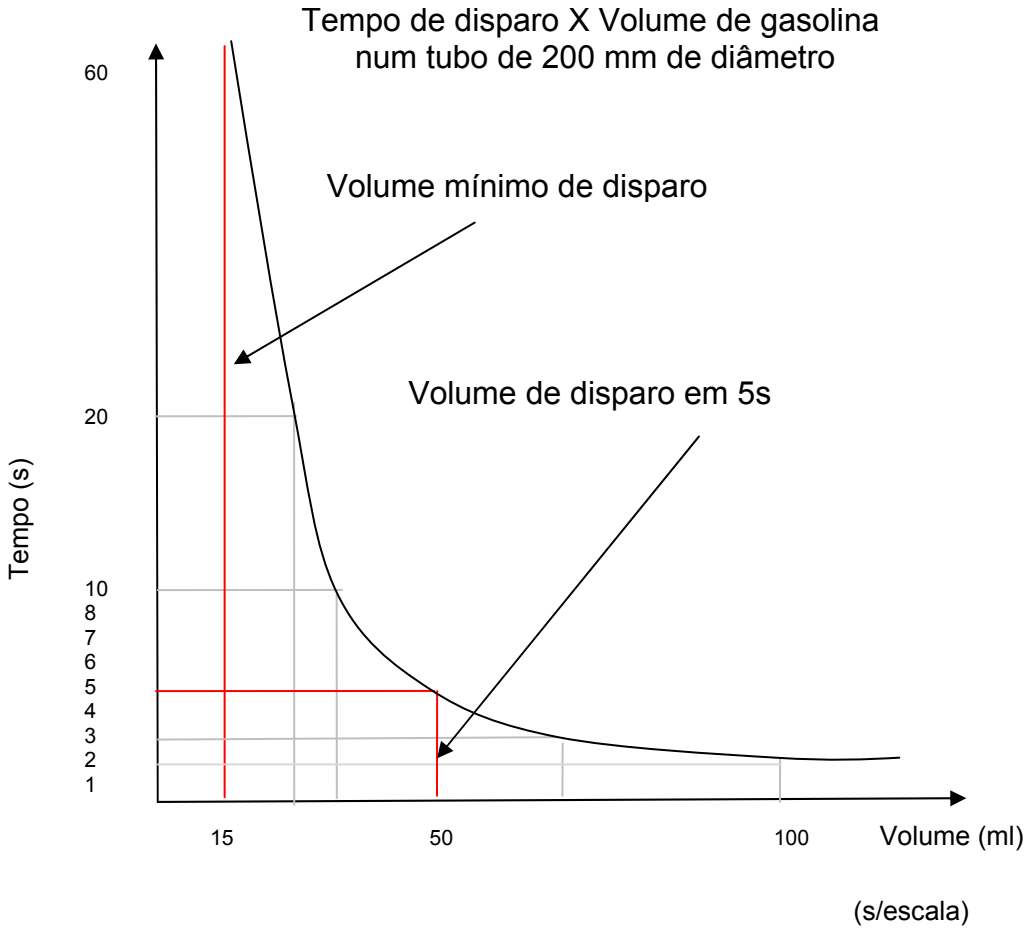


Figura A.3 - Gráfico do tempo de disparo do sensor com a concentração de gasolina na água num tubo de 200 ml. Em destaque dois pontos importantes: a) Volume mínimo de disparo do sensor; b) Volume de disparo em 5s.