

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS FREITAS KUHN

**SENSOR RFID PASSIVO PARA MONITORAMENTO DE  
DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Porto Alegre  
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS FREITAS KUHN

**SENSOR RFID PASSIVO PARA MONITORAMENTO DE  
DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais. Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke

Porto Alegre  
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-diretor: Carla Schwengber ten Caten

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE3M

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador substituto: Prof. Dr. Afonso Reguly

Kuhn, Matheus Freitas

SENSOR RFID PASSIVO PARA MONITORAMENTO DE  
DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS/ Matheus  
Freitas Kuhn. – 2017.

105 f.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Sensor de Deformação. 2. RFID. 3. Passivo. I. Clarke, Thomas  
Gabriel Rosauo, orient. II. Título.

MATHEUS FREITAS KUHN

## **SENSOR RFID PASSIVO PARA MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

---

Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

---

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Renato Machado de Brito – UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Dr. Guilherme Petry Breier – CEITEC S.A. – Porto Alegre, Brasil

Dr. Ricardo Callegari Jacques – FAURGS – Porto Alegre, Brasil

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade e excelência no ensino.

Agradeço ao Laboratório de Metalurgia Física, LAMEF, pelo apoio tecnológico e intelectual. Em especial ao Prof. Dr. Thomas Clarke pelo auxílio e confiança depositada neste trabalho. Também agradeço aos colegas do grupo GEND que de alguma forma contribuíram neste trabalho.

Agradeço a CEITEC S.A pela colaboração intelectual e material. Também ao Especialista em Tecnologia Eletrônica Avançada, Dr. Guilherme Petry Breier, pelo aconselhamento e disposição no auxílio deste trabalho.

Agradeço ao meu pai e minha mãe, Valdair Gabriel Kuhn e Ricarda Freitas Kuhn, por sempre investir e incentivar minha educação e pelo carinho que sempre me dedicaram. Também a Bruna Valvassori dos Santos, minha namorada, pelo companheirismo ao longo desta trajetória.

## RESUMO

Tecnologias para o monitoramento de componentes estruturais, como strain gauges e fibra ótica, são comumente utilizadas quando deseja-se obter informações sobre o estado de deformação. Ambas as técnicas exigem cabeamento, produzindo diversas adversidades em suas aplicações. Assim, novas tecnologias sem fio vem ganhando espaço, buscando monitoramento remoto e versátil. Sensores sem fio, utilizando a tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID), se mostram atrativos meios de contornar estas adversidades. Estes sensores são formados por uma antena e um componente integrado de identificação RFID. O conceito de funcionamento do sensor é que ao ser fixado no componente que deseja ser monitorado, irá sofrer esforços mecânicos semelhantes aos esforços sofridos pelo componente e irá se deformar. Esta deformação conduzirá a uma alteração sua frequência de ressonância. Dessa forma, dependendo do tipo de esforço uma resposta será obtida. Para construção do sensor foi utilizado o material NY9220 para o corpo de prova uma chapa de alumínio de 2 mm de espessura. Para validação do sensor, inicialmente foi realizado um estudo numérico pelo método de elementos finitos. Posteriormente uma etapa experimental foi realizada onde o sensor foi fixado através de resina ao corpo de prova. À medida que deslocamentos eram aplicados os dados da frequência de ressonância e deformação são coletados e estes correlacionados. Uma correlação linear entre frequência de ressonância e deformação foi verificada no modelo numérico e na parte experimental. O sensor se mostrou capaz de detectar e monitorar deformações em estruturas metálicas.

**Palavras-chave:** Sensor de Deformação. RFID. Passivo.

## ABSTRACT

Technologies for the monitoring of structural components, such as strain gauges and fiber optic, are commonly used when information on the state of deformation is desired. Both techniques require cabling, producing various adversities in their applications. Thus, new wireless technologies have been gaining space, seeking remote and versatile monitoring. Wireless sensors, using Radio Frequency Identification (RFID) technology, are attractive means of getting around these adversities. These sensors consist of an antenna and an integrated identification component RFID. The concept of operation of the sensor is that when attached to the component it wishes to be monitored, it will undergo similar stresses to the stresses suffered by the component and will deform. This strain will lead to a change in its resonant frequency. In this way, depending on the type of effort, a response will be obtained. For the construction of the sensor was used the material NY9220 for the specimen a sheet of aluminum of 2 mm of thickness. For the validation of the sensor, a numerical study was initially carried out by the finite element method. Subsequently an experimental stage was performed where the sensor was fixed through resin to the specimen. As displacements were applied, the resonance and strain frequency data were collected and correlated. A linear correlation between resonance frequency and strain was verified in the numerical model and in the experimental part. The sensor was able to detect and monitor deformations in metal structures.

Keywords: Strain Sensor. RFID. Passive.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de radiação antena direcional à esquerda e antena omnidirecional à direita. ....	6
Figura 2 – Polarização linear vertical de onda eletromagnética. ....	8
Figura 3 – MSA. ....	11
Figura 4 – Conexão através de: <i>shorting wall</i> à esquerda e vias à direita. ....	13
Figura 5 – Efeito da deformação na frequência de ressonância. ....	14
Figura 6 – Sistema RFID. ....	17
Figura 7 – Tag passiva. ....	18
Figura 8 – Configuração do CI. ....	19
Figura 9 – Mecanismo de comunicação por acoplamento indutivo. ....	20
Figura 10 – Acoplamento por retro espalhamento. ....	21
Figura 11 – Linearidade entre frequência de ressonância e deformação. ....	23
Figura 12 – Linearidade de deformação e frequência de um sensor RFID. ....	24
Figura 13 – Variação da frequência de ressonância com a força aplicada. ....	26
Figura 14 - Estatística <i>d</i> de Durbin-Watson. ....	28
Figura 15 – Ensaio mecânico proposto. ....	32
Figura 16 – Regiões em destaque para o desenvolvimento do sensor. ....	34
Figura 17 – Modelo sensor. ....	35
Figura 18 – Configuração do ensaio. ....	36
Figura 19 – Resultados obtidos na equação 18. ....	37
Figura 20 – Obtenção da frequência de ressonância. ....	38
Figura 21 – Equipamento Tagformance Lite. ....	39
Figura 22 – Processo de obtenção da frequência de ressonância para o deslocamento aplicado. ....	40
Figura 23 – Frequência de ressonância para Modelo I simulação HFSS. ....	42
Figura 24 – Impedância Modelo I simulação HFSS. ....	42
Figura 25 – Ganho Modelo I simulação HFSS. ....	42
Figura 26 – Variações das ressonâncias devido ao aumento da altura do <i>Loop</i> . ....	43
Figura 27 – Variações da resistência devido ao aumento da altura do loop. ....	44
Figura 28 - Variações da reatância devido ao aumento da altura do loop. ....	44
Figura 29 – Efeito do aumento da largura do <i>loop</i> sobre as ressonâncias. ....	45
Figura 30 – Efeito do aumento da largura do <i>loop</i> na resistência referente à ressonância do patch. ....	45
Figura 31 – Aumento da reatância referente à ressonância do <i>patch</i> com o aumento da largura do <i>loop</i> . ....	46
Figura 32 – Variação da largura do patch e seu efeito sobre as ressonâncias. ....	46
Figura 33 – Efeito da variação da largura do Patch sob a resistência da ressonância do patch. ....	47
Figura 34 - Efeito da variação da largura do Patch sob a reatância da ressonância do patch. ....	47
Figura 35 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre as ressonâncias. ....	48
Figura 36 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre a resistência da ressonância do patch. ....	48
Figura 37 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre a reatância da ressonância do patch. ....	49
Figura 38 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre as ressonâncias. ....	49
Figura 39 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre a resistência. ....	50
Figura 40 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre a reatância. ....	50
Figura 41 - Efeito do deslocamento da via, na direção da largura do patch, sobre as ressonâncias. ....	51
Figura 42 – Efeito do deslocamento da via, na direção da largura, sobre a resistência. ....	51
Figura 43 – Efeito do deslocamento da via, na direção da largura do patch, sobre a reatância. ....	52
Figura 44 – Resultado da simulação no COMSOL para 0 de deslocamento aplicado ao sensor. ....	52
Figura 45 – Curvas de Regressão para cada deslocamento aplicado sensor I Simulação. ....	53
Figura 46 – Regressão linear simples para os deslocamentos Sensor I Simulação. ....	54
Figura 47 – Regressão Linear Simples para as deformações Sensor I Simulação. ....	54
Figura 48 - Frequência de ressonância simulada para sensor II. ....	56



Figura 49 – Impedância sensor II simulação.....	56
Figura 50 – Diagrama de Radiação e Ganho sensor II.....	56
Figura 51 – Comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado sensor II.....	57
Figura 52 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II simulação.....	57
Figura 53 – Regressão linear simples para as deformações sensor II simulação.....	58
Figura 54 - Frequência de ressonância simulada para sensor III.....	59
Figura 55 – Impedância sensor III simulação.....	60
Figura 56 – Diagrama de Radiação e Ganho sensor III simulação.....	60
Figura 57 – Comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado sensor III.....	61
Figura 58 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III simulação.....	61
Figura 59 – Regressão linear simples para as deformações sensor III simulação.....	62
Figura 60 – Resultados experimentais modelo I, zero de deslocamento.....	63
Figura 61 – Regressão linear simples em função dos deslocamentos, experimental, sensor I.....	64
Figura 62 – Regressão linear simples em função das deformações, experimental, sensor I.....	64
Figura 63 – Representação das amplitudes de medida para cada deslocamento.....	65
Figura 64 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-A.....	66
Figura 65 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-A experimental.....	67
Figura 66 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-A experimental.....	67
Figura 67 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-A.....	68
Figura 68 – Resíduos obtidos em função do deslocamento sensor II-A.....	69
Figura 69 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-B.....	70
Figura 70 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-B experimental.....	70
Figura 71 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-B experimental.....	71
Figura 72 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-B.....	71
Figura 73 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-C.....	72
Figura 74 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-C experimental.....	73
Figura 75 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-C experimental.....	73
Figura 76 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-C.....	74
Figura 77 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-A.....	75
Figura 78 – Regressão linear simples para os deslocamentos modelo II experimental.....	75
Figura 79 – Regressão linear simples para as deformações modelo II experimental.....	76
Figura 80 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-a.....	76
Figura 81 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-b.....	77
Figura 82 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III-b experimental.....	78
Figura 83 – Regressão linear simples para as deformações sensor III-b experimental.....	78
Figura 84 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-b.....	79
Figura 85 – Resíduos em função da variável deslocamento para o sensor III-b.....	80
Figura 86 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-c.....	81
Figura 87 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III-c experimental.....	81
Figura 88 – Regressão linear simples para as deformações sensor III-c experimental.....	82
Figura 89 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-c.....	82
Figura 90 - Resíduos em função da variável deformação para o sensor III-c.....	83
Figura 91 – Comparativo regressões deslocamento Sensor I.....	85
Figura 92 – Comparativo regressões deformação Sensor I.....	85
Figura 93 – Comparativo regressões deslocamento Sensor II-A.....	86
Figura 94 – Comparativo regressões deformação Sensor II-A.....	87
Figura 95 – Comparativo regressões deslocamento Sensor II-A.....	88
Figura 96 – Comparativo regressões deformação Sensor II-A.....	89
Figura 97 – Largura de Banda sensores.....	91

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
GEND	Grupo de Ensaio Não Destrutivos
RFID	Radio Frequency Identification
CI	Circuito Integrado
MEF	Método dos Elementos Finitos
UHF	Ultra Alta Frequência
EAS	Vigilância Eletrônica de Artigos
EPC	Código de Produto Eletrônico
MSA	Microstrip Antenna
CT	Compaction Test
SMA	SubMiniature Version A
VNA	Virtual Network Analyzer
PTFE	Politetrafluoretileno
PIFA	Planar Inverted-F Antenna
WB	Largura de banda

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	Ganho absoluto
$r$	Distância até ponto próximo
$W_{rad}$	Radiação gerada no ponto distante
$W_{irad}$	Energia gerada por um emissor isotrópico sem perda
$Q_t$	Fator de Qualidade Total
$Q_r$	Perdas por radiação
$Q_{sw}$	Perdas por ondas de superfícies
$Q_d$	Perdas do dielétrico
$Q_c$	Perdas por condução
$\omega$	Frequência angular
$\epsilon_r$	Constante Dielétrica
$h$	Espessura do substrato
$G_t$	Condutância total
$L$	Comprimento
$\delta$	Perda do substrato
$f$	Frequência
$\mu_0$	Permeabilidade no espaço
$\sigma$	Condutividade
$K$	Constante
$\Delta f$	Largura de Banda
$f_0$	Frequência central
$R_a$	Parte real da Impedância da Antena
$R_c$	Parte real da impedância do CI
$Z_a$	Impedância da antena
$Z_c$	Impedância do CI

$Z_a^*$	Complexo conjugado da impedância da antena
$\lambda$	Comprimento de onda
$P_r$	Potência transmitida pelo leitor
$P_{th}$	Potência mínima requerida para ligar o CI
$G_r$	Ganho da antena do leitor
$G_a$	Ganho da tag
$\tau$	Coefficiente de transmissão de potência
$ S ^2$	Coefficiente de reflexão de potência
$r_{max}$	Distância máxima de leitura
$X_i$	Variável independente
$Y_i$	Variável dependente
$\alpha$	Coefficiente linear da reta
$\beta$	Coefficiente angular da reta
$\mu_i$	Erro
$d$	Resultado Teste de Durbin-Watson
$n$	Tamanho da amostra
$t$	Observação da amostra
$e_t$	Resíduos associados à t-ésima observação
$k'$	Número de variáveis explanatórias
$x_i$	Valores ordenados de amostras
$a_i$	Constantes geradas a partir do meio
$W$	Resultado teste de Shapiro-Wilk
$^{\circ}C$	Grau Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Instrumentação.....	3
2.1.1	Sensor .....	3
2.2	Teoria Eletromagnética .....	4
2.3	Antenas.....	5
2.3.1	Parâmetros de desempenho .....	6
2.3.2	<i>Microstrip</i> Antena .....	11
2.3.3	Técnicas de Redução das Dimensões de Antenas.....	12
2.3.4	Efeito da Deformação na Frequência de Ressonância.....	13
2.3.5	Equação de Friis e a Distância de Leitura .....	15
2.4	Identificação por Rádio Frequência .....	15
2.4.1	Início da Identificação por Rádio Frequência.....	15
2.4.2	Sistema de Identificação por Radiofrequência.....	17
2.4.3	Comunicação de um Sistema RFID .....	19
2.4.4	Frequências de Operação.....	21
2.5	O estado da arte para sensores de deformação passivos e sem fio .....	23
2.6	Abordagem Estatística .....	26
2.6.1	Regressão Linear Simples .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
3.1	Local de aplicação do sensor e tipo de antena.....	30
3.2	Materiais do sensor .....	31
3.3	Tipo de solicitação .....	31
3.4	<i>Softwares</i> para desenvolvimento do sensor.....	32
3.5	Desenvolvimento do sensor e influência dos parâmetros da geometria do sensor .....	33
3.6	Prototipação do sensor .....	35
3.7	Ensaio Mecânico.....	36

3.8	Obtenção e análise dos resultados.....	37
3.8.1	Simulação numérica .....	37
3.8.2	Ensaio experimental .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1	Simulação Numérica .....	41
4.1.1	Sensor I.....	41
4.1.2	Sensor II .....	55
4.1.3	Sensor III.....	59
4.2	Ensaio Experimental .....	63
4.2.1	Sensor I.....	63
4.2.2	Modelo II.....	66
4.2.3	Modelo III.....	74
4.2.4	Comparação entre Simulação Numérica e Experimental .....	84
4.2.5	Comparação entre Modelos .....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR I.....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-A.....</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE C - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-B.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE D - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-C.....</b>	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE E - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-A.....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE F - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-B.....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE G - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-C.....</b>	<b>105</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas metálicas são constantemente submetidas a esforços com cargas altas e cíclicas que podem favorecer a nucleação de trincas. Perfis estruturais e chapas metálicas, usualmente, tem como a causa principal de falha a fadiga. Métodos convencionais de inspeção e monitoramento necessitam de cabos para transferência de informação e energia. O uso de cabos pode inviabilizar a aplicação do método devido ao: movimento, como pás de aero geradores; perda de sinal ou ruído, as unidades de aquisição de dados e fornecimento de energia estão muito distantes do sensor; a estrutura a ser monitorada possui difícil acesso para inspeção, como a parte inferior de uma ponte. Dessa forma a detecção de deformações elásticas e principalmente plásticas, que são geradas com aproximadamente  $2800\mu\text{m/m}$  de deformação para algumas ligas de alumínio, é essencial para a prevenção de um possível colapso da estrutura.

Métodos de monitoramento de integridade estrutural eficientes e econômicos vêm sendo desenvolvidos e novas técnicas com a finalidade de detecção de esforços mecânicos sem o uso de cabos para transporte de informação, se destacam. Entre estas novas técnicas os sensores com RFID surgem como alternativa, já que este método não exige cabos para transferência de informação e possui uma alta probabilidade de detecção (YI, FANG e COOPER, 2012). Tecnologia esta que vem crescendo e se mostrando promissora na área de integridade estrutural, muito em razão da simplicidade para aquisição de dados e aplicação destes sensores.

O RFID é um componente integrado (CI), tipicamente aderido a uma antena, desenvolvido para ser uma etiqueta de identificação de um objeto, *tag*. O uso deste identificador vem aumentando e cada vez mais diversificando suas aplicações, desde a identificação de produtos de prateleira até a identificação de sensores, como exemplo um sensor de temperatura. A identificação do sensor se torna essencial à medida que um arranjo de sensores pode ser aplicado em uma estrutura. Estes sensores podem operar de forma passiva e serem energizados apenas no momento em que houver troca de dados, isto sendo realizado através de ondas eletromagnéticas. A antena coleta a energia da onda eletromagnética e a transmite para o CI, que produz uma modulação codificada no consumo de corrente elétrica. Esta modulação se reflete no circuito do equipamento leitor e pode servir para identificar o RFID bem como alguma variável que ele for capaz de medir (LANTZ, 2011).

No processo de desenvolvimento do sensor o uso Método dos Elementos Finitos (MEF) como ferramenta de análise é fundamental, já que torna possível o modelamento de diversos fenômenos físicos que ocorrem. Os elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos. A capacidade de modelamento acelera o desenvolvimento de sensores, permitindo verificar parâmetros e variáveis do projeto com alta confiabilidade e velocidade.

Neste trabalho estuda-se a possibilidade de uso de um RFID como sensor de deformações em uma estrutura metálica devido ao fato de que a sua frequência de ressonância é altamente dependente das dimensões da antena. Assim, se a antena sofrer algum esforço mecânico e modificar as suas dimensões, haverá variação de sua frequência de ressonância eletromagnética (THAI, AUBERT e TENTZERIS, 2011). Se a variação da frequência provocada pela deformação da antena puder ser detectada com boa resolução e com repetibilidade, teremos a possibilidade de utilizar este dispositivo como um sensor de deformação. A detecção de deformação pode ser importante fator na tomada de decisão durante um monitoramento da estrutura.

Assim, o objetivo geral desta dissertação é a aplicação de *tags* RFID como sensores de deformação para monitoramento de integridade estrutural em chapas de alumínio.

Como objetivos específicos este trabalho propõe:

- Projeto do sensor assistido por computador através da análise das variáveis da antena.
- Construção de um protótipo do sensor.
- Validação do sensor através de ensaios em tração.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o bom entendimento da física determinante dos fenômenos eletromagnéticos e sua relação com o funcionamento de *tags* aplicadas como sensores de deformação para integridade estrutural, certos conceitos devem ser previamente compreendidos. Para tanto, será feita uma breve revisão literária destes tópicos, focando principalmente em instrumentação, antenas e no RFID, objetos de estudo com maior relevância neste trabalho. Contudo, um estudo mais aprofundado pode ser obtido através da literatura sugerida.

### 2.1 Instrumentação

A instrumentação pode ser definida como a base para o processo experimental, uma vez que possibilita a medição de uma variável. O controle de processos e condições cada vez vem se tornando mais essencial em uma econômica dinâmica, visando reduzir perdas e aumentar a eficiência. A aplicação de sensores neste controle está cada vez mais presente no dia a dia de cada um, desde dirigir um automóvel até o ato de verificar sua massa corporal.

#### 2.1.1 Sensor

Os sensores são dispositivos primordiais no processo de instrumentação, na qual realizam a medida de parâmetros físicos, químicos, biológicos e outros. Normalmente os sensores fornecem respostas em termos de tensão e corrente, mas outros tipos de respostas podem ser gerados e analisados (MUKHOPADHYAY, 2013). Dentre as diversas classificações de instrumentos de medição se destacam os transdutores, elementos ou dispositivos que convertem um sinal de uma forma física para um sinal correspondente em outra forma física. Assim os denominados transdutores sensores, detectam as variações do processo e a transformam em sinal para posterior processamento. Exemplos de transdutores sensores são: medidores de velocidade, posição, temperatura, tensão, corrente e outros.

Dentre as principais características de um sensor podem ser frisadas:

- Intervalo de operação: Determinação do intervalo de operação é fundamental na aplicação de sensores, pois ao utilizar um sensor fora de seu intervalo pode danificá-lo e ou levá-lo a informar dados incorretos.
- Sensibilidade: Pode ser compreendida como uma relação entre um sinal de saída e um sinal de entrada. Com este raciocínio pode ser definido o conceito resolução que

é a menor variação incremental detectável do parâmetro de entrada que pode ser detectada no sinal de saída.

- **Precisão:** É a capacidade de obter um valor medido mais próximo ao valor ideal. Diversos fatores como método de calibração e ambiente de exposição podem levar a diminuir esta precisão.
- **Estabilidade:** Normalmente analisada em sensores que atuam por grandes intervalos de tempo. Caracteriza-se por fornecer a mesma resposta de saída para o mesmo sinal de entrada, independentemente do tempo e das condições.
- **Incerteza de medição:** Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão que pode ser razoavelmente atribuída ao mensurando (INMETRO, 2008).

## 2.2 Teoria Eletromagnética

Os conceitos básicos da teoria do eletromagnetismo devem ser apresentados para fundamentar as equações utilizadas nos modelos eletromagnéticos. As equações de Maxwell para os campos elétricos e magnéticos são fundamentais para esta análise, assim como as equações das relações constitutivas. A Equação 1 apresenta a lei de Faraday e a Equação 2 a lei de Ampère ambas no domínio da frequência. (SAINATI, 1996)

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + j\omega D \quad (2)$$

Onde:

$\nabla$  = Operador Nabla

$E$  = Intensidade do campo elétrico. [V/m]

$j$  =  $\sqrt{-1}$

$\omega$  = Frequência angular. [rad/s]

$B$  = Densidade de fluxo magnético. [Wb/m<sup>2</sup>]

$H$  = Intensidade do campo magnético. [A/m]

$J$  = Densidade de corrente elétrica. [A/m<sup>2</sup>]

$D$  = Densidade de fluxo elétrico. [C/m<sup>2</sup>]

As Equações 1 e 2 são relacionadas através de relações constitutivas, sendo dependentes do material onde o campo está aplicado. A Equação 3 relaciona a densidade de fluxo elétrico com a intensidade de campo elétrico, a Equação 4 relaciona a densidade de fluxo magnético com a intensidade do campo magnético e a Equação 5 relaciona densidade de corrente elétrica e intensidade de campo elétrico. (ORFANIDIS, 2016)

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (3)$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (4)$$

$$J = \sigma E \quad (5)$$

Onde:

$\varepsilon_r$  = Permissividade relativa.

$\varepsilon_0$  = Permissividade no vácuo.

$\mu_r$  = Permeabilidade relativa.

$\mu_0$  = Permeabilidade no vácuo

$\sigma$  = Condutividade. [S]

Ao substituir a Equação 4 na Equação 1 e a Equação 5 e Equação 3 na Equação 2, as equações constitutivas são adicionadas a estas equações. Após isto, a substituição da equação 1 na Equação 2 irá gerar a Equação 6. A Equação 6 descreve o campo elétrico em um meio material, esta equação será aplicada no modelo numérico posteriormente descrito.

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \left( \varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) E = 0 \quad (6)$$

### 2.3 Antenas

Antenas são dispositivos essenciais para comunicação de sistemas sem fio e podem ser definidas como um mecanismo para irradiar ou receber ondas de rádio (IEEE XPLORE, 1983). Uma larga variedade de antenas foi desenvolvida ao longo dos anos, desde estruturas bem simples como monopolos e dipolos até estruturas complexas como *phased arrays* (VOLAKIS e EIBERT, 2007). Dentre os diversos tipos de antena devem ser exaltadas as antenas do tipo *microstrip*, as quais serão aplicadas neste trabalho. Cada tipo de antena é selecionado de acordo com sua aplicação, já que diversos fatores podem influenciar nos seus parâmetros de desempenho.

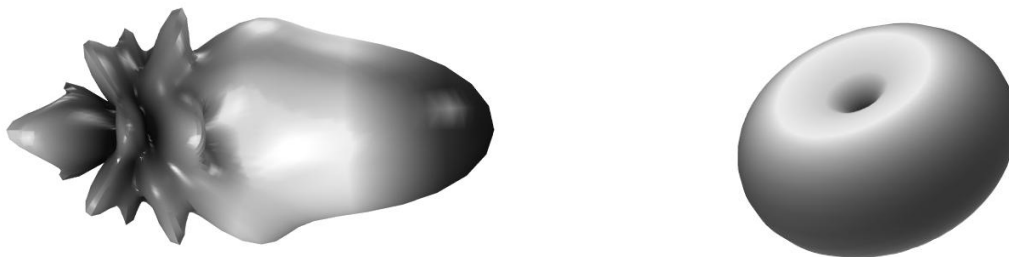
### 2.3.1 Parâmetros de desempenho

No desenvolvimento de uma antena os seguintes parâmetros devem ser estudados com maior relevância, já que influem diretamente no comportamento das antenas.

- **Diagrama de radiação**

O Diagrama de radiação é definido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades da radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais (BALANIS, 2005). Existem diversas configurações de diagramas de radiação dentre elas três tipos precisam ser apresentados, Isotrópico, Direcional e Omnidirecional. O diagrama isotrópico é definido como uma hipotética antena sem perda, que possui distribuição da radiação igual em todas as direções. Uma antena direcional, Figura 1 à esquerda, é aquela que possui a propriedade de emitir ou receber ondas eletromagnéticas mais efetivamente em uma direção do que nas outras. Uma antena Omnidirecional possui um diagrama de radiação não direcional em um determinado plano, uma forma de um toroide, como a Figura 1 à direita ilustra. Esta é considerada um tipo especial de padrão direcional (BALANIS, 2008).

Figura 1 – Diagrama de radiação antena direcional à esquerda e antena omnidirecional à direita.



Fonte: Autor(2017).

- **Direcionalidade**

Direcionalidade é a capacidade de uma antena focar em uma direção particular, para transmitir ou receber energia. Uma antena de grande direcionalidade concentra em um ângulo reduzido toda a sua potência radiada. A direcionalidade é calculada como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção pelo valor da intensidade de radiação de uma antena isotrópica de mesma potência (BALANIS, 2005) (SANGHERA, THORNTON e HAINES, 2007).

- **Ganho**

Ganho é um dos parâmetros que descreve a capacidade de radiação de uma antena, o ganho absoluto em uma dada direção é definido pela razão entre a densidade de potência irradiada de uma antena em um certo ponto distante e a densidade de potência em um mesmo ponto irradiada por um emissor isotrópico sem perdas, vide equação 7, (PRERADOVIĆ, 2011).

$$G = \frac{4\pi r^2 W_{rad}}{4\pi r^2 W_{irad}} \quad (7)$$

Onde:

$G$  = Ganho

$r$  = Distância da antena até o ponto distante. [m]

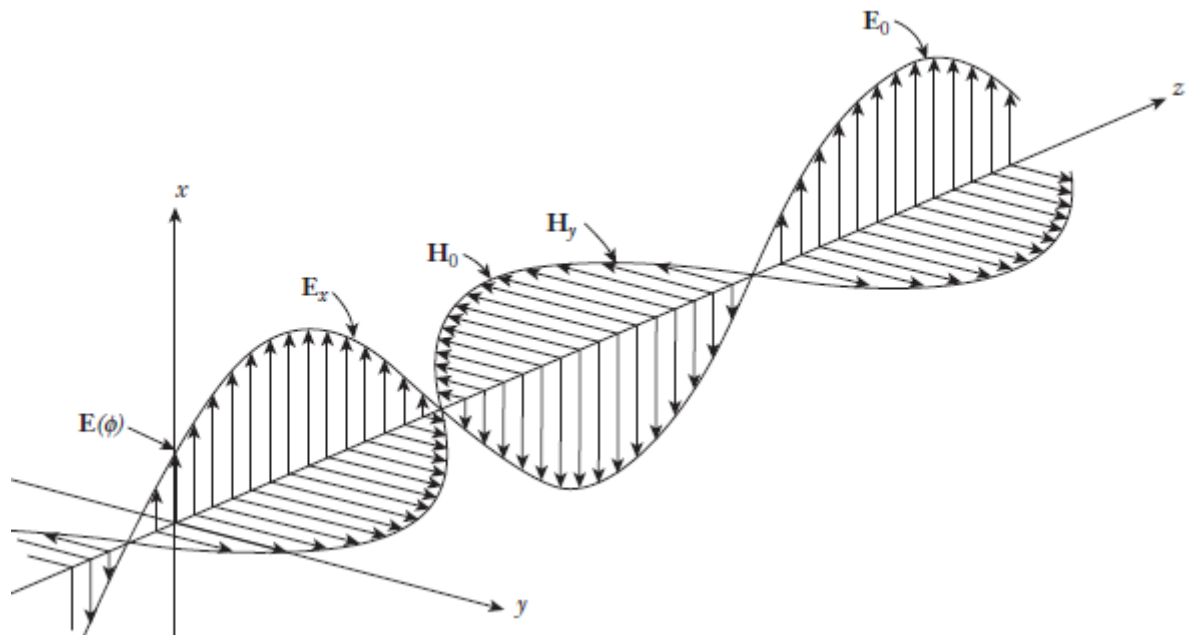
$W_{rad}$  = Densidade de radiação gerada naquele ponto distante. [W/m<sup>2</sup>]

$W_{irad}$  = Densidade de energia gerada por um emissor isotrópico sem perda. [W/m<sup>2</sup>]

- **Polarização**

A polarização de uma onda eletromagnética refere-se à direção de suas oscilações em relação a um plano perpendicular à direção em que a onda propaga. Antenas de polarização linear, são aquelas cujo o vetor do campo elétrico possui uma direção particular de propagação ao longo do espaço. Dois tipos podem ser destacadas: Ondas polarizadas horizontalmente são aquelas que o vetor do campo elétrico propaga em paralelo a superfície da terra, enquanto que as ondas polarizadas verticalmente o vetor do campo elétrico propaga perpendicular à superfície da Terra, como ilustra a Figura 2 (BLAKE e LONG, 2009). Antenas de polarização circular são aquelas que o vetor do campo elétrico rotaciona enquanto a onda propaga.

Figura 2 – Polarização linear vertical de onda eletromagnética.



Fonte: (BLAKE e LONG, 2009)

O ângulo que uma antena emissora faz com uma antena receptora afeta diretamente o desempenho deste sistema, assim uma antena emissora deve ter a mesma polarização que uma antena receptora para se obter uma máxima transferência de energia. Se a antena de transmissão é polarizada horizontalmente e a antena de recepção é polarizada verticalmente não ocorre muita transferência de energia. Se a antena de recepção está polarizada circularmente, ela receberá alguma radiação, independentemente da polarização da antena transmissora. Isto ocorre pois uma antena de polarização circular possui os componentes de polarização linear, e horizontal e vertical (SANGHERA, THORNTON e HAINES, 2007).

- **Frequência de Ressonância**

Quando um sistema está em ressonância ele absorve o máximo de energia, isto ocorre quando a frequência das ondas de energia corresponde a própria frequência natural do sistema. Esta frequência é chamada de frequência de ressonância. Os múltiplos desta frequência também serão frequências efetivas da antena, uma vez que para cada uma destas frequências de ressonância existe um comprimento de onda específico estes podem ser chamados de comprimentos elétricos, *electrical length*. (SANGHERA, THORNTON e HAINES, 2007) .

- **Teorema da Máxima Transferência de Potência**

A máxima transferência de potência ocorre, em um circuito RLC, como exemplo uma *tag* RFID passiva, quando a impedância de entrada da antena e a impedância de entrada do CI formarem um conjugado complexo, ou seja, as partes reais da impedância da antena e do CI são iguais e as partes complexas da impedância possuem a mesma magnitude mas com sinais opostos. (REZAIESARLAK e MANTEGHI, 2015) (PRERADOVIĆ, 2011). Esta transferência de potência pode ser avaliada através do coeficiente de transmissão de potência,  $\tau$ , descrito na equação 8. Os valores deste coeficiente variam de 0 até 1, onde se obtém a máxima transferência de potência quando  $\tau$  for igual a 1.

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad (8)$$

Onde:

$$R_c = \text{Parte real da impedância do CI.} \quad [\Omega]$$

$$R_a = \text{Parte real da impedância da antena.} \quad [\Omega]$$

$$Z_c = \text{Impedância do CI.} \quad [\Omega]$$

$$Z_a = \text{Impedância da antena.} \quad [\Omega]$$

Outra forma de avaliar esta transferência pode ser através do coeficiente de reflexão de potência, dado pela equação 9 (NIKITIN, SESHAGIRI RAO e LAM, 2005). Valores deste coeficiente iguais a 0 referem-se a máxima transmissão de potência (KUROKAWA, 1965).

$$|s|^2 = \left| \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a} \right|^2 \quad (9)$$

Onde:

$$Z_a^* = \text{Complexo conjugado da impedância da antena.} \quad [\Omega]$$

- **Fator de Qualidade**

O fator de qualidade é uma maneira comum e simples para quantificar a largura de banda de uma antena. Pode ser definido pela razão entre a energia armazenada no campo reativo pela potência irradiada (GUSTAFSSON e NORDEBO, 2006). O fator de qualidade total,  $Q_T$ , pode ser representado também como um somatório dos fatores de qualidade devido à perdas por radiação, perdas por ondas de superfície, perdas do dielétrico e perdas por condução, respectivamente na ordem dos termos da equação 10 (BALANIS, 2005) (MILLIGAN, 2005).

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_R} + \frac{1}{Q_{SW}} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} \quad (10)$$

Para substratos muito finos, com a espessura do substrato muito menor que o comprimento de onda,  $Q_{SW}$  pode ser desprezado e os demais fatores de perda acima citados podem ser aproximados pelas seguintes equações 11, 12 e 13:

$$Q_R = \frac{2\omega\epsilon_r}{hG_t/l} K \quad (11)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (12)$$

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} \quad (13)$$

Onde:

$\omega$	=	Frequência angular.	[rad/s]
$\epsilon_r$	=	Constante dielétrica relativa.	
$h$	=	Espessura do substrato.	[m]
$G/l$	=	Condutância total por unidade de comprimento.	[S/m]
$\tan \delta$	=	Tangente de perda do substrato.	
$f$	=	Frequência	[Hz]
$\mu_0$	=	Permeabilidade do espaço livre	[H/m]

A largura de banda é associada ao fator de qualidade, de forma que pode ser representada pela equação 14.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (14)$$

Onde:

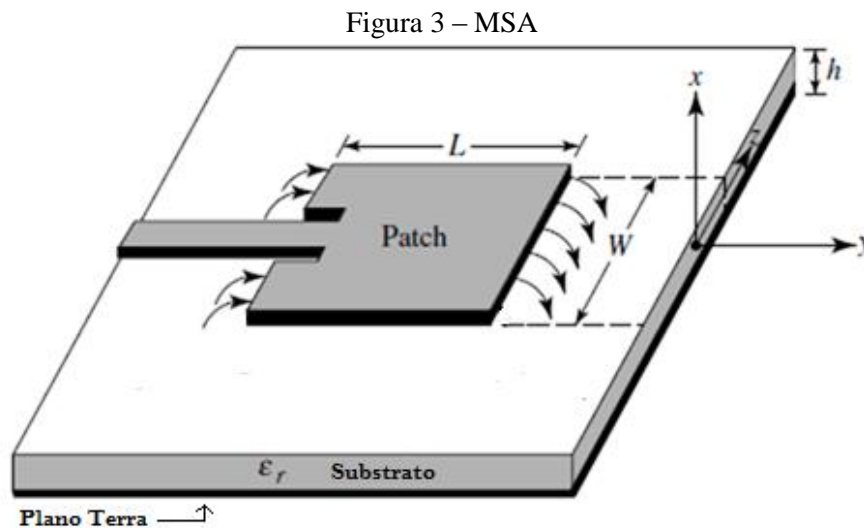
$\Delta f$	=	Largura de banda	[Hz]
$f_0$	=	Frequência de Ressonância	[Hz]
$Q_t$	=	Fator de qualidade total	



### 2.3.2 Microstrip Antena

O primeiro conceito de uma *microstrip antenna*, MSA, foi proposto por Deschamps em 1953, porém o desenvolvimento prático dessas antenas foi realizado por Munson e Howell na década de 70 (VOLAKIS e EIBERT, 2007) (WONG, 2002). Dentre suas principais características podem ser citadas o custo de produção reduzido, baixo peso e tamanho, simplicidade no design e fabricação.

A MSA é composta, basicamente, de um elemento metálico, *patch*, depositado sobre um substrato dielétrico e um plano de terra depositado sobre o outro lado do substrato, como apresentado na Figura 3. Pode ser desenvolvida com diversas formas de geometria como, quadrada, circular, triangular e outras.



Fonte: Adaptado pelo autor (BALANIS, 2005)

A seleção de um substrato adequado no desenvolvimento de uma MSA pode ser vinculado aos seguintes parâmetros:

- A espessura do substrato – Substratos mais espessos possuem maior resistência mecânica e reduzem as perdas por radiação. Por outro lado, tornam a MAS mais pesadas, aumentam as perdas por condução e perdas por ondas superficiais e aumentam a largura de banda (LITON, MD., *et al.*, 2015).
- A permissividade relativa – Os valores da permissividade relativa para substratos usualmente aplicados em MSA estão no intervalo entre 2 e 12. Estes valores influenciam diretamente na frequência de operação da MSA e consequentemente em suas dimensões (GURPREET KAUR e ER. SONIA GOYAL, 2016).

- A tangente de perda do dielétrico – Altos valores não são desejados pois incrementam as perdas dielétricas e por consequência reduzem a eficiência da antena. (RENGIFO, 2016)
- Condições de aplicação – Temperatura, pressão e meio são fatores decisivos na seleção de um substrato. Uma gama de materiais pode ser utilizada para cada situação, dentre eles podem ser citados o Polietileno Tereftalato, FR-4, outros compósitos também a base de fibra de vidro e Politetrafluoretileno, PTFE.

Para o modelo de MSA apresentado na figura 3, a frequência de ressonância pode ser calculada através da equação 15.

$$f = \frac{c}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (15)$$

Onde:

$f$	=	Frequência de Ressonância.	[Hz]
$c$	=	Velocidade da Luz no vácuo.	[m/s]
$L$	=	Comprimento elétrico da antena	[m]
$\Delta L$	=	Comprimento adicional devido à <i>Fringing effects</i>	[m]
$\epsilon_{reff}$	=	Constante dielétrica efetiva	

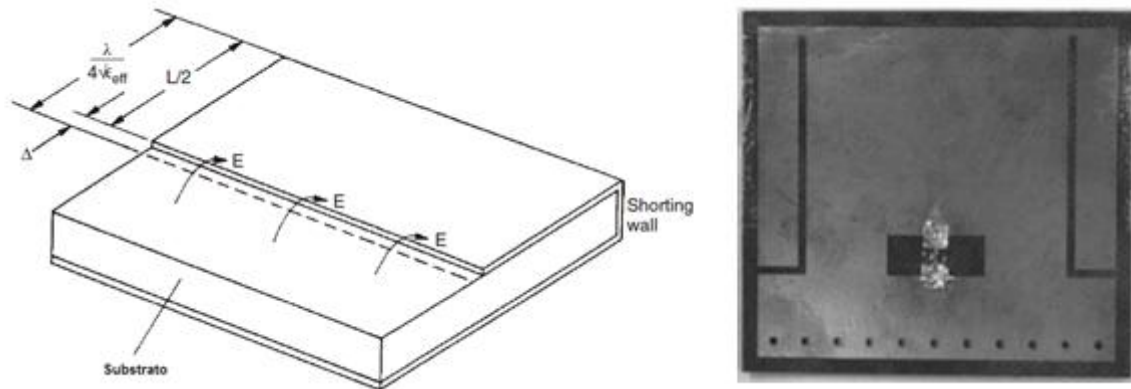
### 2.3.3 Técnicas de Redução das Dimensões de Antenas

A redução das dimensões de uma antena é um desafio persistente e atrativo para a indústria, uma vez que amplia a possibilidade de aplicação em outros produtos e também diminui custos de matérias-primas. Porém ao se reduzir as dimensões se tem perdas de eficiência da radiação. Diversas técnicas podem ser aplicadas com a intenção de diminuir o comprimento de uma antena, usualmente, em ultra alta frequência, o uso de *Meanders* é bem eficaz, porém quando próximo a superfícies metálicas sua aplicação não é adequada. Assim a técnica de *Quarter-wave Patch Antenna* surge como a melhor alternativa, devido a uma maior estabilidade e eficiência quando aplicada próxima de superfícies metálicas.

*Quarter-wave Patch Antenna* é um atrativo método, uma vez que possibilita desenvolver uma antena com a dimensão de um quarto do comprimento de onda de sua frequência de operação. Visto que, uma antena *microstrip* regular possui o comprimento de meio comprimento de onda (LANTZ, 2011) (WONG, 2002). A conexão entre o plano de terra da

antena e o *patch* pode ocorrer através de elementos metálicos, vias, ou através do *shorting wall*, gerando um curto circuito. Esta conexão leva a um aumento de indutância na linha de transmissão, já que este tipo de conexão se comporta como um indutor (MILLIGAN, 2005) (NASIMUDDIN, 2011) (WATERHOUSE, 2003). Assim estas antenas possuem uma distância de  $\lambda/4$  entre a aresta do corpo radiante e o elemento de ligação e entre o corpo radiante e o plano terra (GARG, 2001). A Figura 4 apresenta a conexão entre o plano de terra através de: *shorting wall* à esquerda e vias à direita.

Figura 4 – Conexão através de: *shorting wall* à esquerda e vias à direita.



Fonte: (MILLIGAN, 2005) à esquerda e (YI, 2014) à direita.

Para uma MAS que possua vias em suas extremidades, o seu comprimento físico da antena pode ser reduzido e o valor de sua frequência de ressonância pode ser obtido através da equação (16) (LANTZ, 2011).

$$f = \frac{c}{4(L + 2\Delta)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

Para substratos finos  $\epsilon_{eff}$  da equação 15 pode ser aproximado para o mesmo valor que da constante dielétrica relativa do material,  $\epsilon_r$  (XIAOHUA YI, CHUNHEE CHO e BENJAMIN COOK, 2013).

### 2.3.4 Efeito da Deformação na Frequência de Ressonância

Uma antena ao sofrer deformação altera sua frequência de ressonância e seu desempenho. O valor da frequência de ressonância de uma MAS retangular com vias em suas extremidades pode ser obtida através da equação 16.

A existência de uma equação envolvendo a frequência de ressonância e o comprimento físico da antena, nos permite introduzir a variável deformação,  $\varepsilon$ . Deformação pode ser descrita através da equação 17.

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (17)$$

Onde:

$l_f$  = Comprimento do *Patch* após deformação. [m]

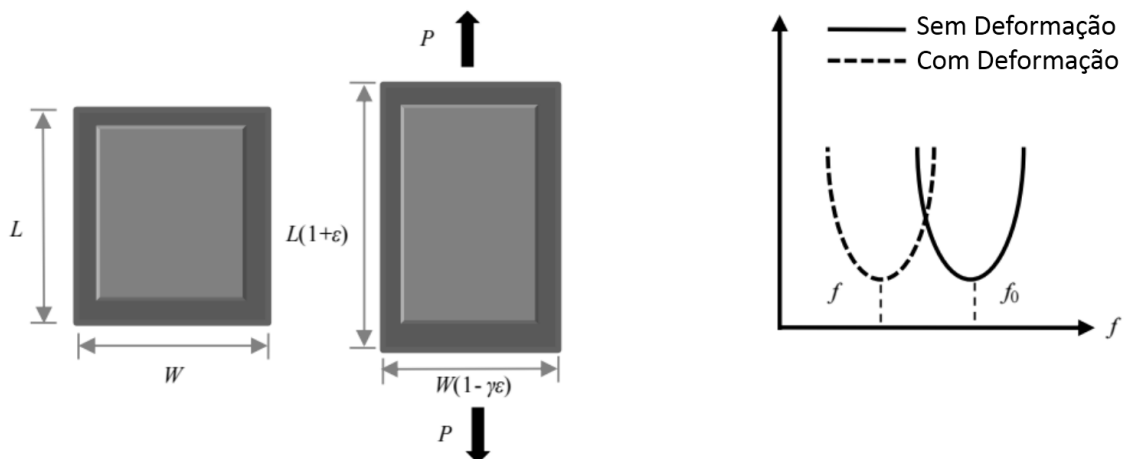
$l_0$  = Comprimento do *Patch* antes da deformação. [m]

$\varepsilon$  = Deformação.

Substituindo o valor de  $l_f$  pela variável  $L$  da equação 16 será obtido a equação 18, que relaciona frequência de ressonância e deformação em uma direção específica. Dessa forma, a com o aumento da deformação ocorrerá uma redução na frequência de ressonância como pode ser ilustrado na Figura 5.

$$f = \frac{c}{4(l_0(\varepsilon + 1) + 2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (18)$$

Figura 5 – Efeito da deformação na frequência de ressonância.



Fonte: Adaptado de (XIAOHUA YI, CHUNHEE CHO e BENJAMIN COOK, 2013)

### 2.3.5 Equação de Friis e a Distância de Leitura

Uma das mais importantes características de uma *tag* RFID é a distância de leitura. Esta pode ser caracterizada como a máxima distância em que o leitor detecta o sinal de retorno de uma *tag* RFID. A *tag* é responsável pela limitação da distância de leitura, pois a sensibilidade do leitor, geralmente, é superior à sensibilidade da *tag*. A distância de leitura também é determinada pela orientação, material e meio de propagação (SESHAGIRI RAO, NIKITIN e LAM, 2005).

A máxima distância de leitura teórica pode ser obtida através da equação de transmissão no espaço-livre de Friis, equação 19 (YEOMAN e O'NEILL, 2014) (NIKITIN, SESHAGIRI RAO e LAM, 2005). Esta equação relaciona a potência recebida nos terminais da antena com a potência transmitida (WEBSTER, 1999).

$$r_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_r G_r G_a (1 - |s|^2)}{P_{th}}} \quad (19)$$

Onde:

$r_{max}$	=	Máxima distância de leitura teórica.	[m]
$\lambda$	=	Comprimento de onda.	[m]
$P_r$	=	Potência transmitida pelo leitor.	[W]
$G_r$	=	Ganho da antena do leitor.	
$G_a$	=	Ganho da tag.	
$ s ^2$	=	Coefficiente de reflexão de potência	
$P_{th}$	=	Mínima potência requerida para ligar o CI	[W]

$P_{th}$  é representada pela sensibilidade do CI (ZUFFANELLI, AGUILA e ZAMORA, 2016).

## 2.4 Identificação por Rádio Frequência

### 2.4.1 Início da Identificação por Rádio Frequência

A história da radiofrequência iniciou em 1864, quando James Clerk Maxwell previu a existência de ondas eletromagnéticas através das equações de Maxwell. Por volta de 1888, Heinrich Hertz demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas com a construção de um

aparato que produzia e detectava micro-ondas na região da ultra alta frequência (UHF) (MILES, SARMA e WILLIAMS, 2008). Na virada do século XIX, os trabalhos de Faraday, Maxwell, Hertz, resultaram em um conjunto completo de leis descrevendo a natureza da radiofrequência. A partir de 1896, Marconi, Alexanderson, Baird, Watson, e muitos outros procuraram aplicar tais leis em comunicações de rádio e radar. O trabalho feito nesta época foi base para o desenvolvimento de muitas tecnologias, incluindo o RFID (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

A primeira aplicação de RFID foi desenvolvida em união com a tecnologia de radares disponível na época da 2ª guerra mundial. Este avanço tecnológico tornou possível definir rotas de navios e aviões, calcular a sua velocidade e mais importante identificá-los. Assim, foi possível distinguir se o objeto detectado era aliado ou inimigo. (PRATA, 2008) (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007) (MILES, SARMA e WILLIAMS, 2008).

A partir de 1960, aplicações em vigilância eletrônica de artigos (EAS) ganharam espaço em lojas de varejo com intuito de ser um sistema de detecção antirroubo, com uma aplicação dedicada a comunicação a curtas distâncias (MILES, SARMA e WILLIAMS, 2008). Porém seu sistema era simples, de 1 bit, sendo apenas possível detectar a presença de etiquetas RFID, em vez de identificá-las.

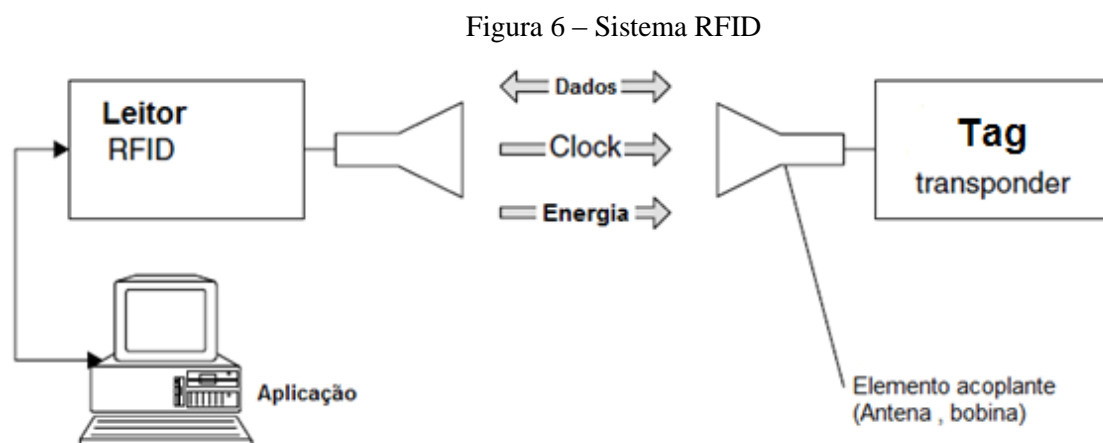
Na década de 1970 houve um grande crescimento da tecnologia RFID em empresas, instituições acadêmicas e laboratórios governamentais. Grandes empresas como a Raytheon, RCA, e Fairchild começaram a desenvolver tecnologias de sistemas eletrônicos de identificação e dessa forma tecnologias de auto identificação RFID, desenvolvidas para captura automática de dados por padrões de código de barra, que levaram a uma redução drástica nos custos de transportes. Sistemas RFID comerciais generalizados surgiram na década de 1980 com uso na pecuária, *keyless* e acesso pessoal à locais. Não havia compatibilidade entre sistemas e pouca concorrência na indústria de RFID, tornando os custos elevados para as indústria (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

Avanços na tecnologia de materiais durante década de 1990, muitos deles relacionados com o trabalho dos fabricantes de chips semicondutores tais como IBM, Intel, AMD, e Motorola, oportunizaram colocar etiquetas com custo-benefício adequados para o mercado. Desta maneira investimentos de capital começaram a ser direcionados para o RFID e assim foi iniciado os testes em larga escala de "etiquetas inteligentes", *smart tags* (MILES, SARMA e WILLIAMS, 2008).

A partir de 2000, tornou-se claro que com o custo aproximado de US\$ 0,05 por etiqueta seria possível que a tecnologia RFID substituísse os sistemas de código de barras. Em 2003, Wal-Mart e DoD, o maior varejista do mundo e o maior da cadeia de suprimentos do mundo, respectivamente, estabeleceram que seus fornecedores deveriam começar a empregar a tecnologia RFID. Ainda em 2003, o Centro de Auto-ID foi incorporado pela EPCglobal e a tecnologia da EPC foi adotada por ambos Wal-Mart e DoD. Assim, o RFID obteve uma plataforma comum e as normas elaboradas pela EPC foram adotadas pela ISO em 2006, dando a indústria de RFID uma única fonte de orientação. A convergência de todos os padrões servem para aumentar a concorrência na indústria, reduzir os custos de RFID e acelerar a implantação da tecnologia RFID. Nos próximos anos, a tecnologia RFID tende a crescer mais e tornar-se um item cotidiano, presente no uso doméstico (MILES, SARMA e WILLIAMS, 2008).

#### 2.4.2 Sistema de Identificação por Radiofrequência

O sistema RFID é formado, basicamente, por 2 componentes, a *tag* e o leitor RFID. O leitor RFID é responsável tanto pelo envio de energia e dados como a leitura do sinal de retorno da *tag* (FINKENZELLER, 2003). O sistema está ilustrado na Figura 6. Genericamente dispositivos RFID são também chamados de *Transponders* devido a sua capacidade de responder quando estimulados por um campo magnético variável de frequência específica.



Fonte: Adaptado (FINKENZELLER, 2003)

As *tags* RFID são responsáveis pela identificação do objeto na qual são aplicadas. Possuem um CI que pode ter funções de leitura, escrita e modificação de seus dados armazenados. As *tags* possuem diversas formas e tamanhos e podem ser selecionadas por

fatores como meio e frequência de operação. A classificação das *tags* quanto a sua classe pode ser mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de *Tags*.

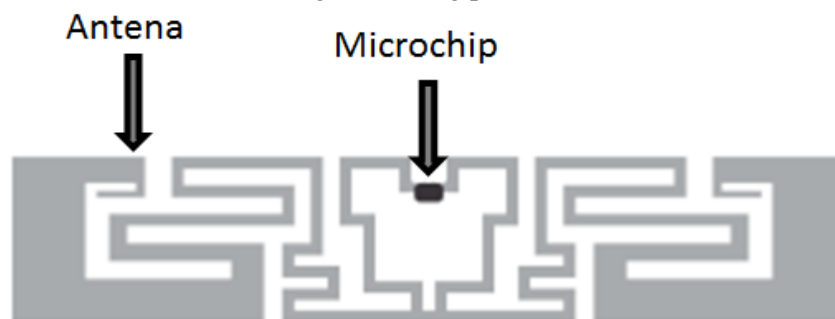
Classe 0	Realiza a leitura de uma informação já contida no CI, contém um número de identificação que lhe é atribuído durante sua fabricação.
Classe 1	Realiza o processo de gravação de informação no CI apenas uma vez e a leitura deste dado.
Classe 2	O tipo de <i>tag</i> mais flexível, possibilita ao usuário de acessar a leitura e a escrita na memória do CI.
Classe 3	Possui sensor para armazenar parâmetros, com temperatura, pressão e movimento.
Classe 4	Possui transmissores integrados, que são pequenos dispositivos de rádio miniatura que podem comunicar –se com outras <i>tags</i> e dispositivos, sem a presença de um leitor.

Fonte: Autor

As *tags* também podem ser classificadas pelo modo de obtenção de sua energia. Três métodos podem ser destacados: *tags* ativas, semi-passivas e passivas.

*Tags* Passivas, são aquelas que não possuem bateria interna, ou seja toda a energia que elas utilizam é retirada da onda eletromagnética, que alimenta o circuito e possibilita a transmissão dos dados de volta. São estruturas razoavelmente simples, compostas por uma antena e um CI. São excelentes escolhas para ambientes mais extremos, possuem custo extremamente baixo, devida a produção em escala. A Figura 7 apresenta uma *tag* passiva.

Figura 7 – Tag passiva.

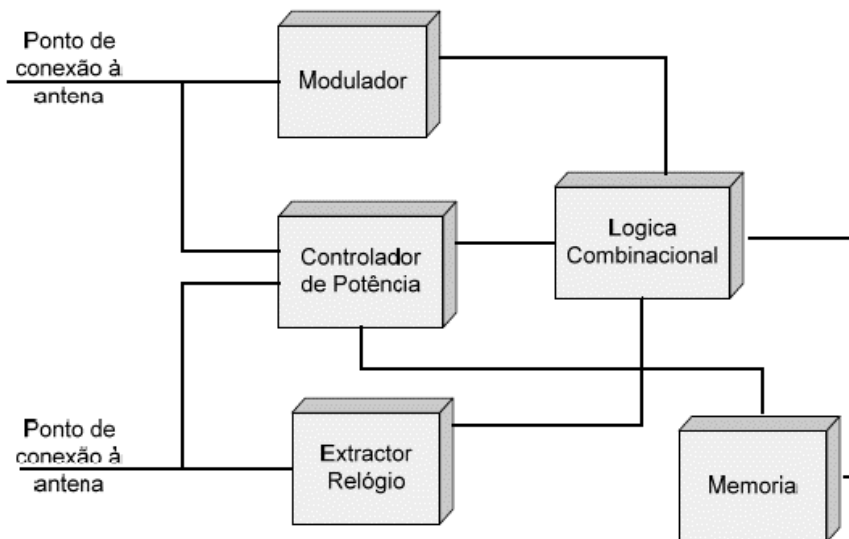


Fonte: CEITEC S.A

O CI de uma *tag* passiva deve possuir um controlador/retificador, uma vez que precisa converter a corrente alternada gerada pelo sinal de rádio frequência, RF, em corrente contínua. Além disso, é composto por um modulador e unidade lógica, que é responsável pela implementação do protocolo de comunicação entre o *tag* e o leitor, e uma memória interna para armazenamento de dados (GOMES, 2007). A Figura 8 exemplifica uma configuração de CI.



Figura 8 – Configuração do CI



Fonte: (GOMES, 2007)

*Tags* semi-passivas: são *tags* que contêm uma pequena bateria para realizar a alimentação de algum componente de sua estrutura, por exemplo uma memória de acesso aleatório. Entretanto, quando realiza a comunicação com um leitor, utiliza onda de RF como fonte de alimentação. Dessa forma, de maneira similar à uma *tag* passiva, ela utiliza a energia das ondas de rádio para transmitir a informação para o leitor.

*Tags* ativas são aquelas que possuem uma bateria interna ativa, que alimenta o circuito e fornece energia para o envio de dados para o leitor. Estas *tags* são compostas de uma eletrônica adicional, gerando maiores dimensões da *tag*. Possuem custo e alcance bem superior que a *tags* passivas, necessitam de manutenção periódica e não são adequados para ambientes extremos.

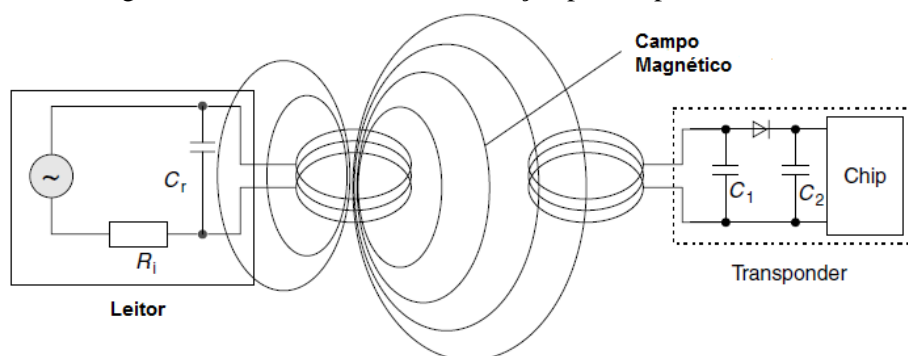
### 2.4.3 Comunicação de um Sistema RFID

Comunicação é a transferência de informação, sendo que no universo da rádio frequência a comunicação vem acompanhada pela transferência de energia através das ondas de radiofrequência. Existem 2 principais tipos de técnicas de comunicação: o acoplamento indutivo e o acoplamento por retro espalhamento (SANGHERA, THORNTON e HAINES, 2007).

No acoplamento indutivo, a energia é transferida de um circuito para o outro, de forma que o leitor de RFID gera um campo magnético variável no tempo e este gera uma tensão na bobina

do transponder, *tag*. Esta tensão é retificada e serve como fonte de alimentação para o CI. Devido à retirada de energia do campo magnético pela *tag*, a bobina do leitor detecta uma variação da corrente necessária para manter o transmissor operando. Se o tempo em que um resistor está ligado ou desligado é utilizado para compensar a perda de carga no sistema, dados e informações podem ser transferidas através da modulação de carga (FINKENZELLER, 2003). A eficiência da transferência de energia entre a bobina de antena do leitor e o transponder é proporcional à frequência de funcionamento, o número de enrolamentos, a área delimitada pelas bobina do transponder e o ângulo das duas bobinas. Este método de comunicação é aplicado tanto em baixa e alta frequências e para distâncias que não excedam o campo próximo. A Figura 9 ilustra o mecanismo de comunicação.

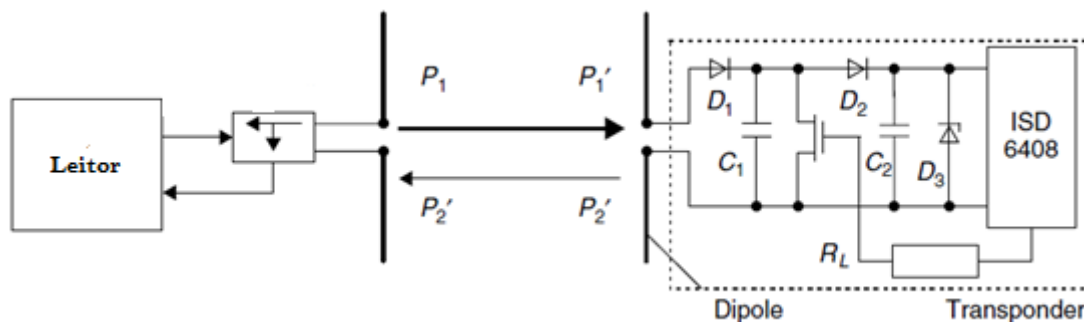
Figura 9 – Mecanismo de comunicação por acoplamento indutivo.



Fonte: adaptado (FINKENZELLER, 2003)

Já o acoplamento por retro espalhamento é o mais desejável para sistemas RFID de longo alcance que operam em ultra alta frequência, UHF. O leitor envia a informação e energia, sob a forma de uma onda eletromagnética, a *tag* reflete ou absorve esta energia da onda, modula o sinal e envia de volta para o leitor (SANGHERA, THORNTON e HAINES, 2007). Esta transferência de volta ocorre por reflexão modulada, conforme apresentado na Figura 10. A proporção de energia que chega na antena do transponder,  $P1'$ , é refletida, como  $P2'$ , para o leitor, porém as características dessa reflexão podem ser alteradas por uma carga conectada ao transponder, representada por  $RL$  na Figura 10. No momento que ocorre a transmissão de dados do transponder para o leitor, a carga  $RL$  pode ser ligada ou desligada no tempo possibilitando a transferência de dados e assim a amplitude da energia de  $P2'$  pode ser modulada. Dessa forma é realizada a leitura e a transferência dos dados (FINKENZELLER, 2003).

Figura 10 – Acoplamento por retro espalhamento.



Fonte: adaptado (FINKENZELLER, 2003)

A necessidade de comunicação entre sistemas leva a padronização de protocolos vem ganhando espaço desde 1990, devido a uma economia cada vez mais dinâmica. Dentre eles se destaca o código eletrônico de produto, é o sistema criado pela GS1 para padronizar as informações armazenadas na tecnologia portadora de dados RFID (GLSBR). Neste trabalho será utilizado um CI que utiliza o protocolo EPCGen 2, que reúne informações do protocolo ISO/IEC 18000 Part 6, juntamente com novas regras para a indústria de desenvolvimento de RFID (GOMES, 2007). A finalidade da padronização e de normas é definir as plataformas em que uma indústria possa operar de forma eficiente e segura. Na luta pela padronização de protocolos, existem muitas organizações envolvidas nos projetos de tecnologias RFID. As mais conhecidas na área dos sistemas RFID são a ISO (International for Standardization) e a EPC Global.

#### 2.4.4 Frequências de Operação

Os sistemas RFID operam nas mais variadas bandas de frequência, estando relacionadas com as bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Estas bandas são reservadas para o desenvolvimento industrial, científico e médico. São bandas sem licenciamento obrigatório e cada porção de espectro de frequências é disputado ao máximo. Dentre as diversas bandas frequência de operação podem ser citadas:

- Baixa Frequência

*Tags* de baixa frequência são bem comuns e operam em 125 kHz e 134,2 kHz. Devido a sua boa capacidade de penetração, estas *tags* podem ser aplicadas em objetos que contém água, metal, madeira, líquidos e até animais (REAZ, 2013). Sua aplicação se limita a regiões próximas

na ordem de alguns centímetros (KARMAKAR, 2010) (FINKENZELLER, 2003). Possuem a menor taxa de transferência de dados de todas as frequências de RFID e normalmente armazenam poucos dados. Não possuem sistema anti-colisão, ou é limitado, assim ler várias *tags* ao mesmo tempo é quase impossível. Geralmente são feitas de bobinas de cobre enroladas em um núcleo ferrítico. Exemplos de aplicações seriam: controle de acesso, rastreamento de ativos, identificação de animais, controle automotivo, cuidados de saúde (KARMAKAR, 2010).

- Alta Frequência

Estas *tags* operam em 13.56 MHz, os princípios de operação são similares as *tags* de baixa frequência, utilizam acoplamento indutivo como fonte de energia para se comunicar com o leitor. Elas possuem uma distância de leitura melhor que *tags* de baixa frequência, superiores a 0,5 metros. Melhor taxa de transferência de dados, e maior tamanho de memória. Possuem sistema anti-colisão, porém a leitura simultânea de muitas *tags* leva a redução da distância de leitura. São feitas de material condutivo na forma de um plano espiral fino. Podem ser lidas em água, metal, madeira e líquidos. Sua performance é afetada pela presença de metais em sua volta. Possuem alta transferência de dados e são aplicadas em cartões de crédito, etiquetas de livros e rastreamento de ativos (KARMAKAR, 2010).

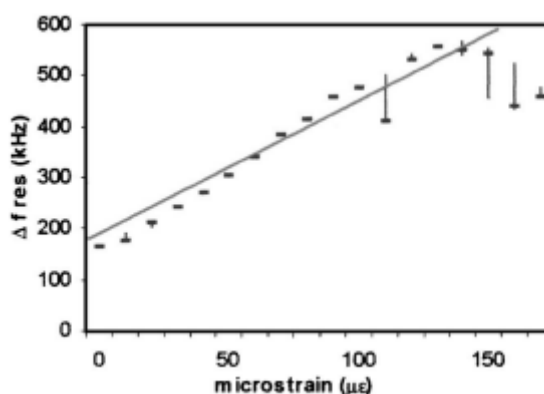
- Ultra Alta Frequência

São sistemas que operam em 433MHz para *tags* ativa e 860-960Mhz para *tags* passivas, utilizam acoplamento por retro espalhamento para comunicação. Em condições sem muita interferência do ambiente podem ter distância de leitura de até 20 m. Estas *tags* tem a capacidade de serem lidas simultaneamente e possuem sistema anti-colisão. São fabricadas com cobre, alumínio ou prata depositado sobre um substrato. O comprimento dessas *tags* são em torno de 16 cm, correspondente ao comprimento de meia onda, na frequência de 915MHz. São facilmente fabricadas e possuem a melhor capacidade de armazenamento de dados e distância de leitura dentre as frequências citadas neste trabalho. Entretanto a performance da *tag* reduz muito quando próxima a metais, água e tecidos biológicos, uma vez que degradam a eficiência da *tag*, através de absorção e dessintonização. Não podem ser lidas se existir água ou material condutor entre a *tag* e o interrogador (KARMAKAR, 2010) (FINKENZELLER, 2003).

## 2.5 O estado da arte para sensores de deformação passivos e sem fio

Inicialmente as pesquisas desenvolvidas para sensores de deformação buscavam um modo de realizar a interrogação sem fio e obter dados confiáveis, mas não abordavam o RFID. Butler (2002) desenvolveu um sensor a base de um indutor solenoidal que, ao sofrer deformações, gerava uma mudança em sua indutância e conseqüentemente uma mudança na frequência de ressonância do circuito LC. Os resultados obtidos indicaram a existência de uma relação entre deformação e a frequência de ressonância. Já Chuang, Thomson e Bridges (2005) projetaram um sensor passivo e sem fio baseado na reflexão de uma cavidade ressonante. Explicaram que o máximo sinal de retorno é obtido na frequência de ressonância e utilizaram o parâmetro S11, que representa a razão entre a onda refletida e a onda incidente, para a obtenção da frequência de ressonância. O sensor foi fabricado em alumínio e foi embutido em um cilindro de concreto. *Strain gauges* foram posicionados no concreto para medir a deformação. O cilindro de concreto foi submetido a um ensaio de compressão e um alto grau de linearidade entre as variações da frequência de ressonância e as deformações foi verificado. Valores de deformação de até 110  $\mu\text{m}$  se comportaram de forma linear, como mostrado Figura 11.

Figura 11 – Linearidade entre frequência de ressonância e deformação.



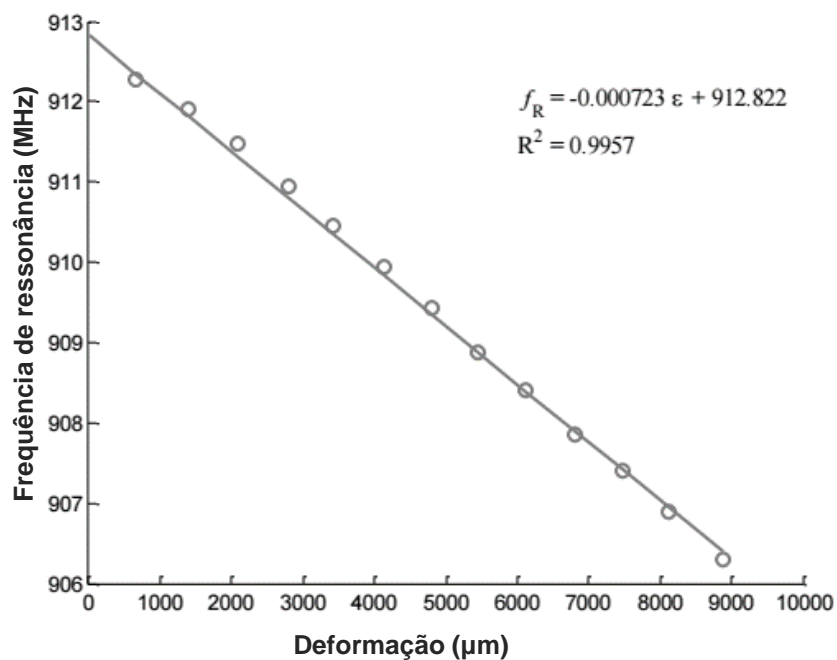
Fonte: (CHUANG, THOMSON e BRIDGES, 2005)

Após estas tentativas iniciais, começou-se a utilizar o conceito de antena no desenvolvimento de sensores. Deshmukh e Huang (2010) apresentaram uma técnica de interrogação remota de sensores passivos criados a partir de uma antena. Utilizaram uma fotocélula para habilitar a transferência de informações do sensor. Tata, Huang e Carter (2009), concluíram em seu trabalho que tanto analiticamente quanto experimentalmente a frequência de ressonância é sensível a deformações aplicadas ao longo da direção correspondente ao seu modo de radiação. Tata e Deshmukh (2009), comprovaram experimentalmente uma alta

tendência linear entre a frequência de ressonância e a deformação, através de um método de interrogação remota.

Merilampi e Bjorninen (2011) tiveram como objetivo em seu trabalho desenvolver um sensor sem fio para grandes deformações, baseado em uma antena passiva de RFID. A performance da tag e os efeitos causados pelas deformações mecânicas foram avaliadas em relação ao *Threshold Power* e o sinal de *backscattered*. Merilampi e Bjorninen concluíram que é possível medir deformações acima de 50%. Occhiuzzi, Paggi e Marrocco (2011) desenvolveram um sensor baseado em uma antena do tipo *Meander*, onde para cada volta do *Meander* cargas capacitivas são adicionadas e estas possuem valores em função da distância entre os braços do *Meander*. Ao sofrer deformação estes braços alteram suas relações de distâncias o que leva a uma alteração da impedância do sensor, coeficiente de potência de transmissão e ganho. Comportamentos diversos foram encontrados para cada característica citada acima. Lantz (2011), verificou em seu trabalho que um sensor RFID de deformação, do tipo *microstrip antenna*, era capaz de comportar-se linearmente em um ensaio de tração e verificou que era possível de verificar a propagação de um defeito, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Linearidade de deformação e frequência de um sensor RFID.



Fonte: Adaptado (LANTZ, 2011).

O trabalho de Mohammad, Gowda e Zhai (2012) mostrou como a frequência de ressonância varia em função da propagação de um defeito em direções variadas usando uma antena *patch*.

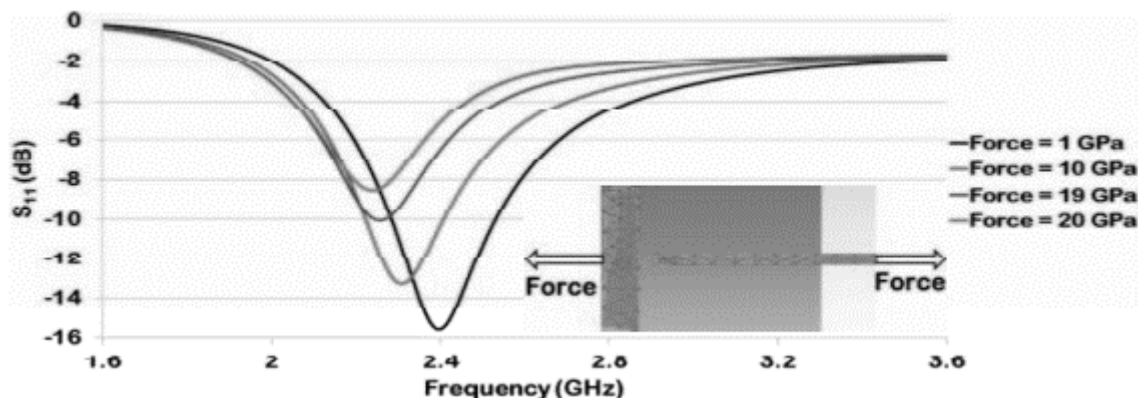
Verificando que o sensor não consegue diferenciar as orientações e o mais adequado seria utilizar mais de um sensor para identificar a propagação. Nessa mesma lógica de aplicação do sensor, Mohammad e Huang (2011) em outro trabalho, mostraram que um sensor produzido a partir de uma antena *patch* é capaz de monitorar o crescimento de uma trinca, de forma que a frequência de ressonância reduz linearmente com o crescimento da trinca no plano de terra da antena. O sensor se mostrou capaz de detectar os defeitos próximos devido as deformações que são geradas por eles.

Hasani e Vena (2013) analisaram o efeito da deformação na distância de leitura da *tag* e no *Radar Cross Section*. Em ambos os casos com a deformação ocorreram mudanças nos valores de referência. Jang, Kang e Kim (2013) demonstraram a possibilidade de detecção de deformação e de uma trinca a partir de variações no coeficiente de reflexão e no coeficiente de transmissão do seu sensor desenvolvido. Afirmaram que seu sensor é adequado para cobrir grandes áreas de monitoramento em estruturas. Kim, Wang e Kim (2014) desenvolveram um sensor LC flexível sem chip de RFID capaz de detectar estiramentos em uma direção específica. Daliri e Galehdar (2014) analisaram em seu trabalho o efeito do fator de qualidade na distância de leitura de sensores de deformação passivos. Verificaram que quando se aumentava a deformação, a frequência de ressonância reduzia. Também concluíram que o uso de um substrato com baixas perdas e alta permissividade pode levar a um aumento da distância de leitura.

Caizzone, Digiampaolo e Marrocco (2014) construíram um sistema de monitoramento de trincas baseado no acoplamento de tags de RFID. A principal ideia era que a estrutura ao sofrer deslocamentos causaria deslocamentos das tags e elas responderiam ao leitor em tempos diferentes e com degradação em sua comunicação.

No artigo de Wang, Liu e Ge (2015) foi verificada uma relação linear entre frequência de ressonância e deformação em uma *microstrip patch* antena e demonstraram que quando maior for o valor da frequência de ressonância melhor será a resolução do sensor. Dey e Karmakar (2015) desenvolveram diferentes tipos de antenas e aplicaram diferentes formas de carregamento. Assim verificaram que além da frequência de ressonância ser alterada pela deformação, o fator de qualidade do parâmetro medido,  $S_{11}$ , também se modificava. A Figura 13 mostra a variação da frequência de ressonância com a força aplicada.

Figura 13 – Variação da frequência de ressonância com a força aplicada.



Fonte: (DEY e KARMAKAR , 2015).

O uso do RFID na detecção e monitoramento de deformações e defeitos vem como uma solução para sensoriamento remoto de estruturas. Dentre as vantagens em relação ao *strain gauge* convencional estão: a operação em baixa tensão, o não uso de cabos e a saída da antena com sinal frequência modulada. A saída de medidores de tensão convencionais é com amplitude modulada, como resultado, a saída do sensor de antena é menos propenso a ruídos ambiente. O uso do mecanismo de identificação permite formar uma rede de detecção sem fio que pode fornecer cobertura do sensor sobre uma grande área, de forma bem pontual.

## 2.6 Abordagem Estatística

A estatística possui aplicações nos mais importantes segmentos da engenharia e é uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisão. Métodos estatísticos podem ser utilizados quando dados são coletados e analisados. Modelos de regressão são utilizados para correlacionar variáveis de entrada e saída, realizar inferências, seleção de variáveis e estimar parâmetros.

### 2.6.1 Regressão Linear Simples

Dado  $n$  pares de valores de duas variáveis  $X_i$ ,  $Y_i$  (com  $i = 1, 2, \dots, n$ ), se admitirmos que  $Y$  é função linear de  $X$ , pode ser estabelecida uma regressão linear simples, cujo o modelo estatístico pode ser representado pela equação 20 :

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \mu_i \quad (20)$$

Onde:



- $Y_i$  = Variável dependente.  
 $\alpha$  = Coeficiente linear da reta.  
 $\beta$  = Coeficiente angular da reta.  
 $X_i$  = Variável independente.  
 $\mu_i$  = Erro.

No entanto, para que o modelo de regressão seja válido, deve ser pressuposto que:

- I. A relação  $X$  e  $Y$  é linear.
- II. Os valores de  $X$  são fixos, ou seja,  $X$  não é uma variável aleatória.
- III. A média do erro é nula.
- IV. A variância do erro é constante.
- V. O erro de uma observação não é correlacionado com o erro de outra observação.
- VI. Os erros têm distribuição normal.

Com o intuito de validar as pressuposições citadas acima, testes de análise podem ser utilizados. O item III e IV, por se tratar de cálculos triviais, não irão ser detalhados neste trabalho e podem ser revistos em Sartoris (2003). Para a pressuposição V, o Teste de Durbin-Watson pode ser uma alternativa adequada para validação da pressuposição.

O teste de Durbin-Watson verifica a existência de auto correlação nos resíduos da regressão através do valor de  $d$ , que pode ser obtido na equação 21 (HOFFMANN, 2015) (SARTORIS, 2003). É necessário que o resultado deste teste demonstre que os resíduos da regressão são independentes.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (21)$$

Onde:

- $e_t$  = Resíduos associados à  $t$ -ésima observação.  
 $d$  = Valor do Teste Durbin-Watson.

Uma vez calculado  $d$ , este valor deve ser comparado aos valores críticos  $d_l$  e  $d_u$ . Os valores de  $d_l$  e  $d_u$  podem ser encontrados em tabelas da estatística  $d$  de Durbin-Watson (GUJARATI e PORTER, 2004). Estes valores são cruciais para permitir uma tomada de decisão. A tabela 2 apresenta a tomada de decisão correta referente ao valor de  $d$  obtido no teste de autocorrelação dos erros. A Figura 14 apresenta uma região da tabela estatística  $d$  de Durbin-Watson, com

nível de significância de 0,01. Onde,  $n$  é o tamanho da amostra e  $k'$  é o número de variáveis explanatórias excluindo o termo constante. Como a regressão linear simples possuem apenas uma variável explanatória,  $x$ , logo  $k' = 1$ .

Figura 14 - Estatística  $d$  de Durbin-Watson

$n$	$k' = 1$	
	$d_l$	$d_u$
6	0,610	1,400
7	0,700	1,356
8	0,763	1,332
9	0,824	1,320
10	0,879	1,320
11	0,927	1,324
12	0,971	1,331
13	1,010	1,340
14	1,045	1,350
15	1,077	1,361
16	1,106	1,371

Fonte: Gujarati e Porter (2004)

Tabela 2 – Interpretação do valor obtido no teste de Durbin-Watson.

$d$	$0 < d < d_l$	$d_l < d < d_u$	$d_u < d < 4-d_u$	$4-d_u < d < 4-d_l$	$4-d_l < d < 4$
Decisão	Auto correlação	Nada se pode concluir	Independência	Nada pode se concluir	Auto correlação

Fonte: Adaptado (Gujarati e Porter, 2004)

A pressuposição VI pode ser validada através do teste de Shapiro-Wilk. Este teste investiga se uma amostra aleatória provém de uma distribuição normal. O valor  $W$ , valor de referência do teste, pode ser obtido através da equação 22.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

Onde:

$x_i$  = Valores ordenados da amostras.

$a_i$  = Constantes geradas a partir do meio, variâncias e covariâncias.

$n$  = Tamanho da amostra.

$\bar{x}$  = Média dos valores ordenados da amostra.

A hipótese  $H_0$  do teste afirma que ocorrerá uma distribuição normal quando o valor de  $W$ , obtido na equação 22 for maior que o valor de  $W$  obtido na Tabela de distribuição de Shapiro-Wilk para o teste de normalidade (SHAPIRO e WILK, 1965) (SCUDINO, 2008).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo realizará uma abordagem das metodologias pertinentes as técnicas utilizadas no desenvolvimento de um sensor de deformação que opere como um RFID. Para estes sensores, que utilizam técnicas de radiofrequência, restrições iniciais devem ser cuidadosamente estimadas, principalmente devido às influências do ambiente e das condições de operação do sensor. A metodologia deste trabalho ficou restrita a observação dos seguintes itens:

- Definição do local de aplicação do sensor e tipo de antena do sensor;
- Disponibilidade de recursos materiais;
- Definição do tipo de solicitação a qual a estrutura está submetida;
- Definição do recurso de modelagem numérica, software, para projeto do sensor;
- Análise da influência das dimensões da geometria do sensor em seu desenvolvimento;
- Prototipação do sensor;
- Ensaio Mecânico;
- Análise dos resultados.

#### 3.1 Local de aplicação do sensor e tipo de antena

A avaliação do local da aplicação do sensor deve ser o primeiro passo no desenvolvimento do sensor, pois diferenças nos parâmetros das antenas podem ser observados quando estas antenas são aplicadas sobre superfícies metálicas, próximas de locais com água e outros meios (AROR e DEAVOURS, 2007), (DOBKIN e WEIGAND, 2005) e (KANAN e AZIZI, 2009). Foi definido que o sensor será aplicado sobre uma chapa de alumínio, com as dimensões de 310 x 100 x 2 mm. O tipo mais indicado nesse caso é a antena *microstrip patch*, pois possui um plano de terra que reduz os efeitos deletérios aos parâmetros das antenas, como dessintonização e perda de eficiência. (UKKONEN, SYDANHEIRNO e KIVIKOSKI, 2004) (UKKONEN e SYDÄNHEIMO, 2005) (RAUMONEN, LAURI, *et al.*, 2003).

### 3.2 Materiais do sensor

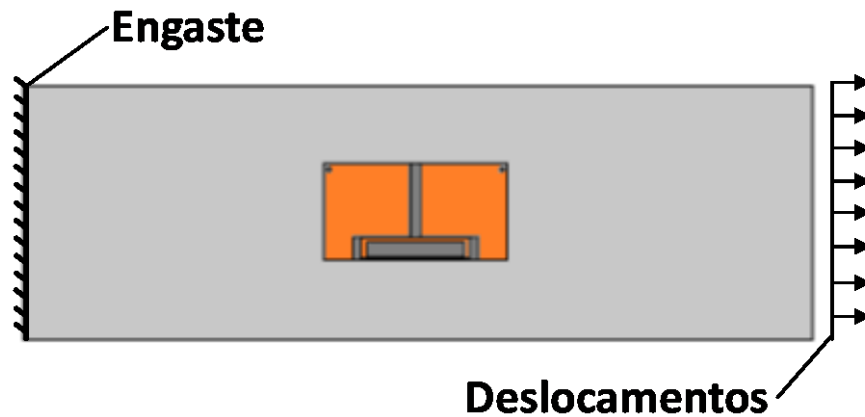
Os materiais necessários para o desenvolvimento do sensor são:

- Substrato – O substrato deve possuir baixa rigidez em comparação com o alumínio, para que não exerça nenhum tipo de resistência a deformação do alumínio. Outra característica importante é a baixa tangente de perda, para se obter alta eficiência de radiação e estreita largura de banda (DALIRI e GALEHDAR, 2014). Assim foi definido o laminado de PTFE N9220, espessura de 0,79mm, com dupla face de cobre com 17,5  $\mu\text{m}$ , tangente de perda, com valor de 0,0009. Este material pertencente a uma linha de laminados de resinas de fibra de vidro/PTFE, exibe excelentes performances de desempenho dimensionais e elétricas. (PARK ELECTROCHEMICAL CORP.)
- CI – É o componente essencial para a identificação do sensor e definição da banda de frequência de operação. No presente trabalho foi utilizado o componente integrado CTC13001, produzido pela empresa CEITEC S.A., escolha devido a disponibilidade do componente integrado. Para este CI, a frequência de operação é definida para 915 MHz, pertencente a banda UHF.

### 3.3 Tipo de solicitação

A chapa de alumínio foi submetida a uma solicitação uniaxial de tração, semelhante ao que ocorre em um ensaio de tração convencional. Aplicações que se enquadram neste tipo de solicitação como por exemplo vigas de pontes submetidas a momentos fletores, estruturas de transmissão de energia, pás de geradores eólicos entre outras. Foram aplicados em uma das extremidades da chapa deslocamentos com passos de aplicação de 200  $\mu\text{m}$ . A Figura 15 exemplifica o ensaio.

Figura 15 – Ensaio mecânico proposto.



Fonte: Autor (2017).

### 3.4 Softwares para desenvolvimento do sensor

Com o objetivo inicial de projetar o sensor foi utilizado o *software* de simulação numérica ANSYS HFSS. Este software foi escolhido pois é um simulador de campo eletromagnético de onda completa de alta performance para modelagem de dispositivos passivos com volume, integra simulação, projeto e otimização em um único ambiente e apresenta soluções rápidas e precisas (SANDEEP e KASHYAP, 2012). A CEITEC S.A, detentora da licença do programa e tendo grande expertise na área de desenvolvimento de componentes integrados e soluções para RFID auxiliou-nos nesta etapa.

Na análise no *software* HFSS os seguintes dados foram analisados:

- 1) Frequência de ressonância – Foi analisado o parâmetro S11, parâmetro que reflete a razão entre a onda refletida e a onda incidente (KARMAKAR, 2010). Para o menor valor de S11 obtido em uma banda frequência pode-se afirmar que a frequência referente a este valor é a frequência de ressonância.
- 2) Impedância – O projeto visou obter uma antena com o valor de impedância mais próxima à máxima transferência de potência, explicada da revisão literária deste trabalho.
- 3) Ganho – Valores superiores à -8 dB.

No projeto do sensor, foi realizado um estudo numérico para avaliar o efeito gerado pelos deslocamentos aplicados na chapa na frequência de ressonância do sensor. O *software* utilizado para esta análise foi o COMSOL Multiphysics®, a escolha deste foi devido à sua capacidade

de realizar análises em conjunto de esforços mecânicos e radiofrequência. O processo de simulação foi baseado no tipo de solicitação já descrito anteriormente, aplicação deslocamentos (prescritos) em uma chapa de alumínio e a utilização de toda a estrutura, chapa e sensor deformado, na análise de frequência do sensor.

Em modelos eletromagnéticos deve-se adicionar um volume de material de no mínimo um comprimento de onda ao redor do objeto de análise. O ar foi adicionado nesta simulação e a parte externa desse volume foi caracterizada como uma camada perfeitamente concordante (*perfectly matched layer*), um domínio que minimiza a reflexão das ondas, semelhante ao que ocorre em uma câmara anecóica. A equação (9) foi adicionada ao modelo para obtenção do valor do coeficiente de reflexão de potência. O *software* utiliza a equação (1) para análises de ondas eletromagnéticas no domínio da frequência.

As propriedades mais relevantes para os cálculos das equações do modelo podem ser visualizadas na Tabela 3. Foram utilizados elementos tetraédricos para a discretização da estrutura. Um intervalo para a análise de frequência mais largo, 100 MHz, foi escolhido inicialmente para verificar o local da ressonância. Após esta região estar melhor definida, uma análise mais criteriosa, a um passo de 0,1 MHz foi realizada. O valor de 0,1 MHz foi escolhido pelo motivo de que o equipamento utilizado no ensaio experimental possui um passo mínimo de 0,1 MHz.

Tabela 3 – Propriedades mais relevantes dos materiais utilizados na simulação.

Material	Alumínio 5052-H34	N9220
Coeficiente de Poisson - $\mu$	0,33	0,21
Módulo de Elasticidade - E	72 GPa	0,4GPa
Permissividade Relativa - $\epsilon_r$	1	2,2

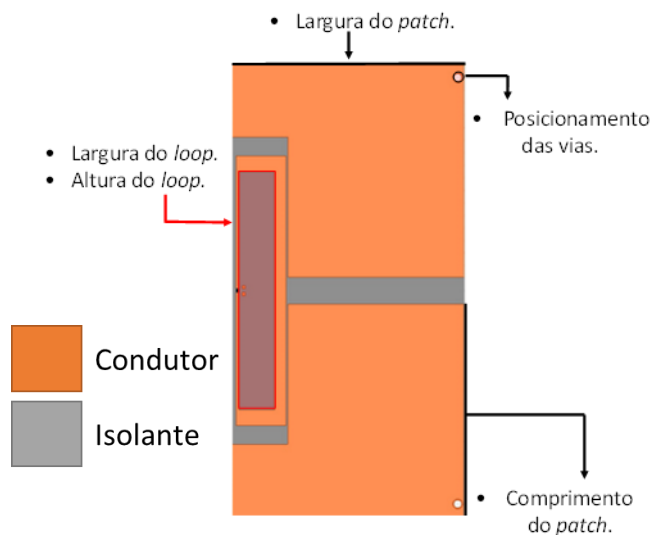
### 3.5 Desenvolvimento do sensor e influência dos parâmetros da geometria do sensor

No desenvolvimento de um sensor um parâmetro a ser salientado é a sensibilidade. A sensibilidade pode ser compreendida como a menor variação de uma grandeza medida que o sensor pode detectar. Para o sensor proposto neste trabalho, esta grandeza medida é a deformação, que é inferida através da variação da frequência de ressonância. A sensibilidade do sensor pode ser avaliada através de sua geometria e a precisão através de seu fator de

qualidade. Ou seja, uma antena com alto fator de qualidade possibilita melhor interpretação e visualização da variação de seus parâmetros. Seguindo nesse contexto buscou-se um modelo de antena com alto fator de qualidade. O modelo PIFA, *Planar Inverted-F Antenna* apresentada por Marroco (2008), apresentou-se como uma alternativa. Devido à sua estrutura possuir um loop alimentado por acoplamento eletromagnético e vias em suas extremidades, este loop gera uma maior indutância e um alto fator de qualidade, características desejáveis nesta aplicação. Algumas modificações como a introdução de vias e as dimensões do *loop* e *slots* foram realizadas a partir do modelo de Marroco (2008). A Figura 16 apresenta o modelo de antena escolhido.

As dimensões da geometria do sensor são determinantes em relação a frequência de ressonância, fator de qualidade e ganho, cada modificação em suas dimensões gera uma alteração na impedância do sensor. Porém algumas regiões principais devem ser salientadas para o entendimento do desenvolvimento da antena e estas regiões são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Regiões em destaque para o desenvolvimento do sensor.

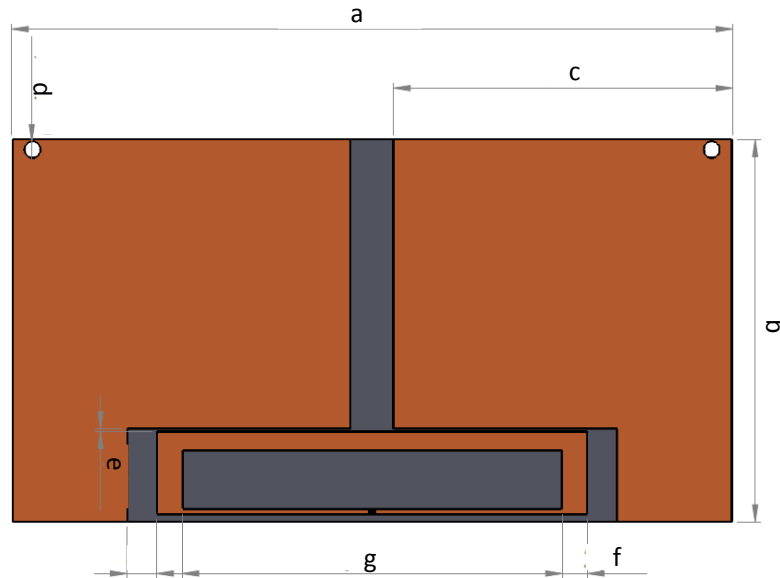


Fonte: Autor (2017)

O modelo proposto na Figura 17 e suas dimensões, Tabela 4, podem ser visualizados abaixo. O sensor I foi a primeira tentativa de simulação e confecção. Sensor II e Sensor III, foram desenvolvidos em uma etapa posterior, com o intuito de otimizar o sensor. O Modelo II buscou ajustar a frequência de ressonância para o valor alvo no trabalho, 915 MHz. Já o Modelo III procurou tornar o sensor sensível ao esforço, aumentando o comprimento do patch e reduzindo a largura do patch.



Figura 17 – Modelo sensor.



Fonte: Autor (2017).

Tabela 4 – Dimensões propostas para os sensores em milímetros.

	I	II	III
a	72,00	72,00	92,00
b	38,00	37,00	27,00
c	34,16	33,85	44,40
d	1,60	1,60	0,80
e	0,25	0,25	0,25
f	3,00	3,00	3,00
g	37,96	37,96	43,00

Fonte: Autor (2017).

### 3.6 Prototipação do sensor

Os equipamentos necessários para a prototipação do sensor são:

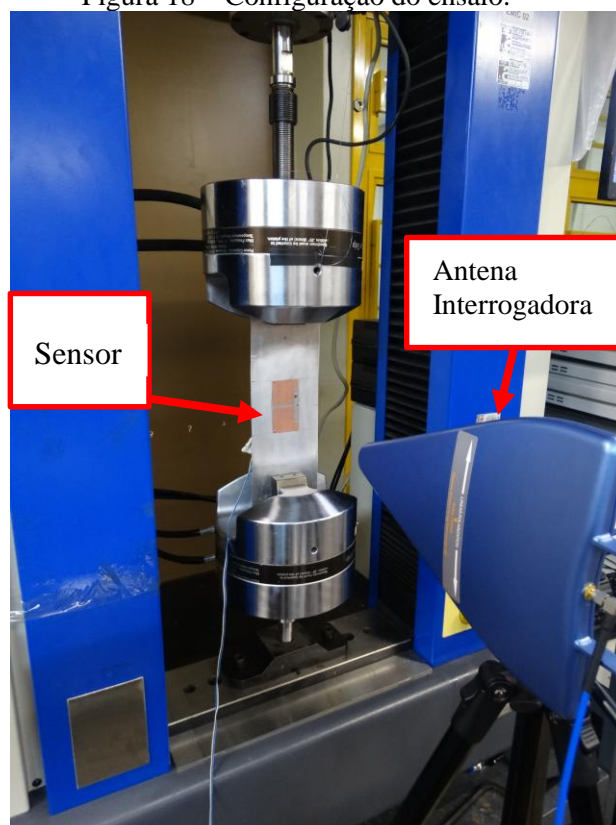
- Prototipadora mecânica – O LAMEF possui uma prototipadora mecânica, LPKF PROTOMAT S63, na qual foi utilizada para este trabalho. Os sensores foram prototipados a partir de uma placa de N9220 com dimensões de 457,2mm x 304,8mm. As vias foram introduzidas manualmente e presas por força mecânica, rebitagem.

- *Flip-Chip* – Processo que realiza a adesão do CI ao substrato. A empresa CEITEC S.A realizou este processo.

### 3.7 Ensaio Mecânico

O equipamento utilizado é uma máquina universal para ensaios mecânicos de tração, do fabricante EMIC, com capacidade máxima de 50 kN. A chapa de alumínio foi submetida a um ensaio uniaxial de tração, controlando os deslocamentos com o passo de 200 $\mu$ m. O sensor foi fixado no centro desta chapa através da cola epóxy Araldite®, indicada para união de metais. No outro lado da placa foi colado um *strain gauge* do tipo roseta biaxial, KYOWA – KFG-2-120-D16-11, para monitoramento de deformações. Ambas as superfícies foram preparadas através do uso de lixa 400. Para aquisição de dados do *strain gauge* foi utilizado o Spider 8. A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 18. Foram realizados 7 ensaios de tração. Para o sensor 1 foi realizado o ensaio de apenas 1 amostra, já para os sensores 2 e 3 foram ensaiados 3 amostras para cada configuração.

Figura 18 – Configuração do ensaio.



Fonte: Autor (2017).

### 3.8 Obtenção e análise dos resultados

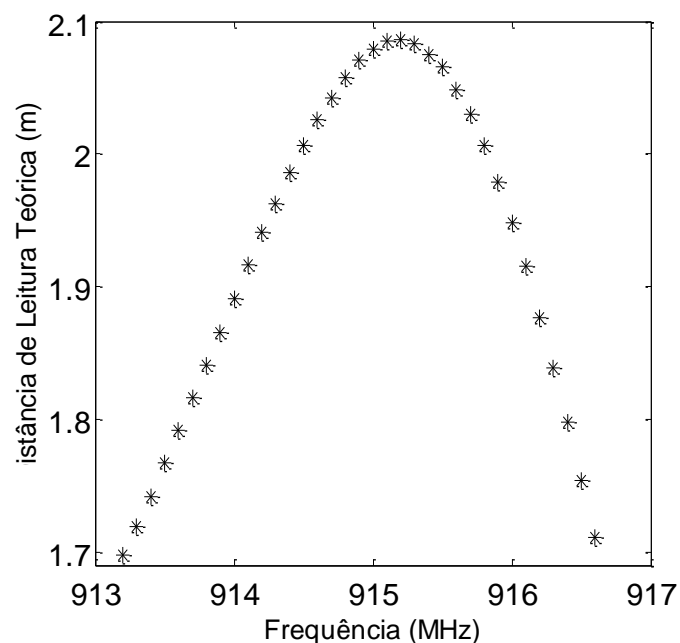
#### 3.8.1 Simulação numérica

Os dados obtidos através da simulação numérica foram:

- Coeficiente de reflexão de potência;
- Ganho da antena (dBi);
- Diagrama de radiação.
- Deformação na chapa de alumínio.

Dessa forma, estes dados podem ser aplicados na equação 18. A potência transmitida pelo leitor e o ganho da antena do leitor, juntos, podem ser aproximados pela *Equivalent isotropically radiated power* (SESHAGIRI RAO, NIKITIN e LAM, 2005), EIRP, sendo que o valor utilizado para o EIRP foi 3,28 Watts, correspondente ao mesmo valor do equipamento utilizado neste trabalho. Assim, o resultado obtido na equação 18 são pontos de máxima distância de leitura teórica em função da frequência, como mostrado na Figura 19. As coletas de dados de deformação foram realizadas no ponto central da chapa e foram coletados os valores de deformação somente na direção em que os deslocamentos foram aplicados.

Figura 19 – Resultados obtidos na equação 18.

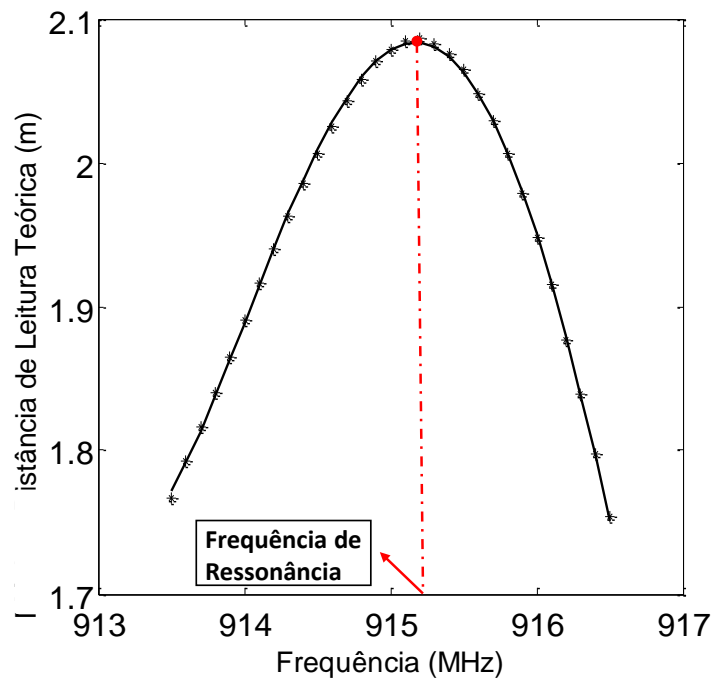


Fonte: Autor(2017).

A partir dos pontos obtidos através da equação 18, foi realizada uma regressão polinomial de quarta ordem, utilizando o software MATLAB. A finalidade desta regressão é obter uma curva que possua um alto grau de representatividade dos dados obtidos, o coeficiente de determinação foi escolhido como mecanismo de avaliação de representatividade da regressão.

Após obter o polinômio, o valor do máximo deste polinômio é calculado. O valor do máximo do polinômio no intervalo de análise possui uma frequência específica, e esta frequência pode ser referida como a frequência de ressonância para o sensor (YEOMAN e O'NEILL, 2014) (SESHAGIRI RAO, NIKITIN e LAM, 2005). A Figura 20 exemplifica este processo. O mesmo processo de análise e regressão foi realizado para todos os deslocamentos aplicados. Assim, para cada deslocamento aplicado à chapa uma frequência de ressonância foi observada.

Figura 20 – Obtenção da frequência de ressonância.



Fonte: Autor (2017).

Com a coleta de todas as frequências de ressonâncias uma regressão linear simples foi realizada com os valores de frequência de ressonância e os deslocamentos aplicados e outra regressão linear simples foi realizada a partir dos valores de frequência de ressonância e o valor da deformação coletado. Com a finalidade de validar o modelo de regressão linear simples foi executada uma análise de regressão com o software Statistica 12. Teste de Durbin-Watson,

Teste de Shapiro Wilk foram aplicados para comprovar as hipóteses do modelo de regressão linear simples.

### 3.8.2 Ensaio experimental

Na etapa experimental, a análise da frequência de ressonância do sensor foi realizada através do uso do equipamento Tagformance Lite desenvolvido pela Voyantic, Figura 21. Este equipamento possui um sistema de medição altamente sofisticado para avaliar funcionalidade e desempenho de UHF *tags*. O leitor gera uma onda portadora que ativa a *tag*, a onda portadora pode ser modulada para enviar um comando para a *tag*, e a *tag*, por sua vez, pode modular o sinal que se reflete a partir dela. Tagformance lite mede as propriedades da *tag* enquanto ela está ativa (VOYANTIC, 2015). A resolução do equipamento pode ser ajustada para 0,1 dB, 0,5 dB e 1dB com sua intensidade variando de -5 dB à 30 dB. A banda de frequência de funcionamento varia de 800 MHz à 1000 MHz, com passos mínimos de análise de 0,1 MHz. O equipamento pode realizar diversas medidas mas para este trabalho foi escolhido utilizar o *THRESHOLD – Theoretical read range forward*, esta medida refere-se a máxima distância de leitura teórica da *tag* que está sendo analisada. Os resultados obtidos do equipamento são pontos de máxima distância de leitura teórica em função da frequência. Foram realizadas 15 coletas de dados para cada deslocamento aplicado. O ensaio foi realizado na temperatura de 24 °C.

Figura 21 – Equipamento Tagformance Lite

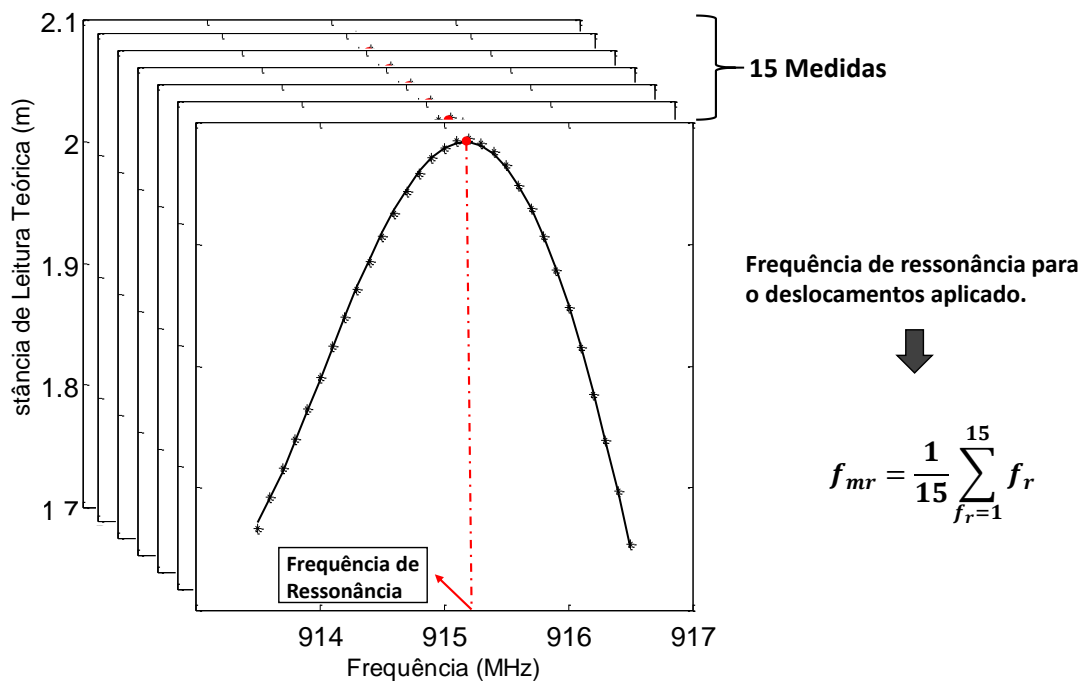


Fonte: (VOYANTIC, 2015).

A partir dos dados obtidos no ensaio experimental iniciou-se um tratamento de dados com o software MATLAB. O tratamento consistiu de forma igual ao realizado na simulação numérica, foi realizado uma regressão polinomial de quarta ordem para cada medida realizada, após obter o polinômio, o valor do máximo deste foi obtido. Este máximo corresponde a uma frequência específica e esta frequência pode ser chamada de frequência de ressonância para a medida realizada. Como foram realizadas 15 medidas para cada deslocamento, uma média das

frequências de ressonância obtidas para um mesmo deslocamento foi realizada. O valor desta média é a frequência de ressonância para o deslocamento proposto. A Figura 22 exemplifica o processo descrito anteriormente, onde  $f_{mr}$  é a frequência de ressonância para o deslocamento analisado obtida através da média das frequências de ressonâncias medidas,  $f_r$ . Além destes dados, foram quantificados os fatores de qualidade de cada sensor. Analisou-se a largura de banda à -3dB do ponto de máximo das curvas, ou seja, a 70,7 % do valor de máximo de sinal (BLAKE e LONG, 2009) (HANSEN e COLLIN, 2011). Uma vez que se obteve a largura de banda, este valor foi aplicado à equação 14 para a obtenção do valor referente ao fator de qualidade. Os valores de deformação foram obtidos a partir do *strain gauge*.

Figura 22 – Processo de obtenção da frequência de ressonância para o deslocamento aplicado.



Fonte: Autor (2017)

Também, analogamente a simulação, foi realizada uma regressão dos valores de frequência de ressonância em função dos deslocamentos e outra regressão dos valores de frequência em função das deformações. Para validar as regressões foram realizadas análises de regressão com o software Statistica 12.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. A primeira parte deste capítulo aborda os resultados do projeto dos sensores assistido por computador através de análise das variáveis da antena e o comportamento numérico dos sensores quando submetidos à esforços. A segunda parte apresenta os resultados experimentais referentes aos comportamentos destes sensores quando submetidos à esforços. Em ambas as partes deste capítulo foram realizadas análises dos modelos de regressão linear simples.

### 4.1 Simulação Numérica

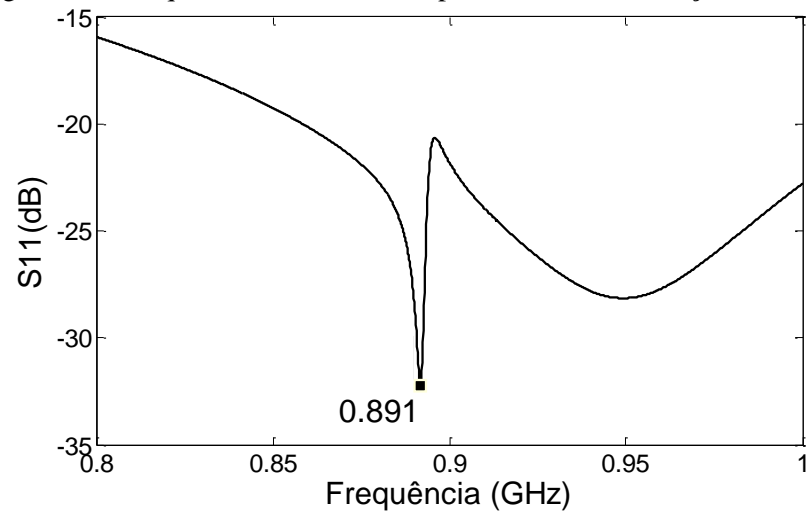
Inicialmente serão apresentados os resultados das simulações referentes à construção do sensor, no software HFSS, e após os resultados que refletem o comportamento do sensor quando submetido à esforços, utilizando o software COMSOL.

#### 4.1.1 Sensor I

Para o Sensor I foram obtidos os seguintes resultados referente à análise no software HFSS:

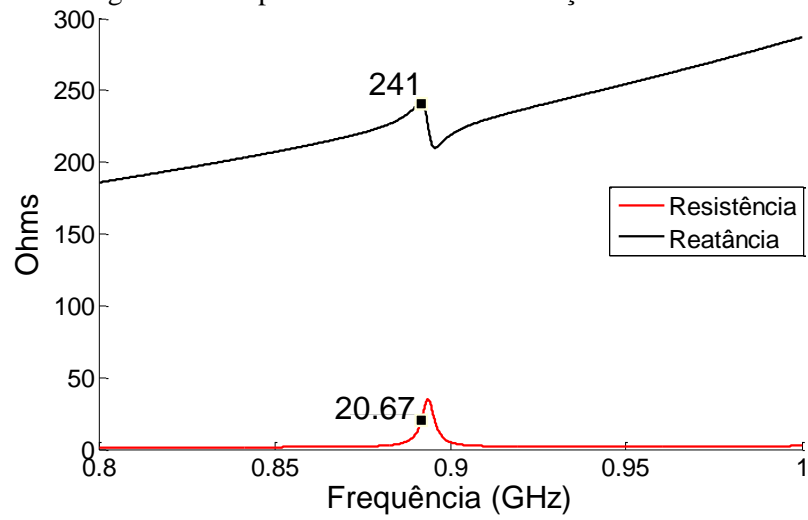
- Frequência de Ressonância: O valor de frequência de ressonância obtido foi de 891,8 MHz. Este valor pode ser observado na Figura 23, onde também pode ser visualizada a presença de duas ressonâncias. A ressonância na qual está o marcador se refere ao *Patch* da antena e a ressonância mais à direita ao *Loop* da antena.
- Impedância: Para a frequência de 891,8 MHz foi observado um valor de impedância de  $20,67 + 240j$  ohms, conforme ilustra a Figura 24.
- Ganho: Conforme Figura 25 apresenta, foi observado um ganho com o valor máximo de -5,866 dB na direção de Z, para a frequência de 891,8 MHz.

Figura 23 – Frequência de ressonância para Modelo I simulação HFSS.



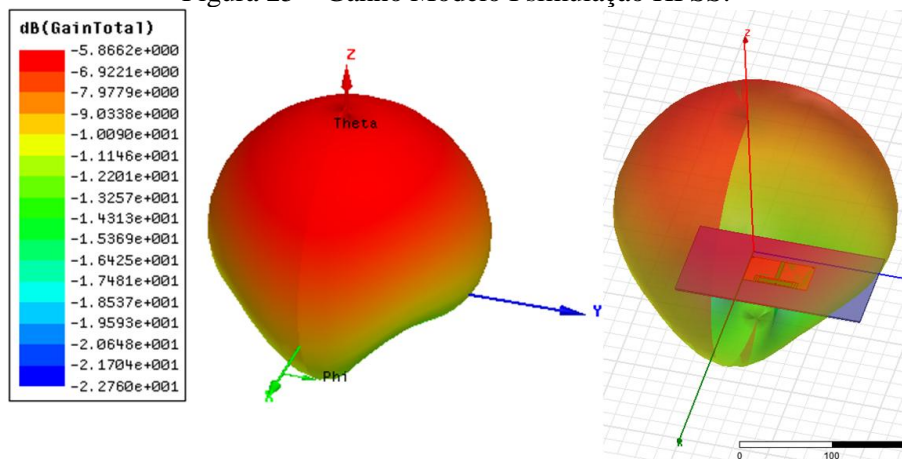
Fonte: Autor (2017)

Figura 24 – Impedância Modelo I simulação HFSS.



Fonte: Autor (2017).

Figura 25 – Ganho Modelo I simulação HFSS.



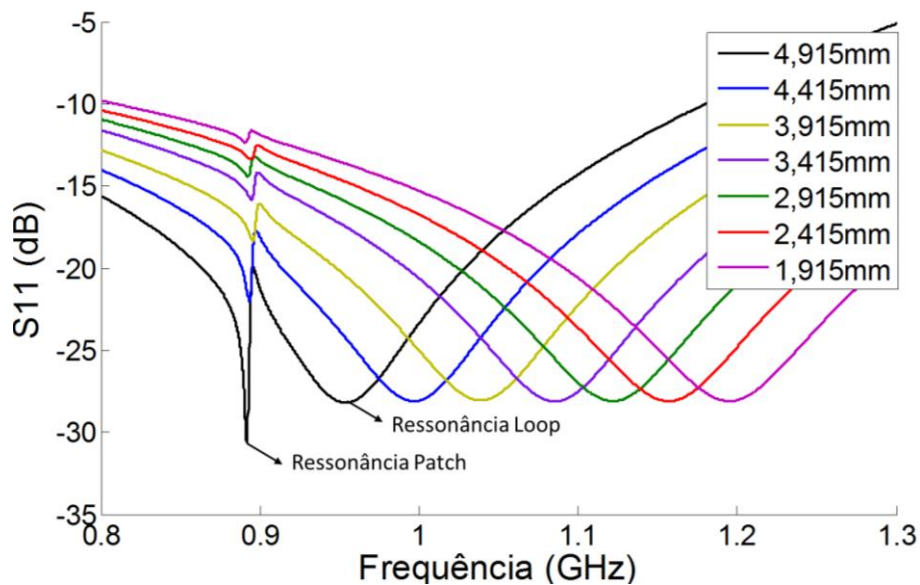
Fonte: Autor (2017).



O entendimento de como as modificações nas dimensões das regiões salientadas, na metodologia deste trabalho, alteram os parâmetros da antena é essencial para o desenvolvimento deste tipo de sensor. Os comportamentos referentes às modificações nestas regiões podem ser visualizados nos resultados abaixo:

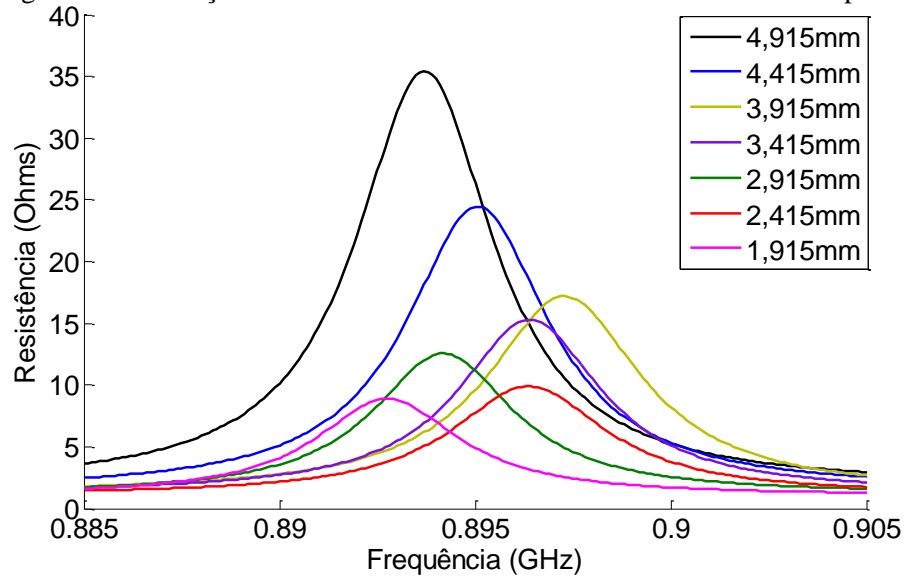
- **Altura do *Loop*:** A Figura 26 apresenta o efeito do aumento da altura do *Loop* nas ressonâncias da antena. Claramente, nota-se que ocorre aumento na intensidade do sinal da ressonância do *Patch* à medida que a ressonância do *Loop* se aproxima, devido ao acoplamento indutivo. Além disso, as Figuras 27 e 28 mostram como a impedância da antena varia com o aumento da altura do *Loop*. Tanto a resistência, Figura 27, quanto a reatância, Figura 28, da antena aumentam à medida que a altura do *Loop* aumenta.

Figura 26 – Variações das ressonâncias devido ao aumento da altura do *Loop*.



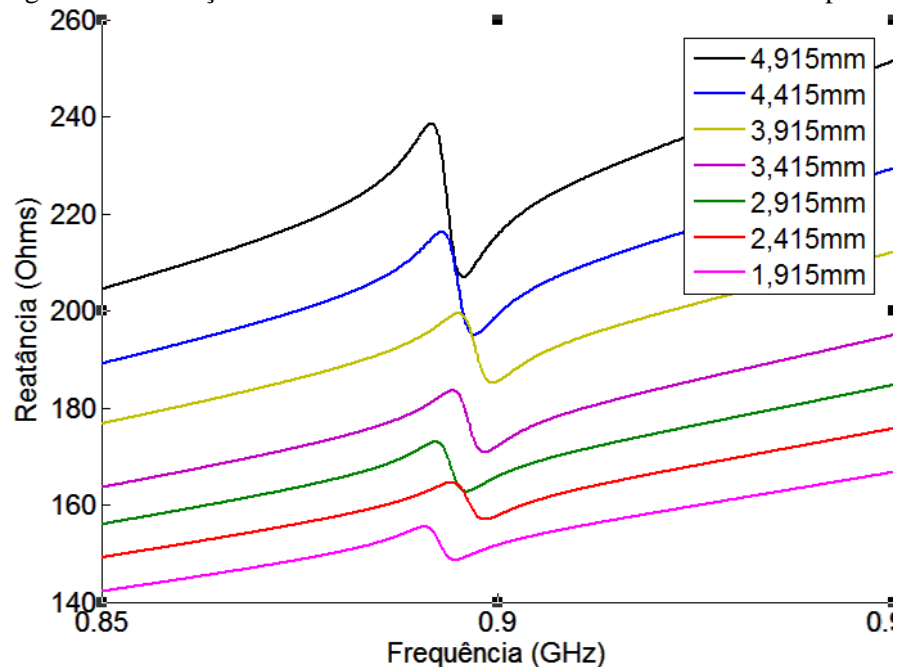
Fonte: Autor (2017).

Figura 27 – Variações da resistência devido ao aumento da altura do loop.



Fonte: Autor (2017).

Figura 28 - Variações da reatância devido ao aumento da altura do loop.

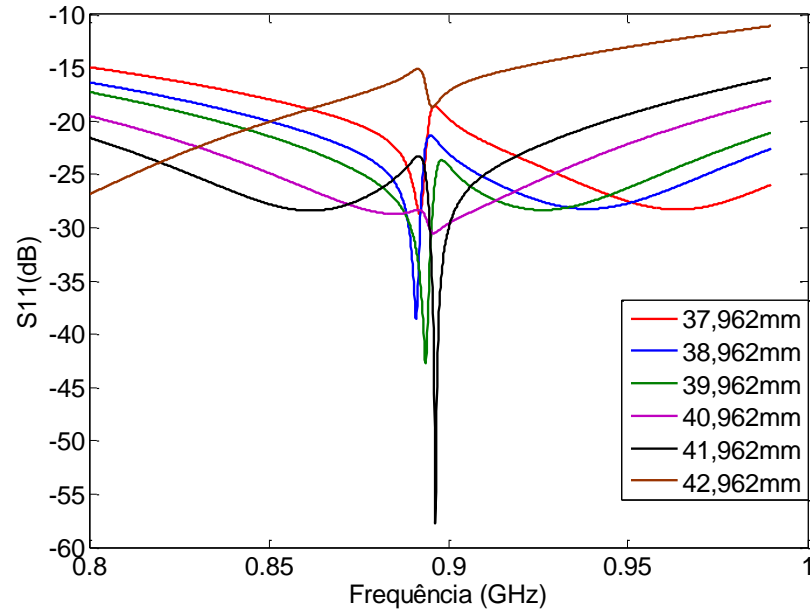


Fonte: Autor(2017).

- **Largura do *loop*:** O efeito do aumento da largura do loop pode ser verificado na Figura 29. A ressonância referente ao *loop* se desloca para valores de menor frequência com o aumento da largura do *loop*. Para a ressonância do *patch* nenhuma tendência pode ser atribuída. Na Figura 30 pode ser visualizado o efeito do aumento da largura do *loop* na resistência referente à ressonância do *patch*. Nota-se que nenhuma tendência de comportamento pode ser verificada. Diferentemente do que observado na Figura 30, a

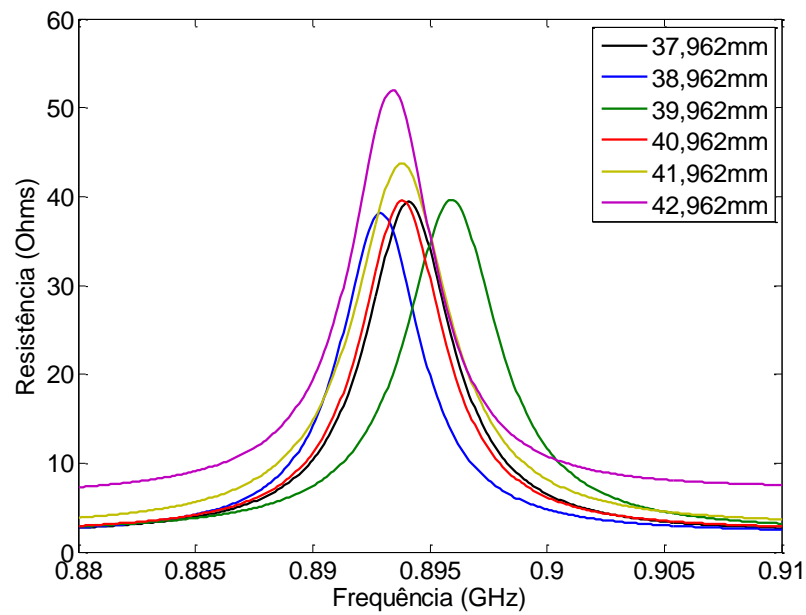
Figura 31 apresenta um aumento da reatância referente à ressonância do *patch* com o aumento da largura do *loop*.

Figura 29 – Efeito do aumento da largura do *loop* sobre as ressonâncias.



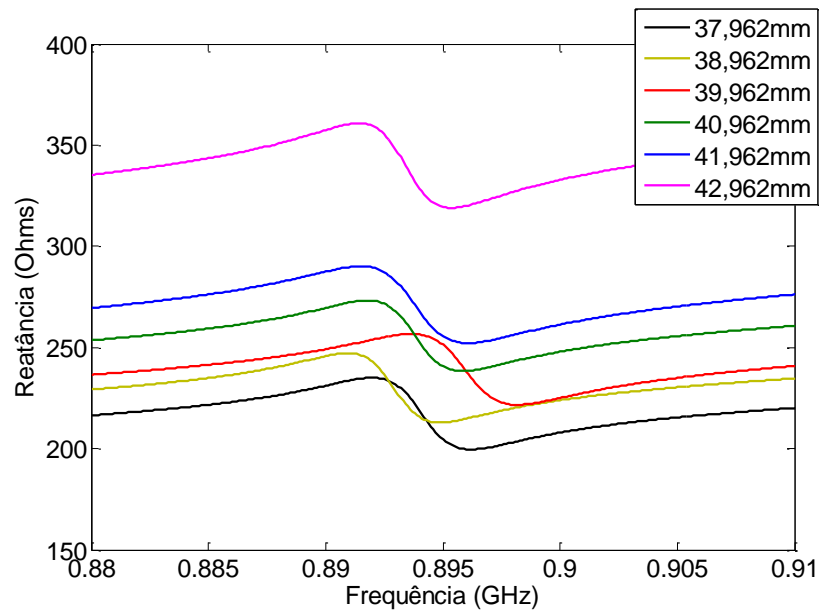
Fonte: Autor (2017).

Figura 30 – Efeito do aumento da largura do *loop* na resistência referente à ressonância do *patch*.



Fonte: Autor(2017).

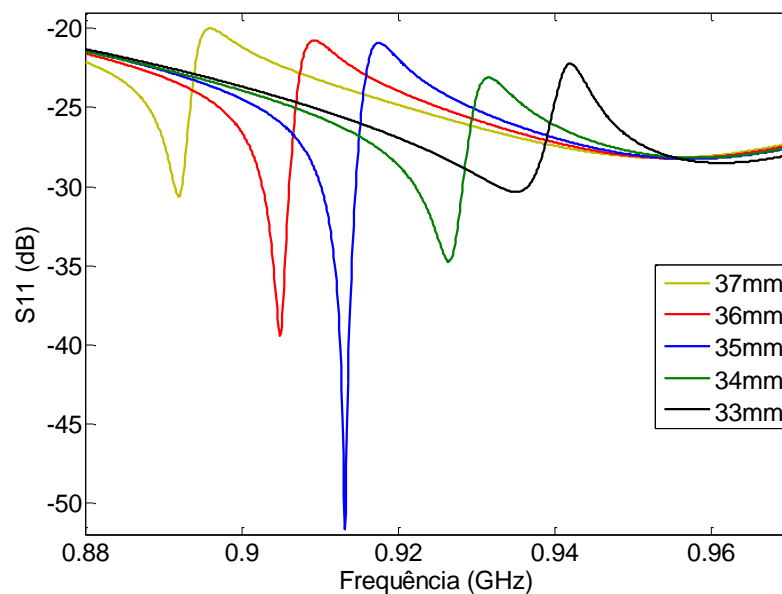
Figura 31 – Aumento da reatância referente à ressonância do *patch* com o aumento da largura do *loop*.



Fonte: Autor(2017).

- **Largura do Patch:** O aumento da largura do Patch leva a uma diminuição dos valores da frequência de ressonância para ambos os elementos ressonantes. Apesar de não modificar geometricamente o loop, a proximidade da ressonância do Patch exerce um efeito sobre o pico do loop e o faz se deslocar. A Figura 32 ilustra este fenômeno.

Figura 32 – Variação da largura do patch e seu efeito sobre as ressonâncias.

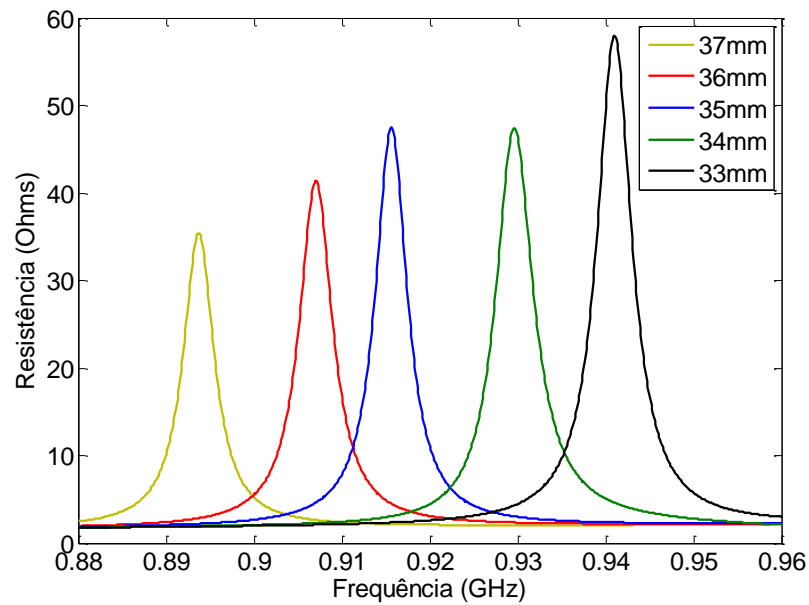


Fonte: Autor (2017).

Pode ser verificado também, Figura 34, um aumento da reatância do pico de ressonância referente ao Patch com a aproximação dos picos ressonantes. Comprovando que a medida

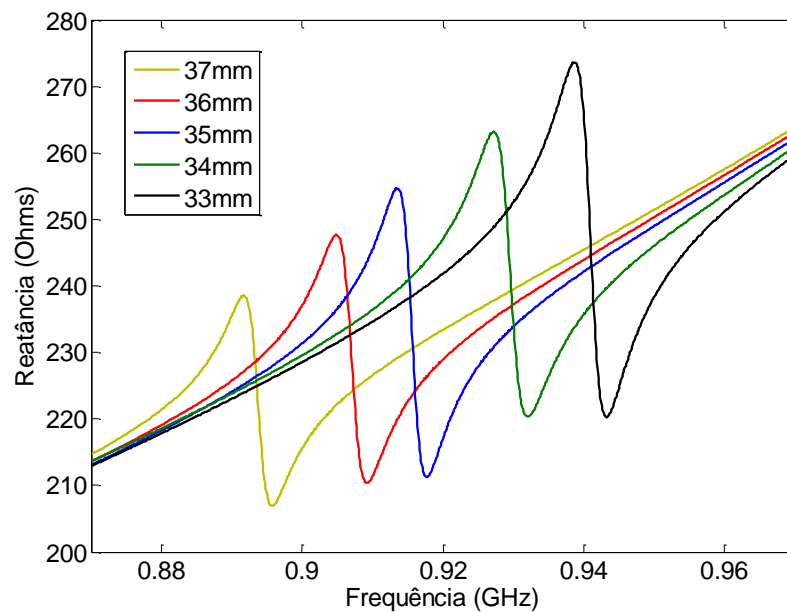
que quanto mais próximos estão as ressonâncias do loop e do patch maior reatância observada. O aumento da resistência com a redução da largura pode ser verificado na Figura 33. É importante salientar que devido ao efeito de Poisson, o sensor ao sofrer deformação, irá reduzir as dimensões da largura do patch e assim gerará uma aumento da frequência de ressonância. Este resultado diminui a sensibilidade do sensor.

Figura 33 – Efeito da variação da largura do Patch sob a resistência da ressonância do patch.



Fonte: Autor(2017).

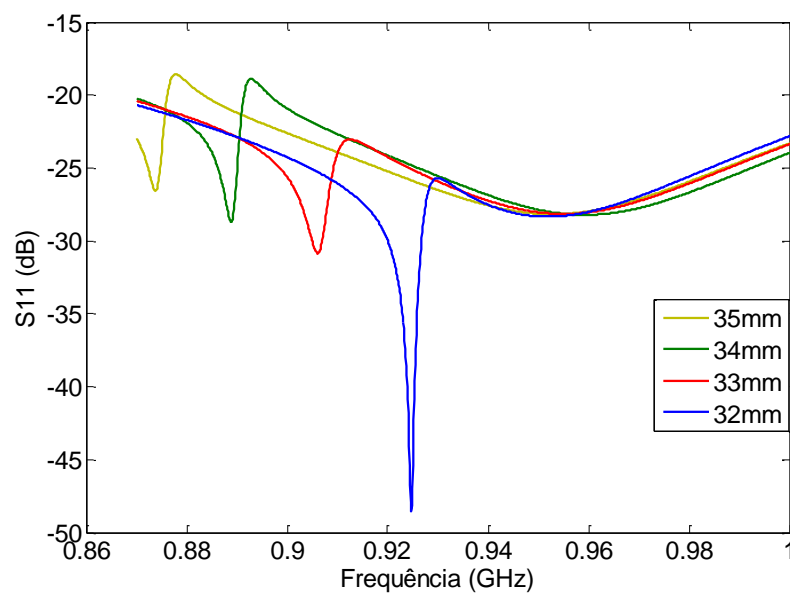
Figura 34 - Efeito da variação da largura do Patch sob a reatância da ressonância do patch.



Fonte: Autor (2017)

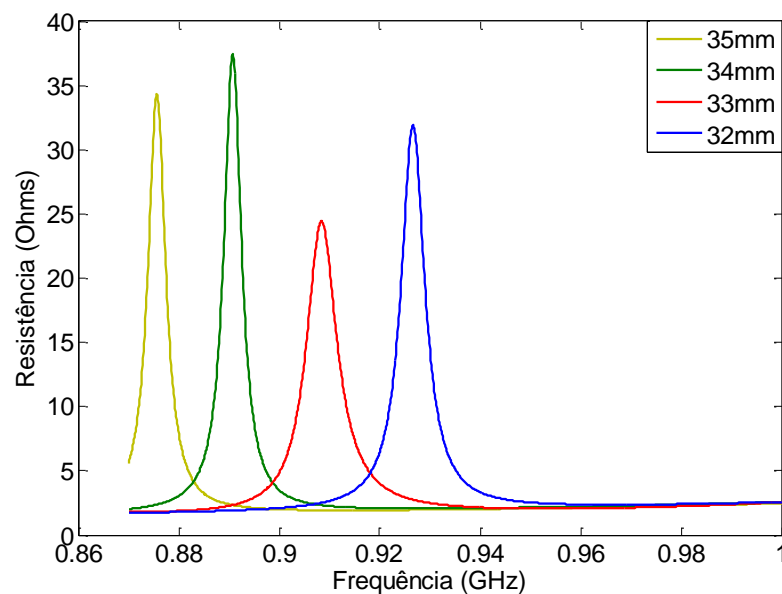
- Comprimento do Patch: O elemento com maior destaque do sensor, responsável pelas maiores variações da resposta. Através da Figura 35 pode ser verificado que o aumento de suas dimensões acarreta em uma redução da frequência de ressonância referente ao Patch. Já para a ressonância do Loop nenhuma tendência pode ser verificada. A reatância reduz à medida que o a ressonância do patch se afasta da ressonância do loop, Figura 37. Valores sem tendência foram verificados para a resistência, Figura 36.

Figura 35 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre as ressonâncias.



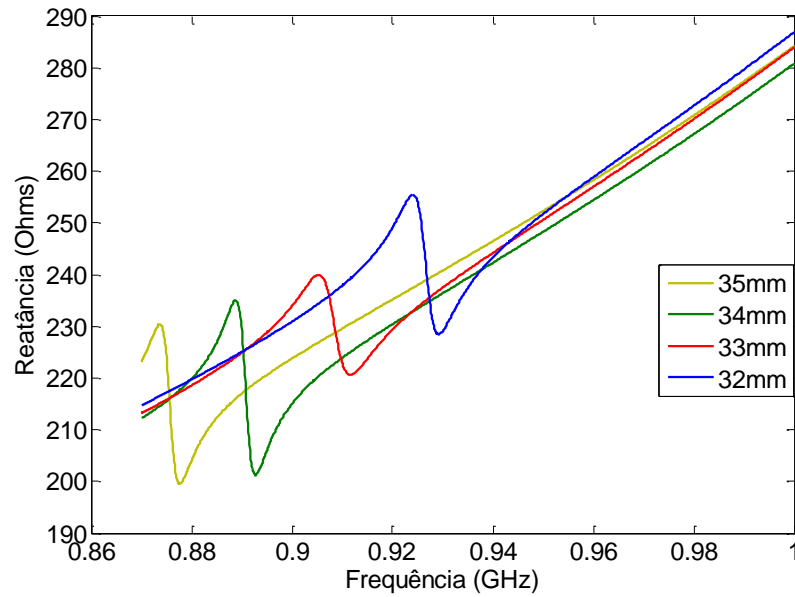
Fonte: Autor (2017).

Figura 36 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre a resistência da ressonância do patch.



Fonte: Autor (2017).

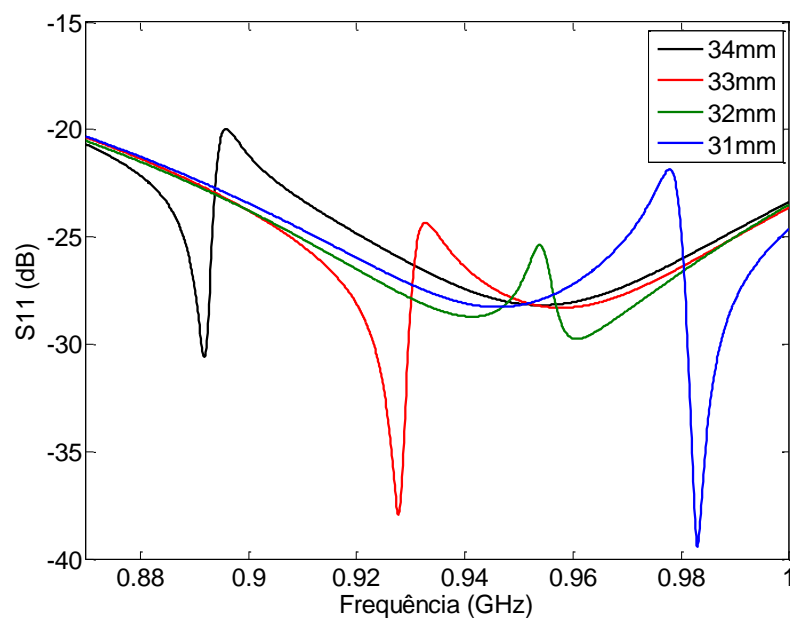
Figura 37 - Variação do comprimento do patch e seu efeito sobre a reatância da ressonância do patch.



Fonte: Autor (2017).

- Posição das vias: O posicionamento das vias é o elemento chave no desenvolvimento desta antena. A Figura 38 apresenta o efeito da posição da via referente ao centro da antena na direção de seu comprimento, nota-se que à medida a distância aumento a frequência de ressonância se deslocada para valores menores.

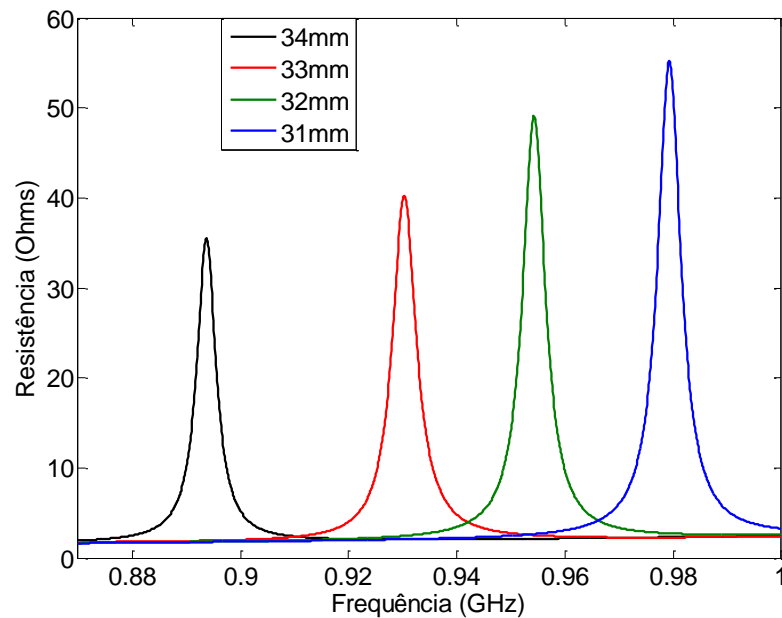
Figura 38 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre as ressonâncias.



Fonte: Autor (2017).

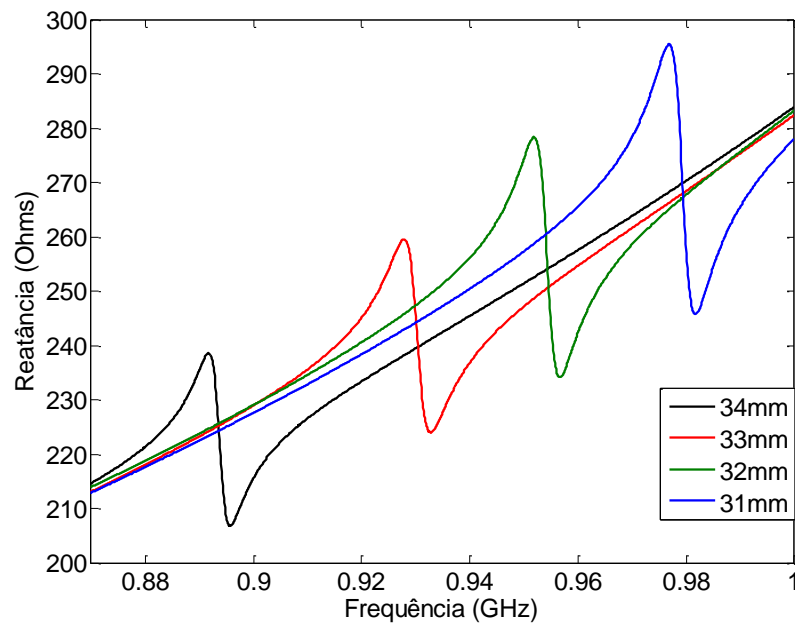
Menores valores de resistência e reatância podem ser observados com aumento da distância do centro, Figura 39 e Figura 40 respectivamente. Já para a direção de sua largura, nota-se também, que o aumento da distância do centro acarreta em uma redução da frequência de ressonância, Figura 41. Redução nos valores de resistência e reatância podem ser visualizados nas Figuras 42 e 43 respectivamente.

Figura 39 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre a resistência.



Fonte: Autor (2017).

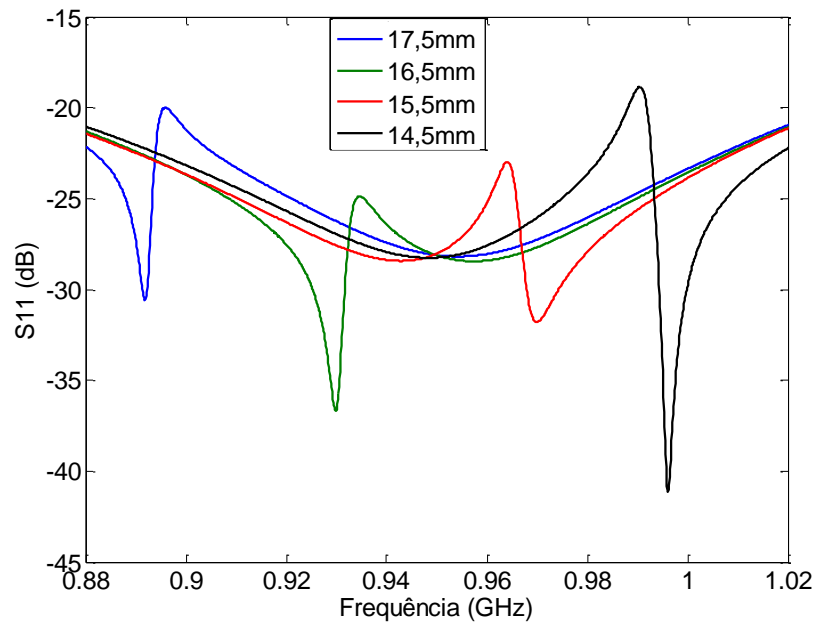
Figura 40 – Efeito do deslocamento da via, ao longo do comprimento do patch, sobre a reatância.



Fonte: Autor (2017).

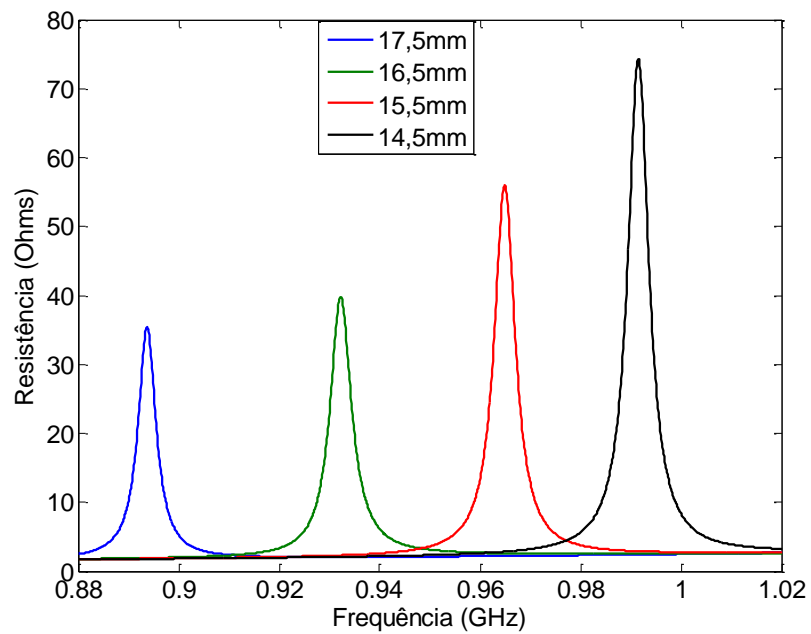


Figura 41 - Efeito do deslocamento da via, na direção da largura do patch, sobre as ressonâncias.



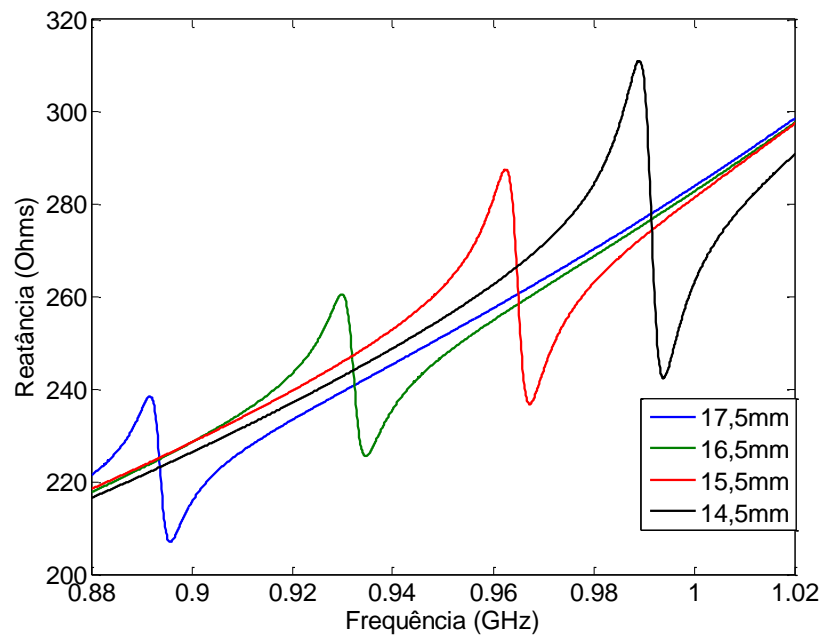
Fonte: Autor (2017).

Figura 42 – Efeito do deslocamento da via, na direção da largura, sobre a resistência.



Fonte: Autor (2017).

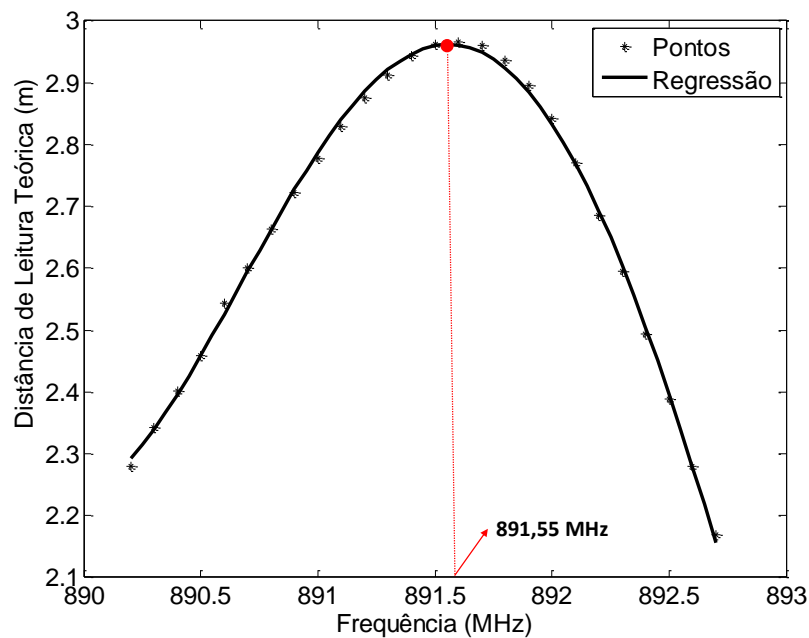
Figura 43 – Efeito do deslocamento da via, na direção da largura do patch, sobre a reatância.



Fonte: Autor (2017).

Para a análise realizada através do software COMSOL, seguindo a metodologia descrita no capítulo anterior, foram obtidas as curvas de regressão da Máxima Distância de Leitura Teórica em função da Frequência para os deslocamentos propostos. A Figura 44 apresenta a curva citada acima para o valor de deslocamento de 0 mm, para este deslocamento foi obtido uma frequência de ressonância de 891,55 MHz. Valor muito próximo ao obtido no HFSS, 891,8 MHz.

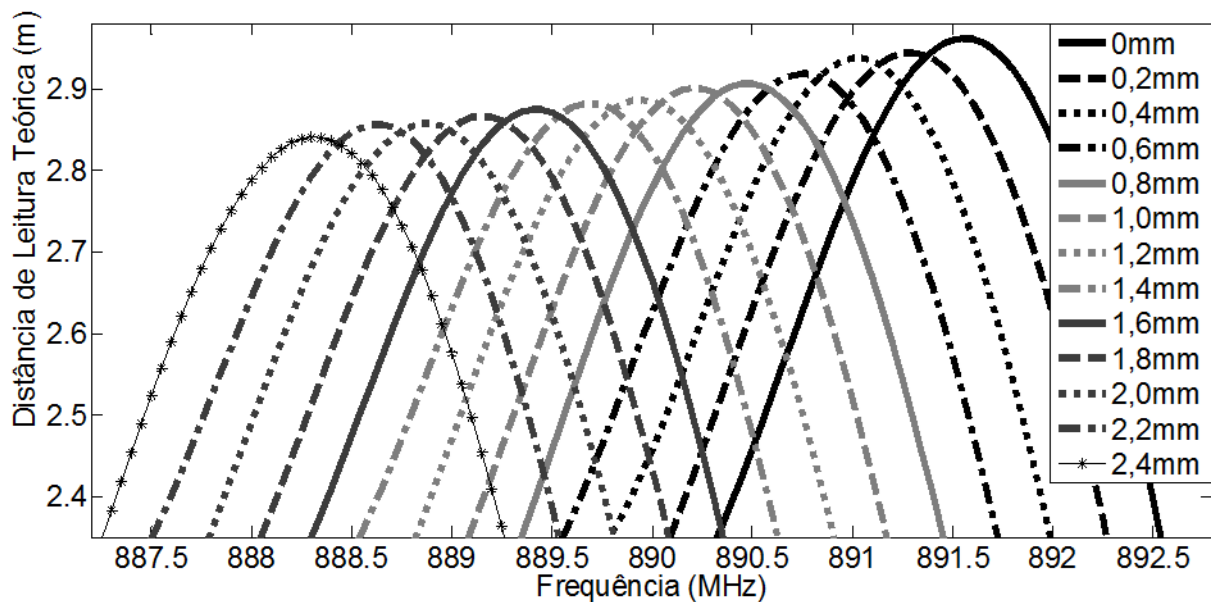
Figura 44 – Resultado da simulação no COMSOL para 0 de deslocamento aplicado ao sensor.



Fonte: Autor (2017).

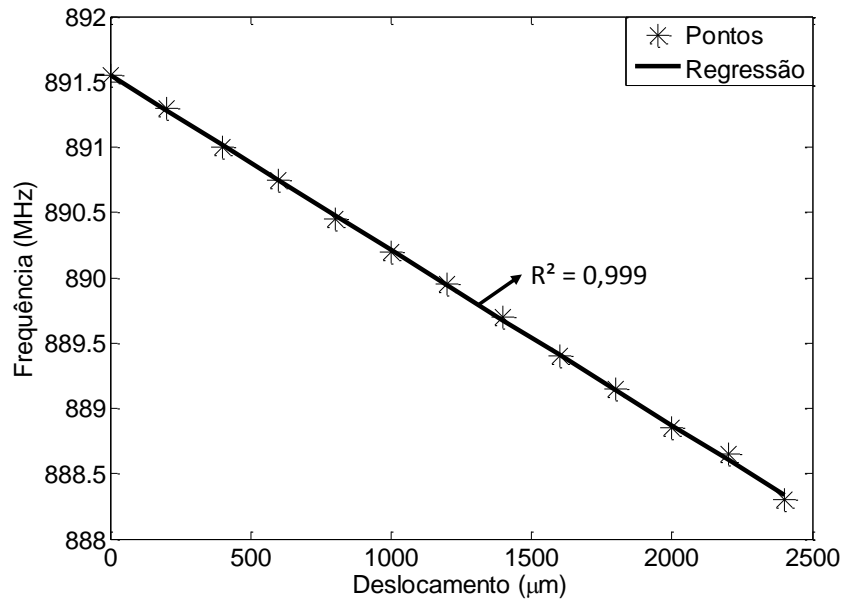
Dessa forma, para cada deslocamento aplicado foi obtida uma curva de regressão e um valor de frequência de ressonância. A Figura 45 apresenta as curvas de regressão para cada deslocamento aplicado. Pode ser visualizado que com a ocorrência de maiores deslocamentos as curvas estão se deslocando para menores frequências.

Figura 45 – Curvas de Regressão para cada deslocamento aplicado sensor I Simulação.



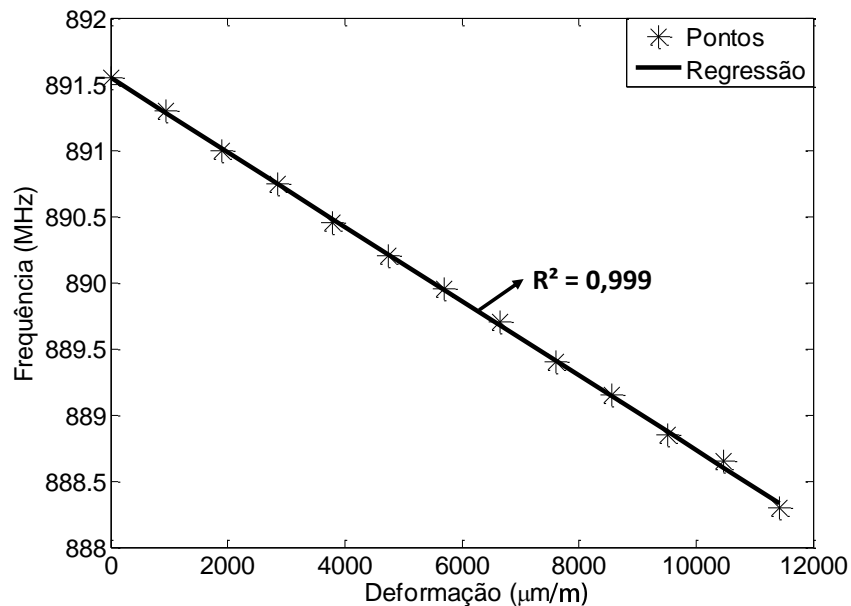
Após obtido todos os valores de frequência de ressonância para cada deslocamento, estes valores foram correlacionados através de uma regressão linear simples, como mostra a Figura 46. De maneira análoga a Figura 47 correlaciona a frequência com a deformação. As duas regressões obtiveram altos valores do coeficiente de determinação, podendo ser aproximados a 1. Assim pelas simulações pode se afirmar a existência de linearidade entre frequência de ressonância e deformação.

Figura 46 – Regressão linear simples para os deslocamentos Sensor I Simulação.



Fonte: Autor (2017).

Figura 47 – Regressão Linear Simples para as deformações Sensor I Simulação.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 46.

As hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtido foi de  $1,48E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas,

uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 2,81 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deslocamento é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 47.

De maneira análoga ao realizado acima, as hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $1,40E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas, uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 2,81 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deformação é válida.

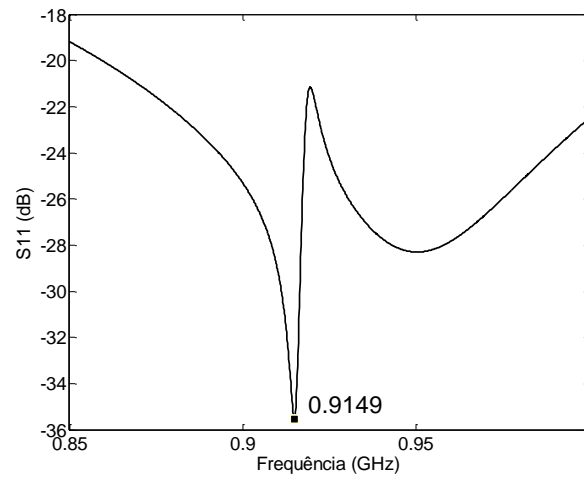
#### 4.1.2 Sensor II

Como escrito anteriormente na metodologia, foram realizadas modificações nas dimensões das regiões salientadas com a finalidade de obter o deslocamento da frequência de ressonância para 915 MHz. Outro resultado esperado é uma redução na largura de banda, uma vez que o fator de qualidade total aumenta, devido ao aumento das perdas por condução e perdas por radiação ocasionados pelo aumento da frequência.

Para o Sensor II foram obtidos os seguintes resultados referente à análise no software HFSS:

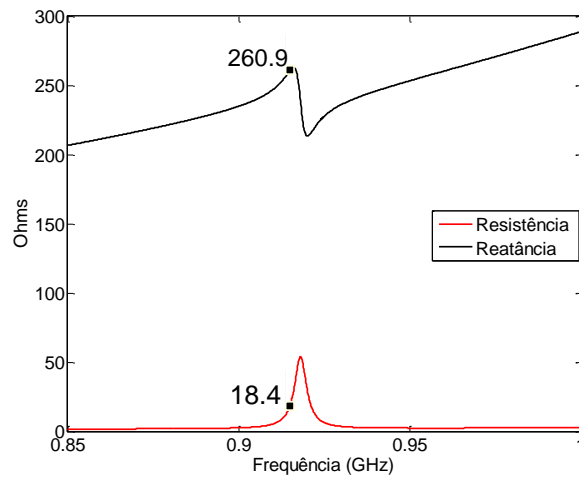
- Frequência de Ressonância: O valor de frequência de ressonância obtido foi de 914,9 MHz. Este valor pode ser observado na Figura 48, também pode ser visualizada, igualmente ao sensor I, a presença de duas frequências de ressonância. A frequência de ressonância na qual está o marcador se refere ao *Patch* da antena e a frequência de ressonância mais à direita ao *Loop* da antena.
- Impedância: Para a frequência de 914,9 MHz foi observado um valor de impedância de  $18,4 + 260,9j$  ohms, conforme ilustra a Figura 49.
- Ganho: Conforme Figura 50 apresenta, foi observado um ganho com o valor máximo de -6,355 dB na direção de Z, para a frequência de 914,9 MHz.

Figura 48 - Frequência de ressonância simulada para sensor II.



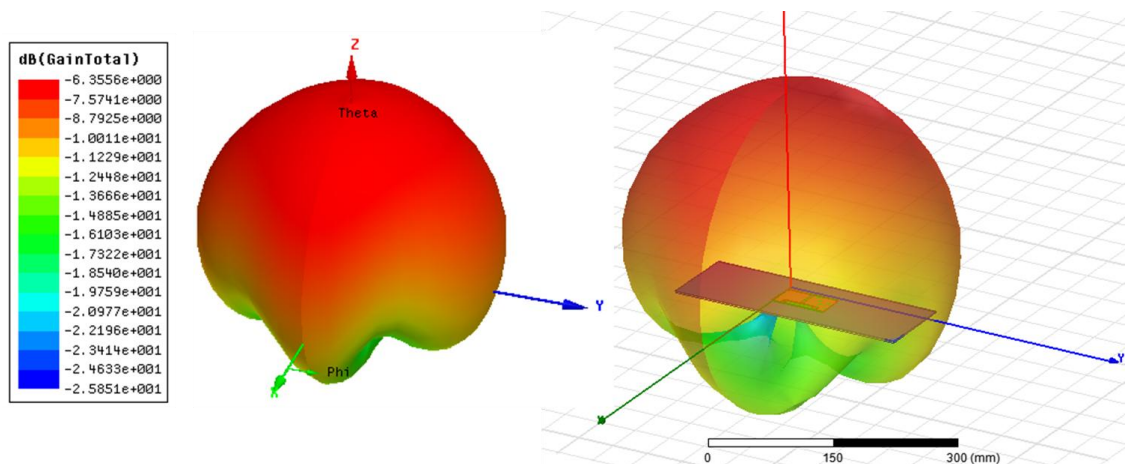
Fonte: Autor (2017).

Figura 49 – Impedância sensor II simulação.



Fonte: Autor (2017).

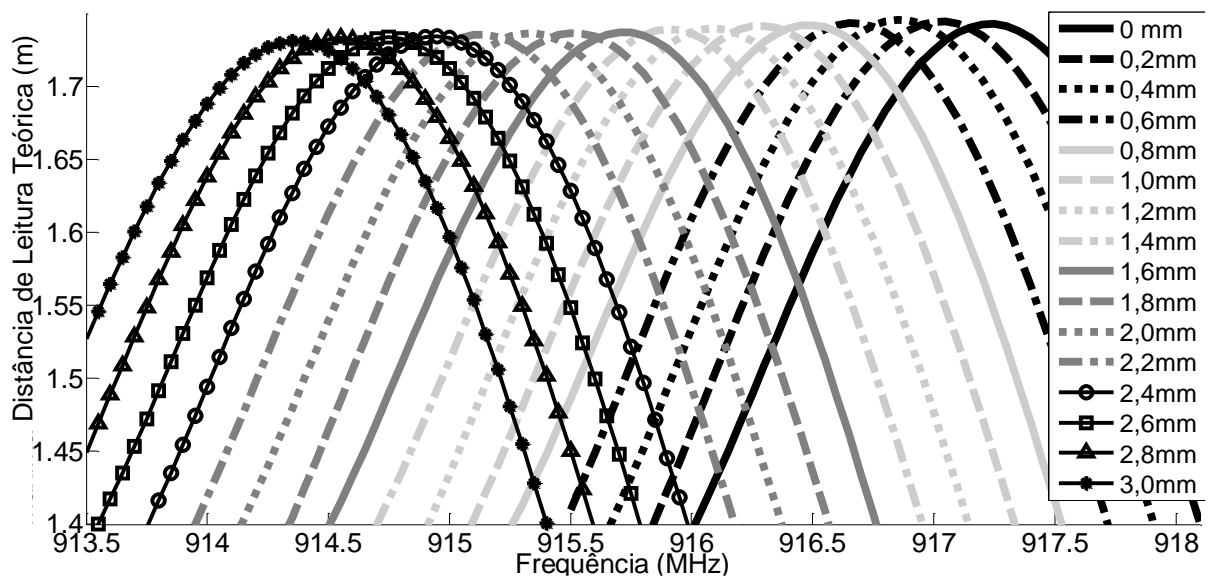
Figura 50 – Diagrama de Radiação e Ganho sensor II.



Fonte: Autor (2017).

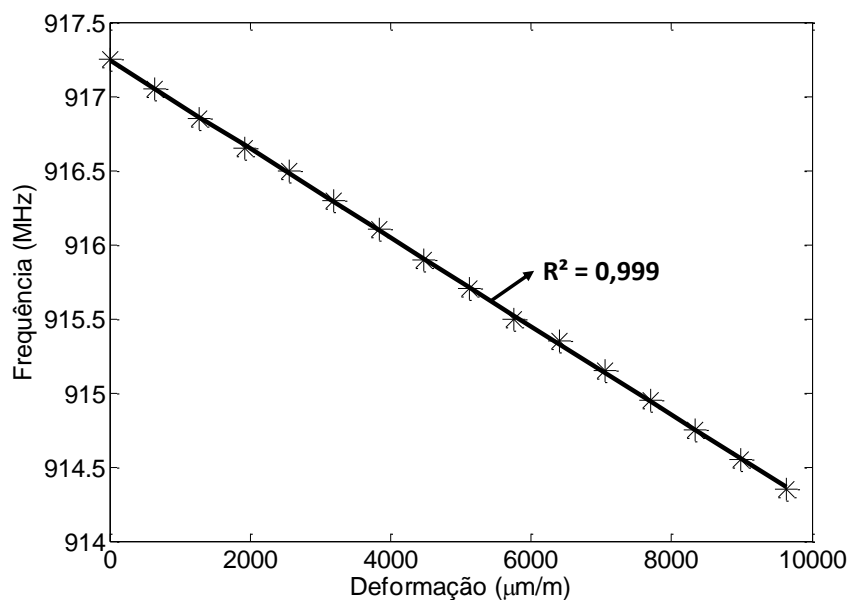
Analogamente ao sensor I, foram obtidos dos dados de regressão e frequência de ressonância. A Figura 51 apresenta o comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado. O valor de frequência de ressonância obtido no software COMSOL para a condição de zero de deslocamento foi de 917,25 MHz. Valores bem próximos foram obtidos com os dois softwares. Assim, com a obtenção de todos os valores de frequência de ressonância para os deslocamento aplicados, foi realizada uma correlação, através de uma regressão linear simples, da frequência e do deslocamento, como mostra a Figura 52. De mesma forma, a Figura 53 correlaciona a frequência com a deformação.

Figura 51 – Comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado sensor II.



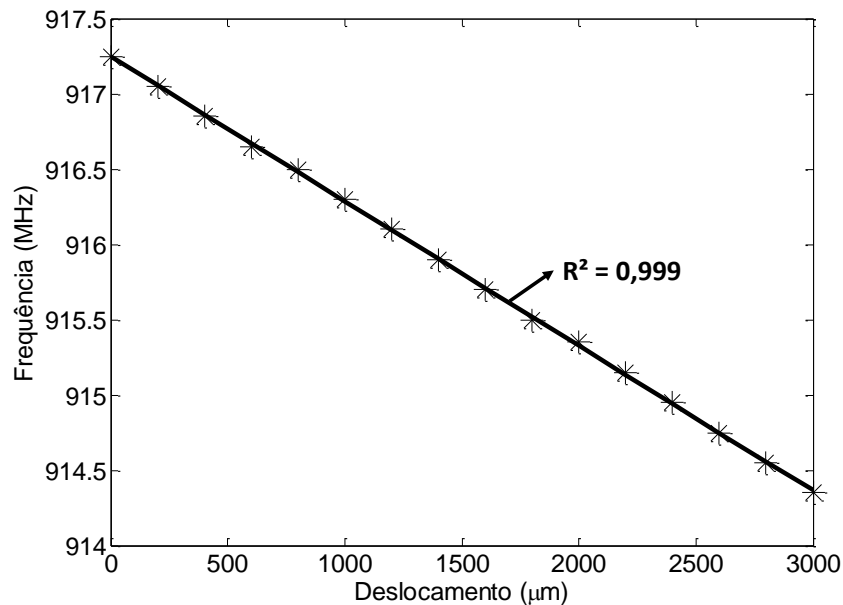
Fonte: Autor (2017).

Figura 52 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II simulação.



Fonte: Autor (2017).

Figura 53 – Regressão linear simples para as deformações sensor II simulação.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 52.

As hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-7,1E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas, uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,58 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 53.

De maneira análoga ao realizado acima, as hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-9,23E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas, uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,48 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deformação é válida.



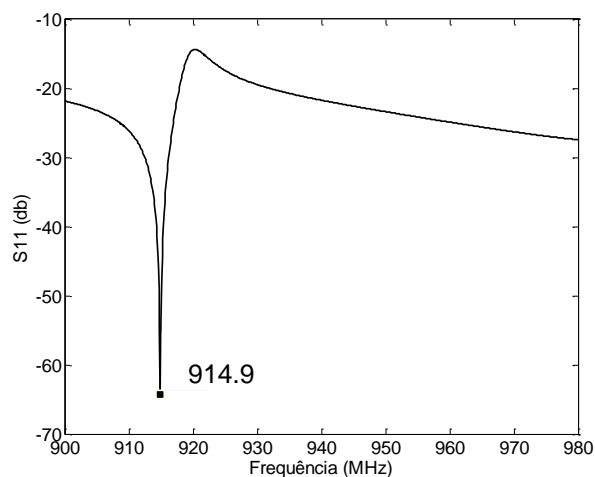
### 4.1.3 Sensor III

Como mostrado anteriormente metodologia, foram realizadas modificações nas dimensões das regiões salientadas com a finalidade de aumentar sensibilidade do sensor. Foi modificado principalmente o comprimento do *patch* e a largura do *patch*, uma vez que com aumento do comprimento do patch, o sensor ao sofrer deformação, gera um maior deslocamento de seus pontos, levando a uma maior variação de seu comprimento na direção da solicitação e uma maior diminuição da frequência. A redução da largura do patch contribuí diminuindo o efeito causado pela contração do sensor no sentido transversal. Este efeito gera um aumento da frequência de ressonância e uma redução da sensibilidade do sensor.

Para o Modelo III foram obtidos os seguintes resultados referente à análise no software HFSS:

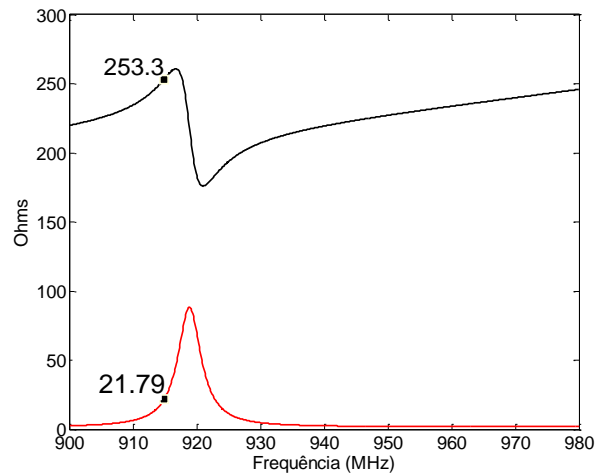
- Frequência de Ressonância: O valor de frequência de ressonância obtido foi de 914,9 MHz. Este valor pode ser observado na Figura 54. A frequência de ressonância na qual está o marcador se refere ao *Patch* da antena.
- Impedância: Para a frequência de 914,9 MHz foi observado um valor de impedância de  $21,8 + 253,3j$  ohms, conforme ilustra a Figura 55.
- Ganho: Conforme Figura 56 apresenta, foi observado um ganho com o valor máximo de -4,639 dB na direção de Z, para a frequência de 914,9 MHz.

Figura 54 - Frequência de ressonância simulada para sensor III.



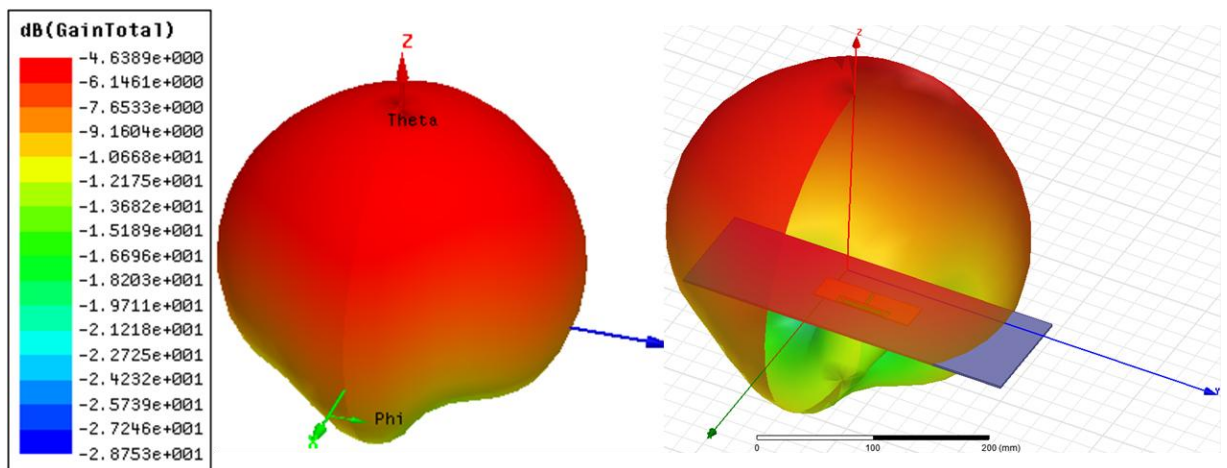
Fonte: Autor (2017).

Figura 55 – Impedância sensor III simulação.



Fonte: Autor (2017).

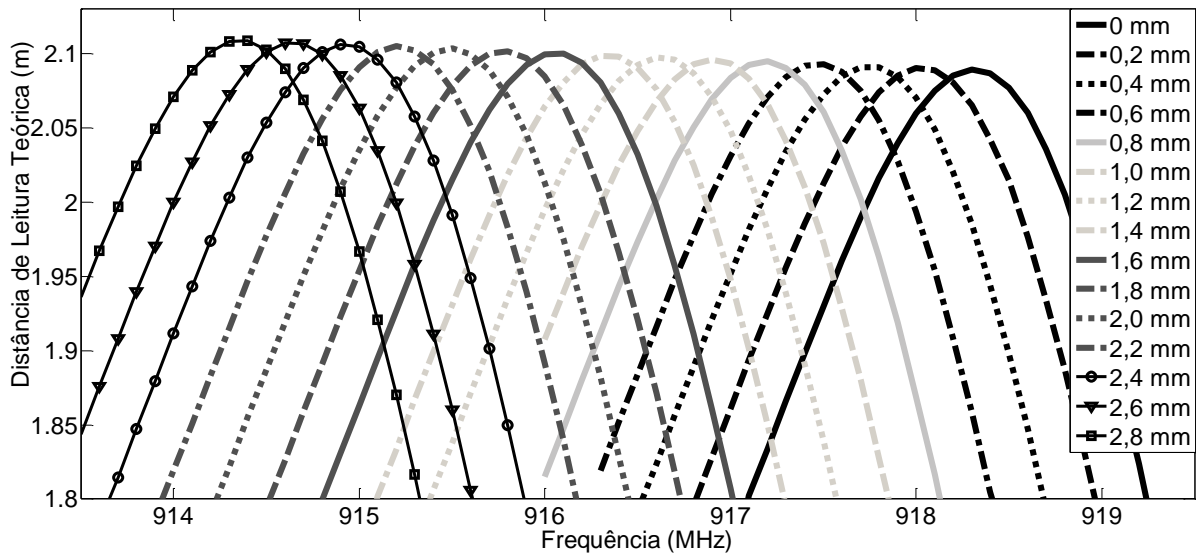
Figura 56 – Diagrama de Radiação e Ganho sensor III simulação.



Fonte: Autor (2017).

Analogamente ao modelos anteriores, foram obtidos dos dados de regressão e frequência de ressonância. A Figura 57 apresenta o comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado. O valor de frequência de ressonância obtido no software COMSOL para a condição de zero de deslocamento foi de 918,25 MHz. Valores bem próximos foram obtidos com os dois softwares.

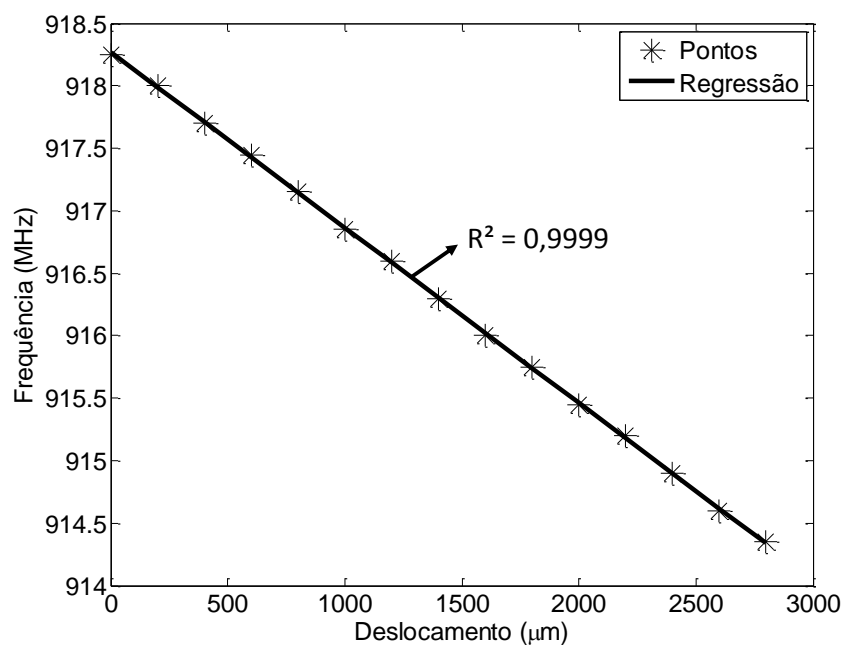
Figura 57 – Comportamento das curvas de regressão para cada deslocamento aplicado sensor III.



Fonte: Autor (2017).

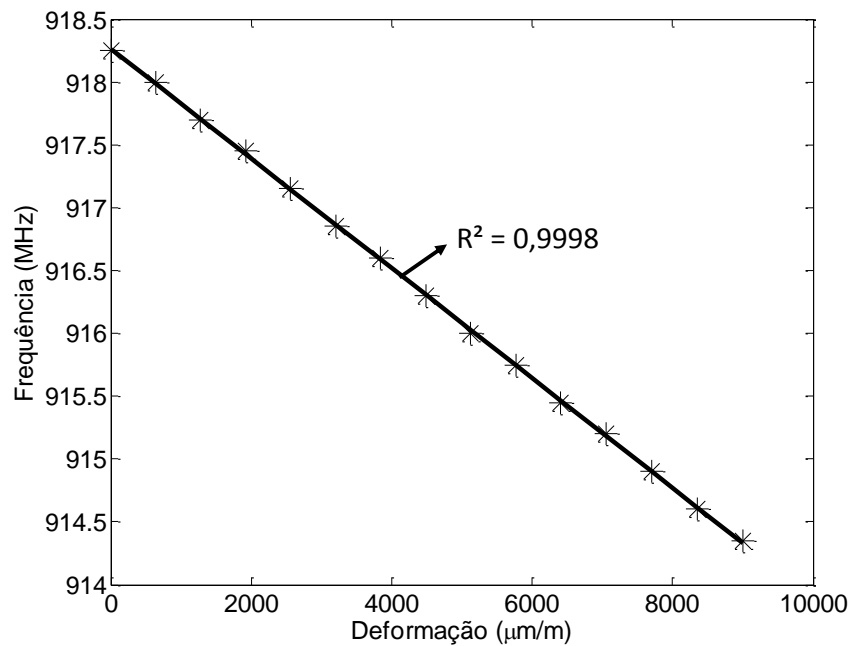
Assim, com a obtenção de todos os valores de frequência de ressonância para os deslocamentos aplicados, foi realizada uma correlação, através de uma regressão linear simples, da frequência e do deslocamento, como mostra a Figura 58. De mesma forma, a Figura 59 correlaciona a frequência com a deformação. Ambas se comportaram de forma linear, podendo ser representados através de uma equação de uma reta.

Figura 58 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III simulação.



Fonte: Autor (2017).

Figura 59 – Regressão linear simples para as deformações sensor III simulação.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 58.

As hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-8,3E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas, uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 2,70 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 59.

De maneira análoga ao realizado acima, as hipóteses I, II descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-9,8E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. Como os dados se tratam de uma simulação numérica, as hipóteses IV e VI, não são violadas, uma vez que não ocorre variância no resultado obtido e conseqüentemente no erro. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 2,57 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deformação é válida.

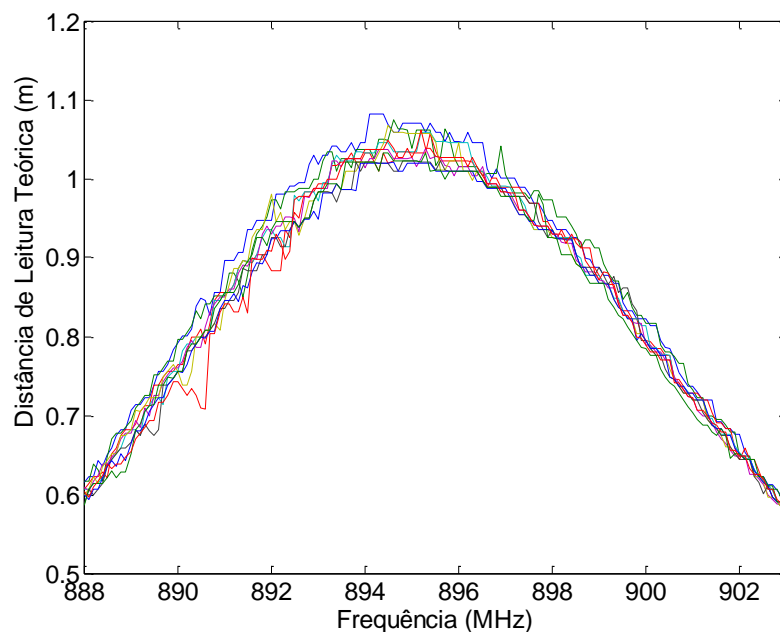
## 4.2 Ensaio Experimental

Para os modelos anteriormente descritos, procedimentos experimentais foram realizados com a intenção de verificar a validade das simulações e da proposta deste trabalho. O resultados são apresentados abaixo.

### 4.2.1 Sensor I

Para o sensor I foi realizado apenas o ensaio de 1 sensor, visto que este sensor não estava de acordo com a proposta do trabalho. Os resultados coletados diretamente do equipamento podem ser visualizados na Figura 60. Esta figura justifica o uso de uma regressão para obtenção do valor de frequência de ressonância, uma vez que mais de um ponto pode ser o máximo da curva obtida no equipamento. Para o sensor I, com zero de deslocamento, após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 895,17 MHz. Valor de frequência próximo ao valor obtido através de simulação 891,8 MHz.

Figura 60 – Resultados experimentais modelo I, zero de deslocamento.

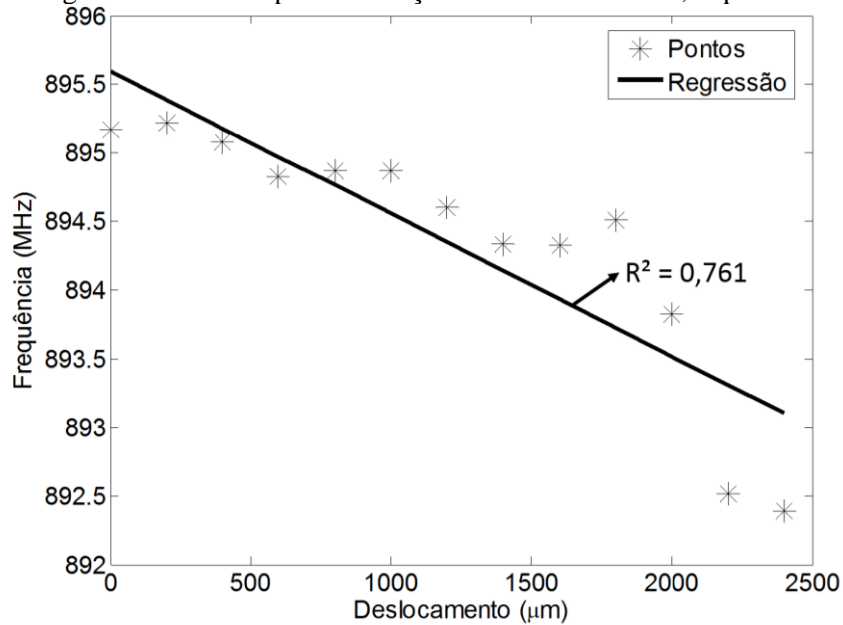


Fonte: Autor (2017).

Assim realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 61, pode ser afirmado que o sensor reduz sua frequência com o aumento dos deslocamentos aplicados. Porém uma tendência linear não pode ser atribuída ao comportamento deste sensor, uma vez que o valor de 0,761 para o coeficiente de determinação expressa a incapacidade de uma reta representar o volume total dos dados utilizados na

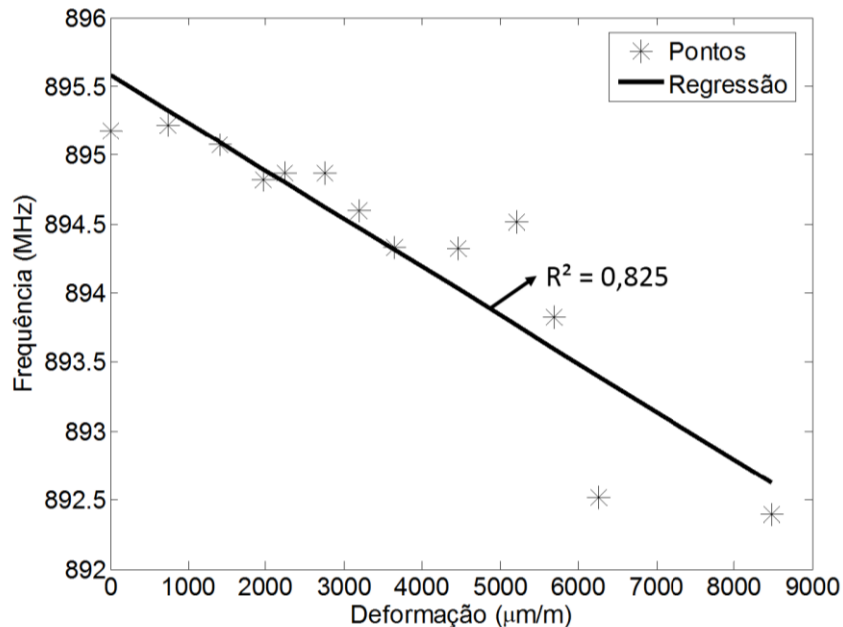
regressão. A regressão linear simples realizada com os dados de deformação, Figura 62 apresentou um melhora na tendência linear, um coeficiente de determinação com o valor de 0,825. Entretanto, também não pode ser atribuído uma tendência linear para este sensor. Resultados semelhantes podem ser encontrados em SANG-DONG, BYUNG-WOO e JAEHWAN (2013); DALIRI, GALEHDAR, *et al.*, (2012); SANG-DONG e JAEHWAN, (2012). Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados no APÊNDICE A. A Figura 66 apresenta as amplitudes dessas medidas.

Figura 61 – Regressão linear simples em função dos deslocamentos, experimental, sensor I.



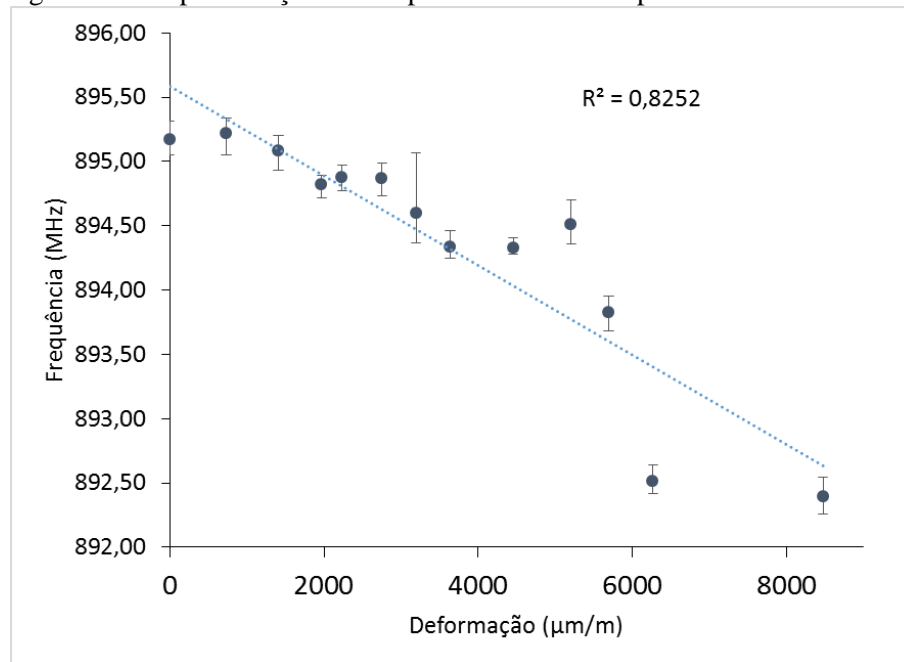
Fonte: Autor (2017).

Figura 62 – Regressão linear simples em função das deformações, experimental, sensor I.



Fonte: Autor (2017).

Figura 63 – Representação das amplitudes de medida para cada deslocamento.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 61.

As hipóteses I, II e IV descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $3,49E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 0,39 mostrando a existência de correlação entre os resíduos, rejeitando a suposição desta hipótese. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,88$  ou seja, os erros possuem distribuição normal. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deslocamento não é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 62.

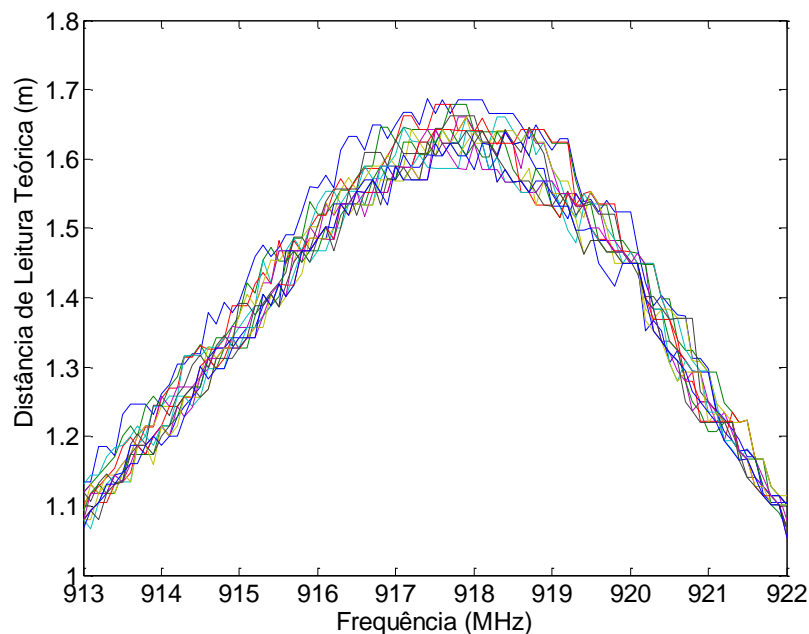
De maneira análoga a análise acima, as hipóteses I, II, IV descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-6,1E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 0,83 mostrando a existência de correlação entre os resíduos, rejeitando a suposição desta hipótese. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,89$ , ou seja, os erros possuem distribuição normal. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação não pode ser validada.

#### 4.2.2 Modelo II

Conforme citado na metodologia, três sensores foram ensaiados, estes foram nomeados como II-A, II-B, II-C e serão apresentados a seguir.

**Sensor II-A:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 64. Para este sensor, com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 917,66 MHz. Valor bem próximo da frequência almejada neste trabalho, 915 MHz, e bem próximo ao simulado, 917,25 MHz. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados na APÊNDICE B. Dessa forma, realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 65, fica visível que o sensor reduz sua frequência com o aumento dos deslocamentos aplicados. Uma tendência linear pode ser atribuída ao comportamento deste sensor, já que um alto valor do coeficiente de determinação, cujo valor foi de 0,961, ou seja, 96,1 % dos dados atribuídos pelos pontos podem ser representados pela regressão. A regressão linear simples realizada com os dados de deformação, Figura 66, apresentou um maior tendência linear, um coeficiente de determinação com o valor de 0,971. Também podendo ser atribuído um comportamento linear a este sensor. Comportamentos lineares podem ser observados em diversos outros trabalhos. (TATA e DESHMUKH, 2009) (LANTZ, 2011) (WANG, LIU e GE, 2015) (TATA, HUANG e CARTER, 2009) (YI, 2014).. A Figura 67 apresenta as amplitudes das medidas.

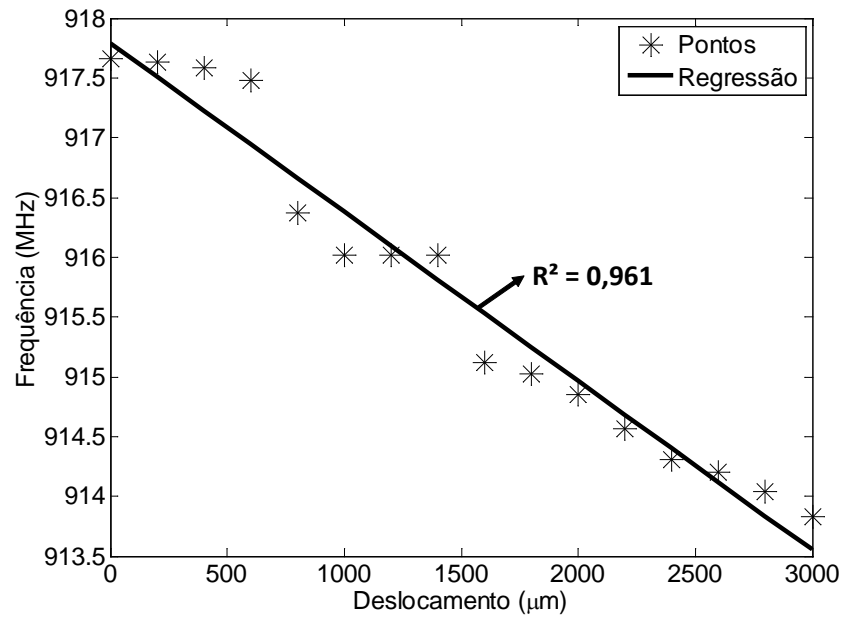
Figura 64 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-A.



Fonte: Autor (2017).

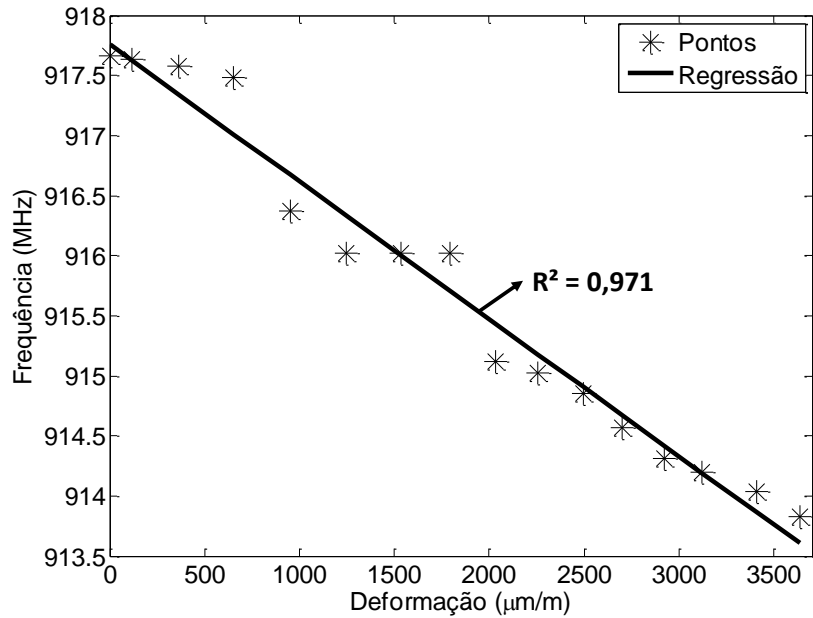


Figura 65 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-A experimental.



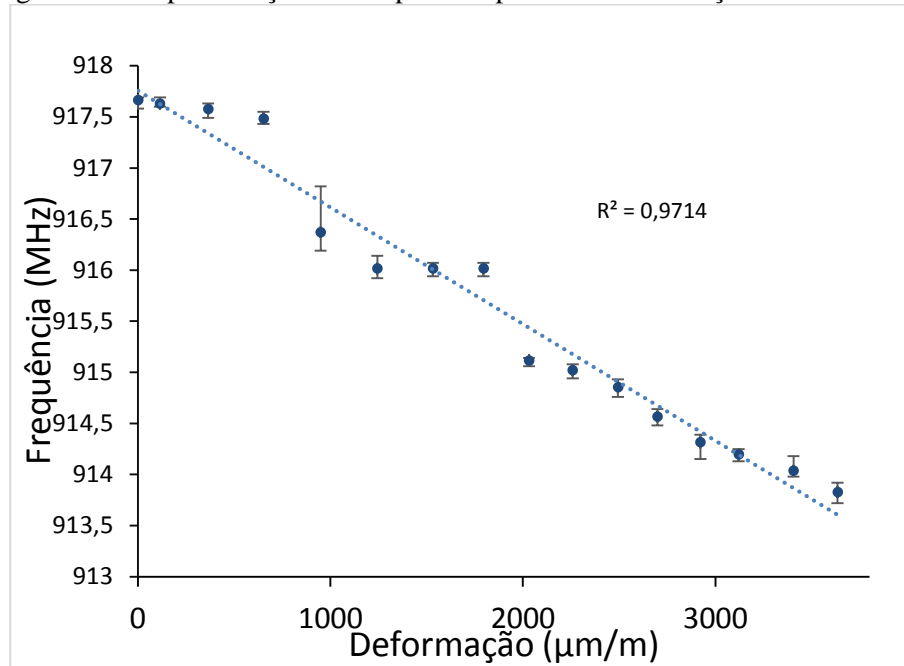
Fonte: Autor (2017).

Figura 66 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-A experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 67 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-A.

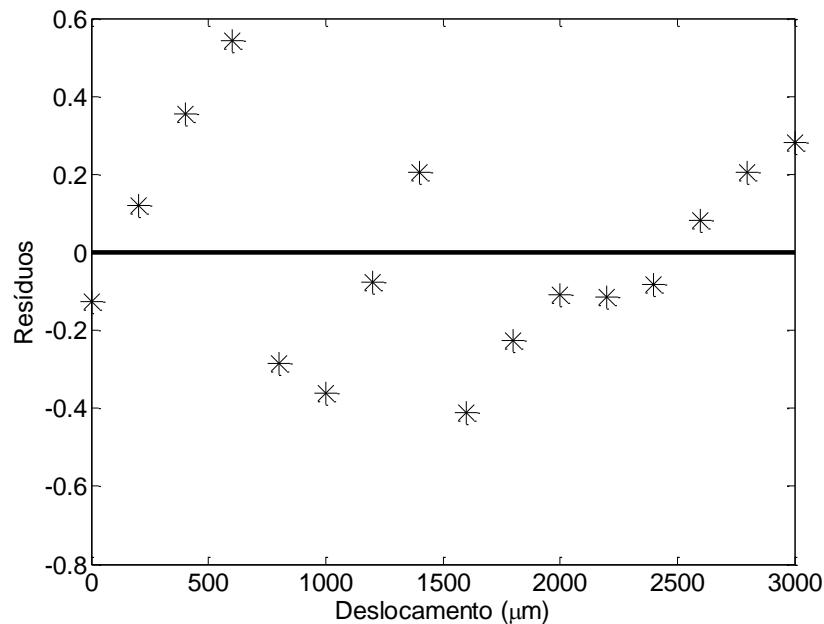


Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 65.

As hipóteses I, II e IV são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-1,56E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,36 não podendo afirmar se existe auto correlação entre os resíduos, assim foi utilizado o método de análise de gráfica dos resíduos. A Figura 59 apresenta os resíduos em função da variável deslocamento. Nota-se que os resíduos não possuem nenhum tipo de tendência no seu conjunto de dados. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,97$  ou seja, os erros possuem distribuição normal. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deslocamento é válida.

Figura 68 – Resíduos obtidos em função do deslocamento sensor II-A.



Fonte: Autor (2017).

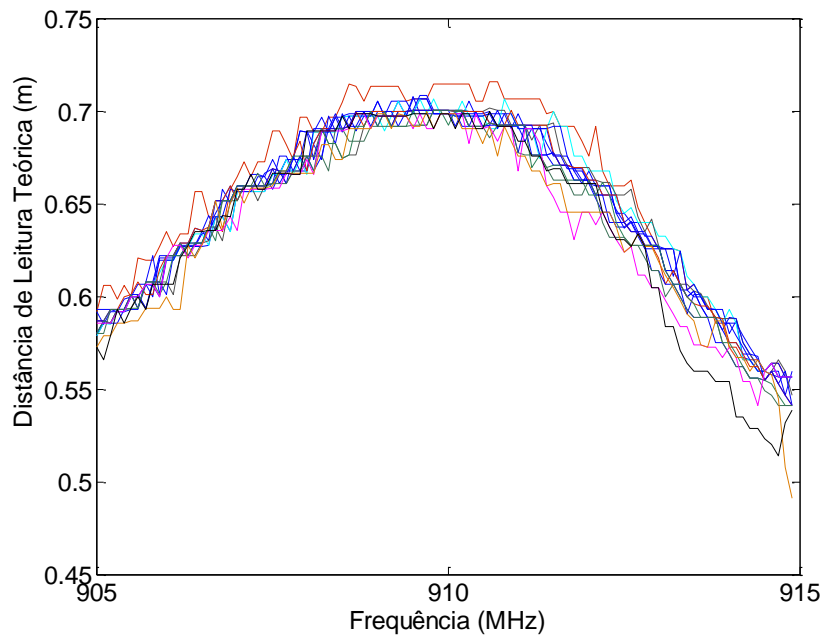
- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 66.

As hipóteses I, II, IV são assumidas. O valor da média dos erros obtido foi  $-7,1E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,72 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,95$ , ou seja, os erros possuem distribuição normal. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação pode ser validada.

**Sensor II-B:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 69. Para este sensor, com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 909,68 MHz. Valor diferente do encontrado na simulação e no sensor II-a. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados no APÊNDICE C. Realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 70, inicialmente o sensor se comporta com tendência linear reduzindo sua frequência à medida que os deslocamentos aumentam, porém a partir de 1,6mm de deslocamento, começa a ocorrer aumento da frequência de ressonância. Para a regressão utilizando os dados de deformação, Figura 71 se observou o mesmo tipo de variação. Assim tendências lineares não podem ser atribuídas a este sensor. O coeficiente de determinação para ambos os casos apresentou baixos valores, 0,0847 para a regressão com deslocamentos e 0,1463

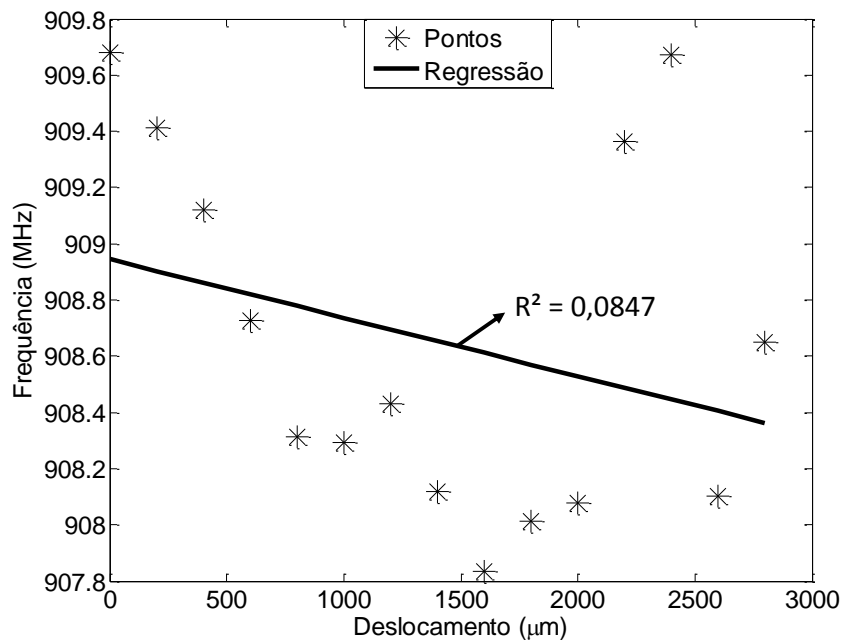
para a regressão das deformações. Dessa forma a equação gerada por esta regressão não pode representar estes dados. Não foi realizado estudo referente ao modelo de regressão linear simples, já que nitidamente o comportamento não é linear. A Figura 72 apresenta as amplitudes medidas observadas, nota-se uma maior amplitude se comparado ao sensor II-a em todos os pontos coletados.

Figura 69 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-B.



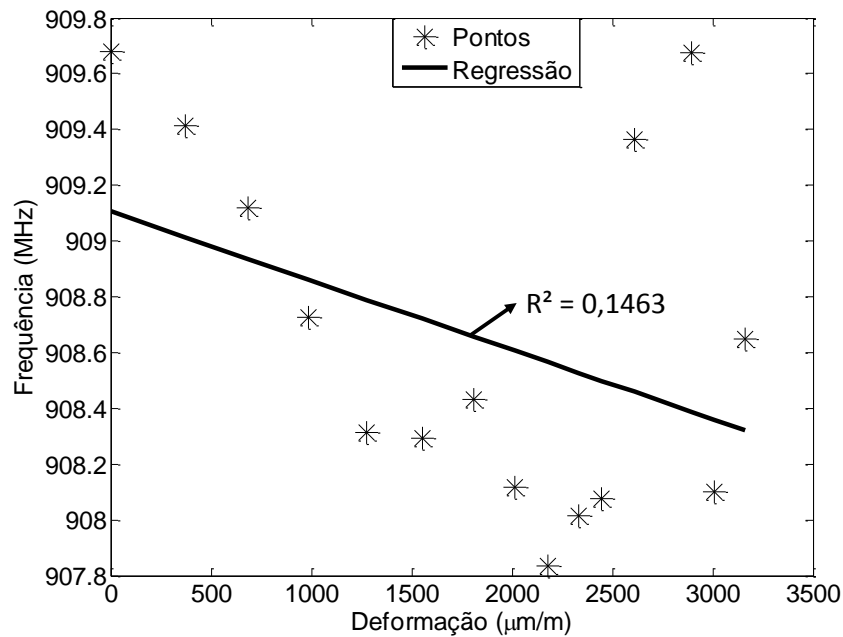
Fonte: Autor (2017).

Figura 70 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-B experimental.



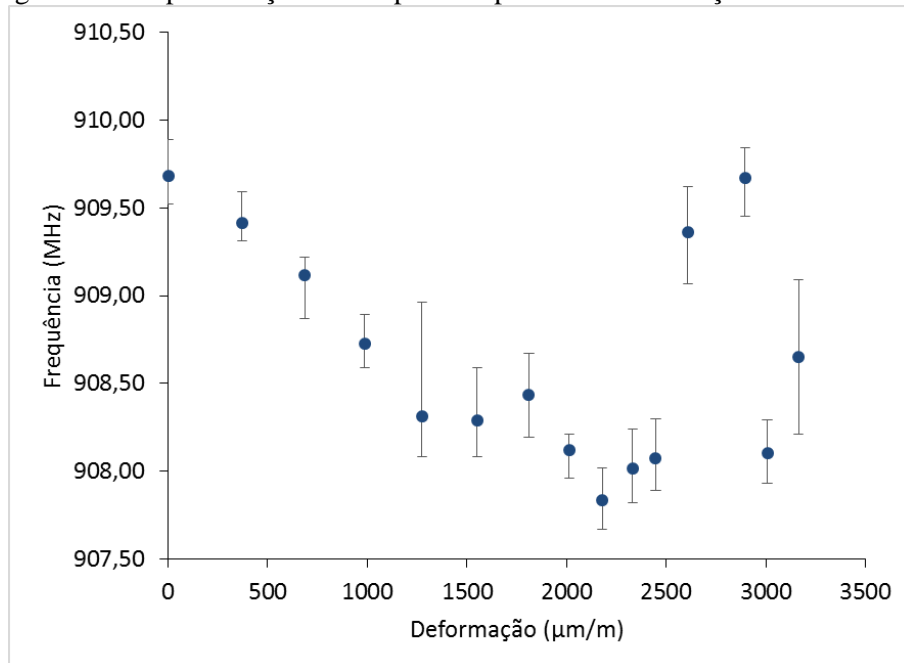
Fonte: Autor (2017).

Figura 71 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-B experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 72 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-B.

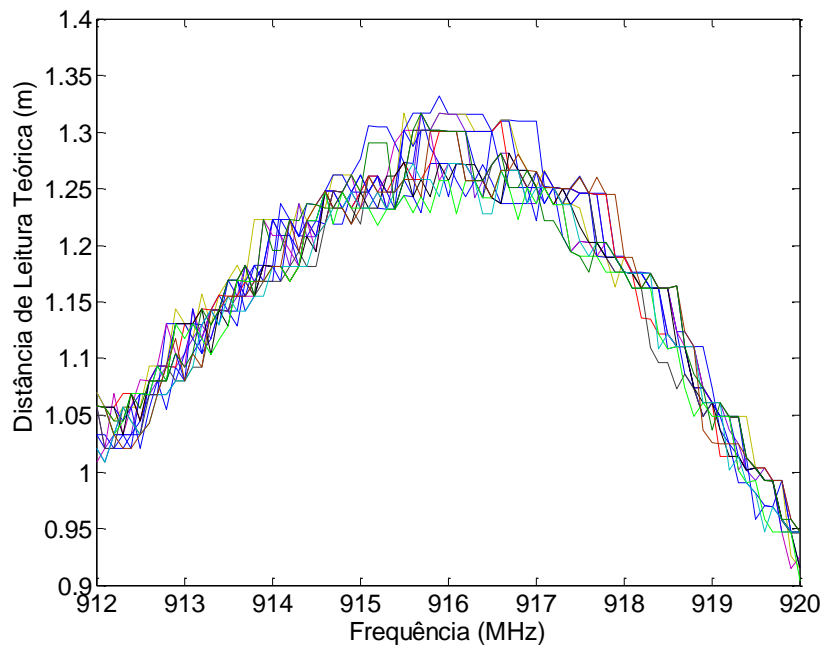


Fonte: Autor (2017).

**Sensor II-C:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 73. Para este sensor, com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 916,05 MHz. Valor bem próximo ao simulado e ao valor do sensor II-a. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados na APÊNCICE D.

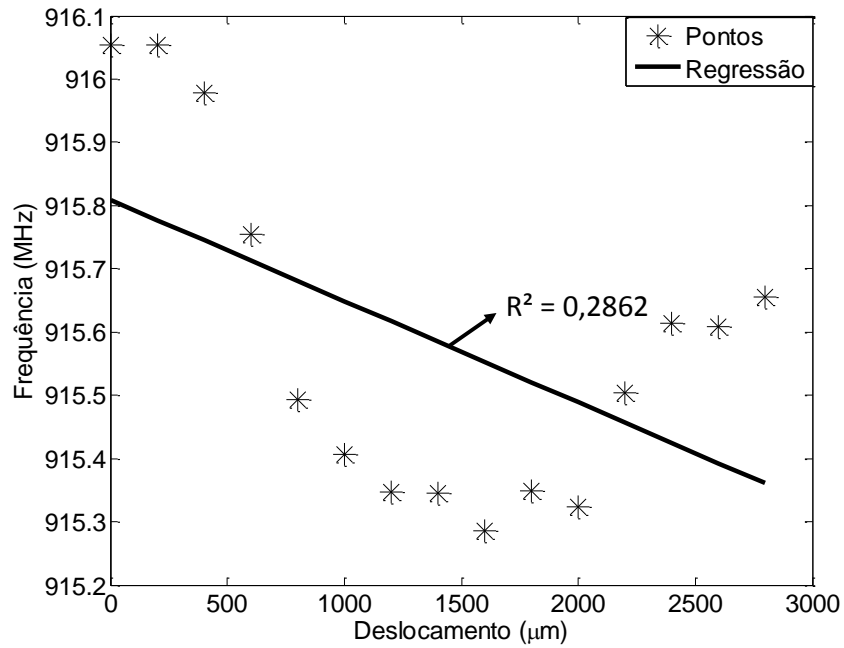
Realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 74, inicialmente o sensor se comporta com tendência linear reduzindo sua frequência à medida que os deslocamentos aumentam, porém a partir de 1,8mm de deslocamento, começa a ocorrer aumento da frequência de ressonância. Para a regressão utilizando os dados de deformação, Figura 75 se observou o mesmo tipo de variação. Assim tendências lineares não podem ser atribuídas a este sensor. O coeficiente de determinação para ambos os casos apresentou baixos valores, 0,2862 para a regressão com deslocamentos e 0,4244 para a regressão das deformações. Dessa forma a equação gerada por esta regressão não pode representar estes dados. Não foi realizado estudo referente ao modelo de regressão linear simples, já que nitidamente o comportamento não é linear. A Figura 76 apresenta as amplitudes medidas observadas, grande amplitude, similar ao sensor II-b, foi constatada.

Figura 73 – Resultados obtidos do equipamento sensor II-C.



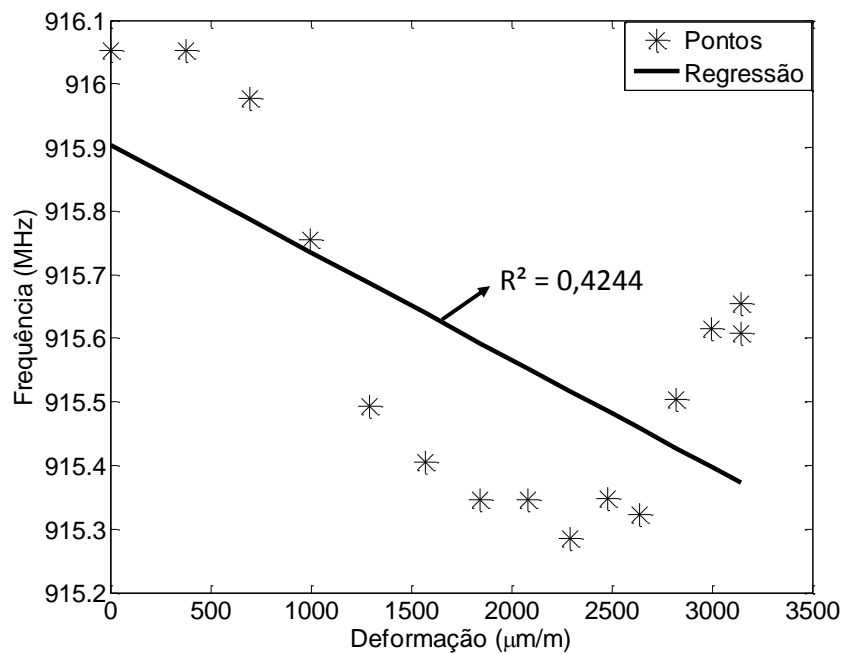
Fonte: Autor (2017).

Figura 74 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor II-C experimental.



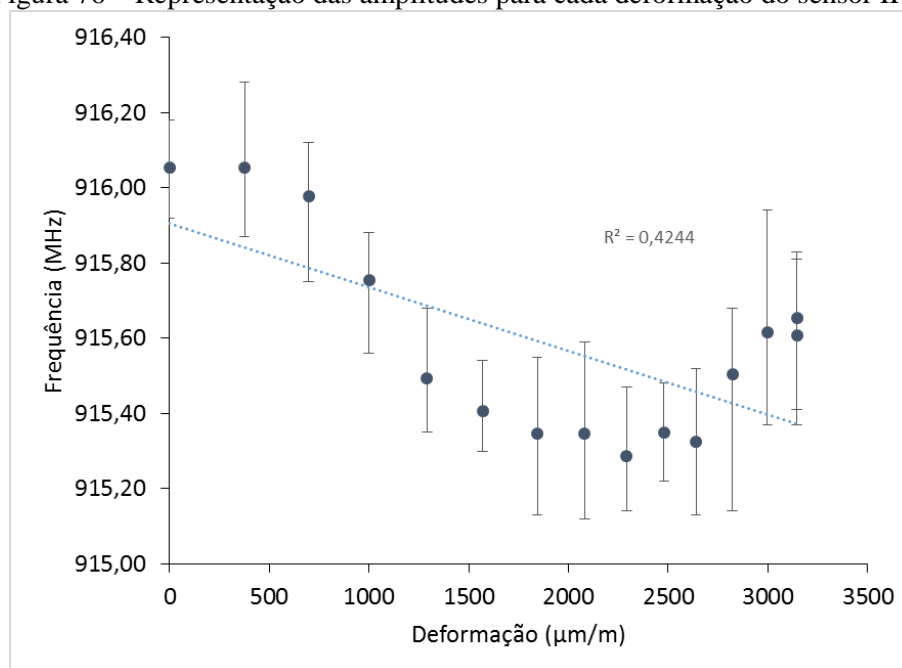
Fonte: Autor (2017).

Figura 75 – Regressão linear simples para as deformações sensor II-C experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 76 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor II-C.



Fonte: Autor (2017).

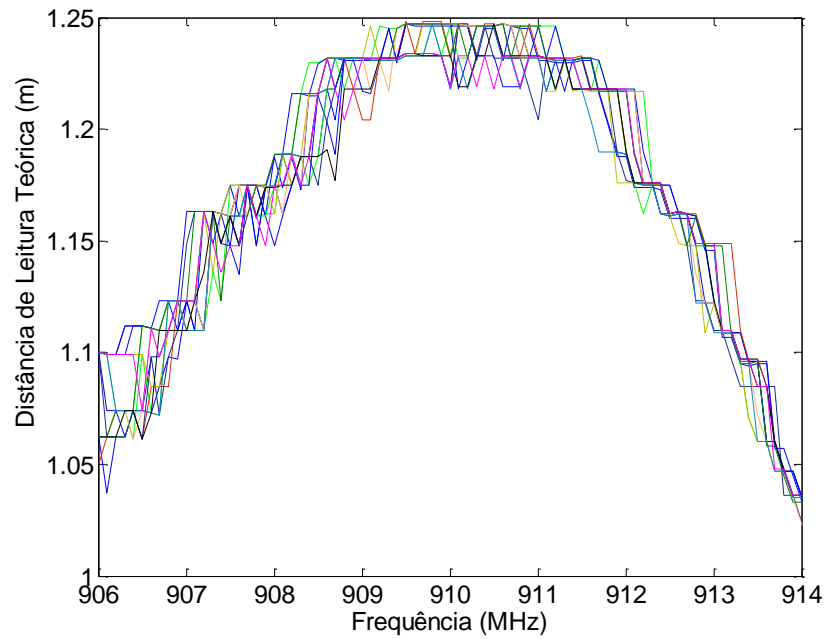
### 4.2.3 Modelo III

De maneira análoga ao Modelo II, três sensores foram ensaiados, estes foram nomeados como III-A, III-B, III-C e serão apresentados a seguir.

**Sensor III-A:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 77. Com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 910,24 MHz. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados no APÊNDICE E Tabela 8. Assim, realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 82, é possível visualizar que o sensor reduz sua frequência com o aumento dos deslocamentos aplicados. Uma tendência linear pode ser atribuída ao comportamento deste sensor, já que um alto valor do coeficiente de determinação, cujo valor foi de 0,9472, ou seja, 94,72 % dos dados atribuídos pelos pontos podem ser representados pela regressão. A regressão linear simples realizada com os dados de deformação, Figura 83, apresentou um maior tendência linear, um coeficiente de determinação com o valor de 0,9783. Também podendo ser atribuído um comportamento linear a este sensor. Comportamentos lineares podem ser observados em diversos outros trabalhos. (TATA e DESHMUKH, 2009) (LANTZ, 2011) (WANG, LIU e GE, 2015) (TATA, HUANG e CARTER, 2009) (YI, 2014) . A Figura 80 apresenta as amplitudes medidas.

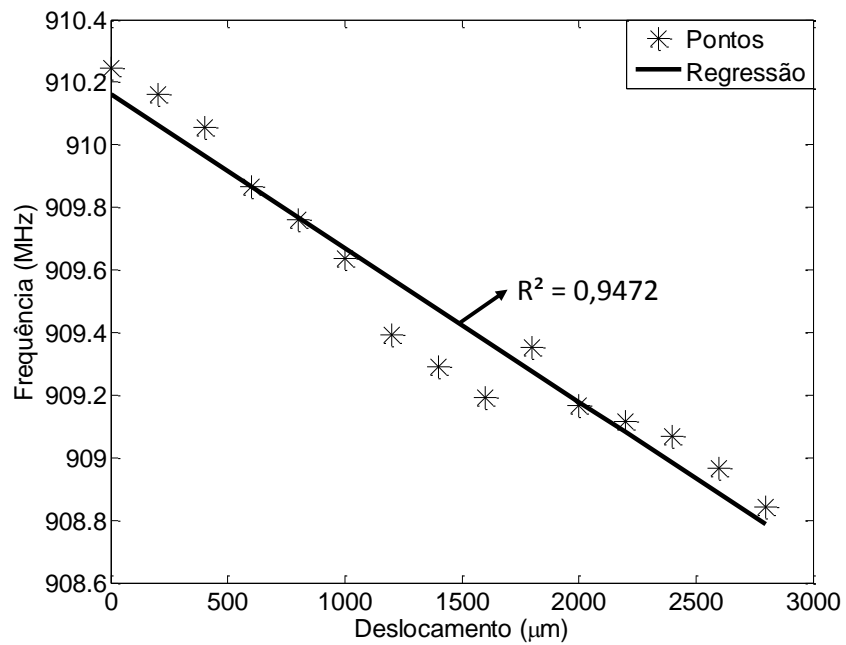


Figura 77 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-A.



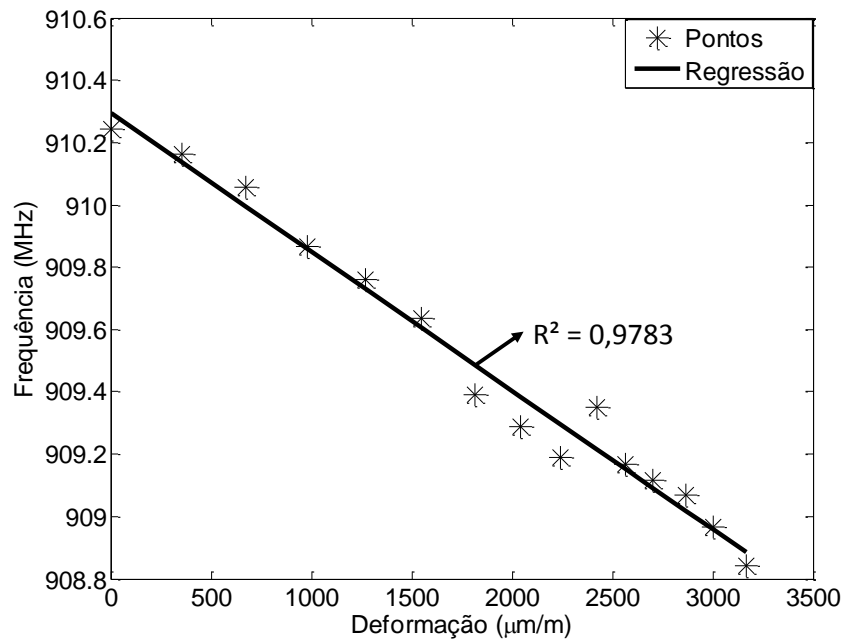
Fonte: Autor (2017).

Figura 78 – Regressão linear simples para os deslocamentos modelo II experimental.



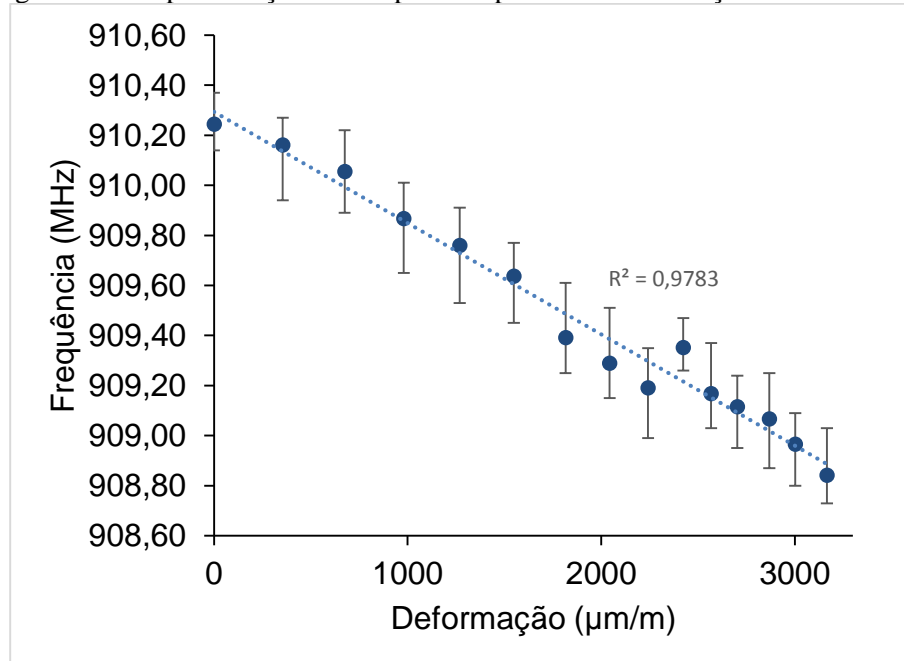
Fonte: Autor (2017).

Figura 79 – Regressão linear simples para as deformações modelo II experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 80 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-a.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 78.

As hipóteses I, II e IV são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-1,02E-12$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 0,73 podendo afirmar que existe auto correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-

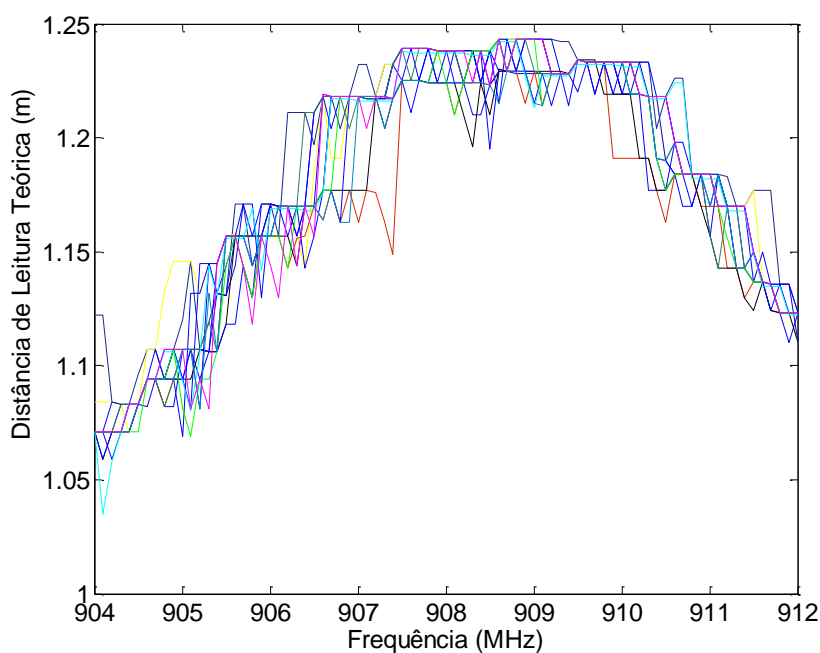
Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,80$  ou seja, os erros não possuem distribuição normal. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deslocamento não é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 79.

As hipóteses I, II, IV são assumidas. O valor da média dos erros obtido foi  $3,03E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,68 mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,93$ , ou seja, os erros possuem distribuição normal. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação pode ser validada.

**Sensor III-b:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 81. Com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 908,71 MHz. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados no APÊNDICE F.

Figura 81 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-b.

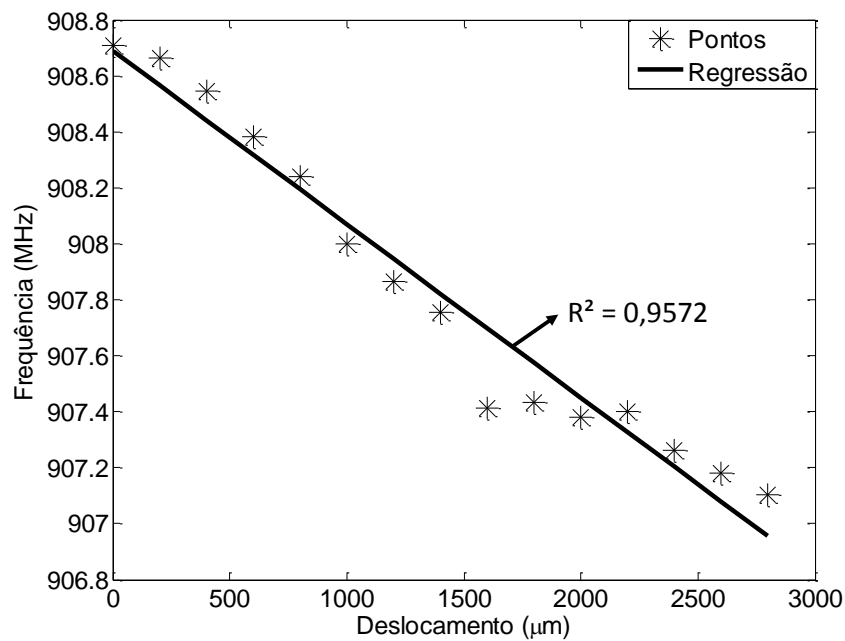


Fonte: Autor (2017).

Realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 82, é possível visualizar que o sensor reduz sua frequência com o aumento dos deslocamentos aplicados. Uma tendência linear pode ser atribuída ao comportamento deste

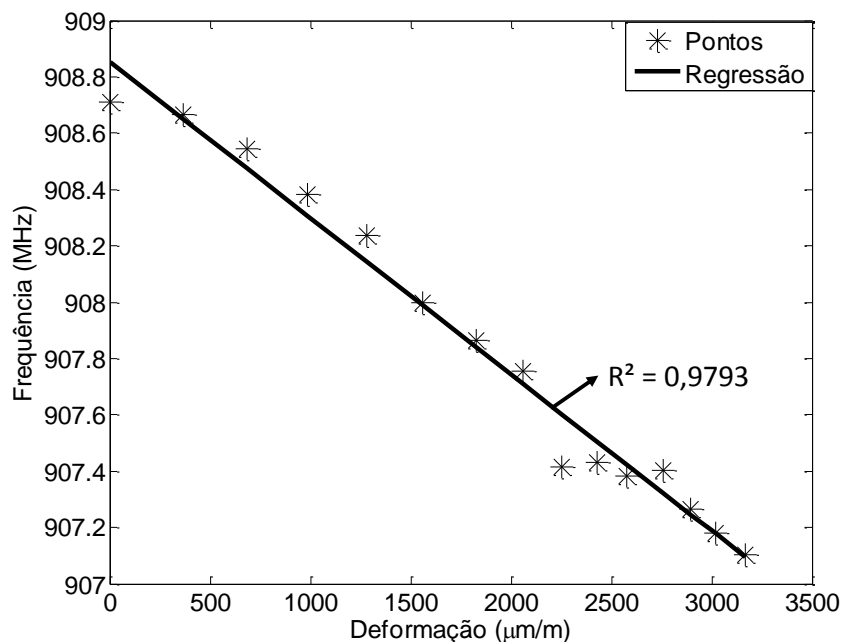
sensor, já que um alto valor do coeficiente de determinação, cujo valor foi de 0,9572, ou seja, 95,72 % dos dados atribuídos pelos pontos podem ser representados pela regressão. A regressão linear simples realizada com os dados de deformação, Figura 83, apresentou um maior tendência linear, um coeficiente de determinação com o valor de 0,9793. Também podendo ser atribuído um comportamento linear a este sensor. A Figura 80 apresenta as amplitudes medidas.

Figura 82 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III-b experimental.



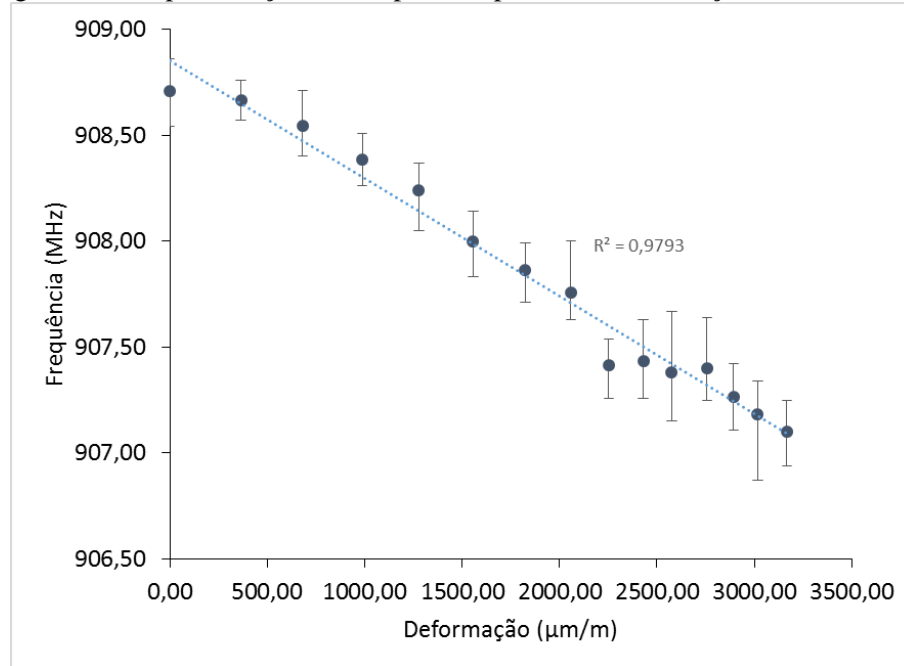
Fonte: Autor (2017).

Figura 83 – Regressão linear simples para as deformações sensor III-b experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 84 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-b.



Fonte: Autor (2017).

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 82.

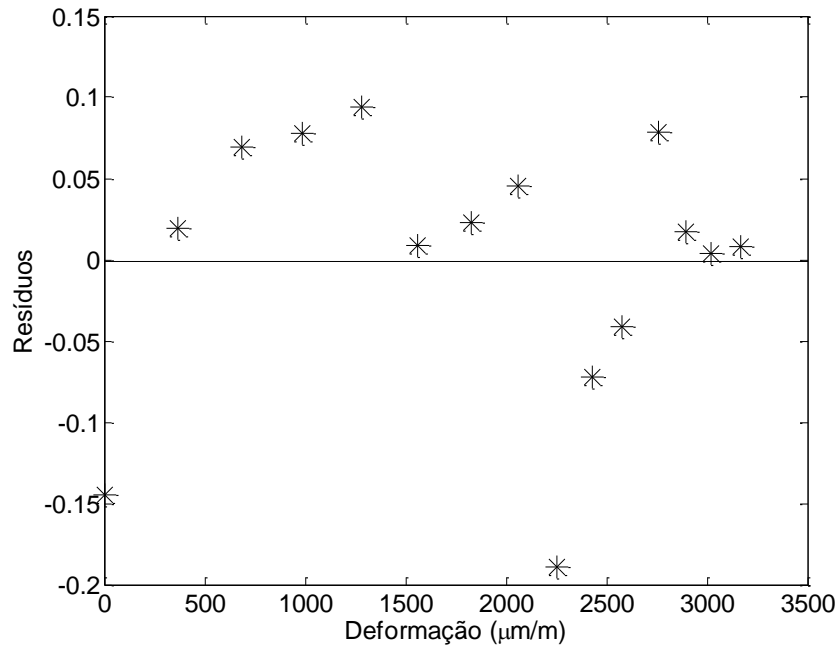
As hipóteses I, II e IV são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $1,51E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 0,63, afirmando a existência auto correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,90$  ou seja, os erros possuem distribuição normal. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deslocamento é não é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 83.

As hipóteses I, II, IV descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtido foi  $1,36E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,34, assim não pode ser afirmado se existe auto correlação entre os resíduos, assim foi utilizado o método de análise de gráfica dos resíduos. A Figura 85 apresenta os resíduos em função da variável deformação. Nota-se que os resíduos não possuem nenhum tipo de tendência no seu conjunto de dados. Mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,88$ , ou

seja, não possuem distribuição normal. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação não pode ser validada.

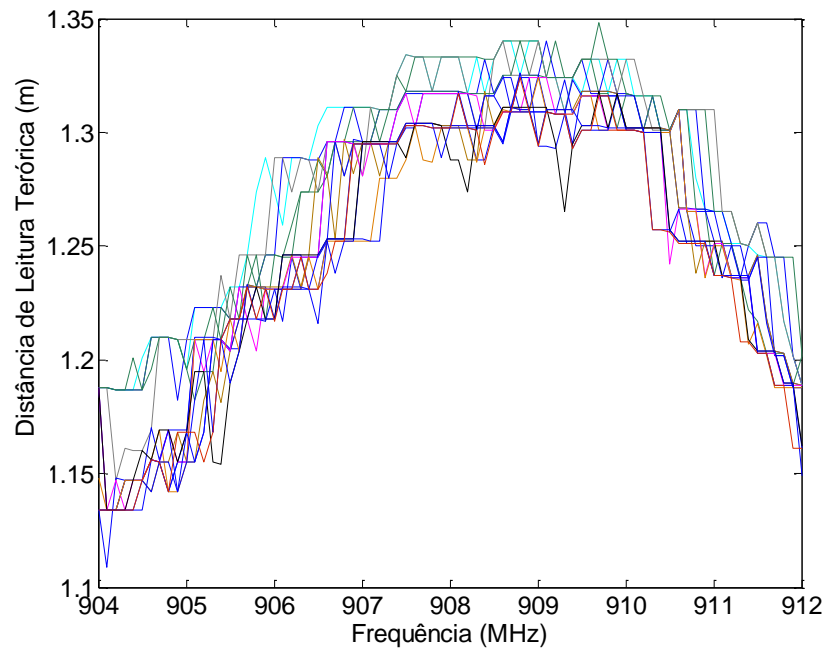
Figura 85 – Resíduos em função da variável deslocamento para o sensor III-b.



Fonte: Autor (2017).

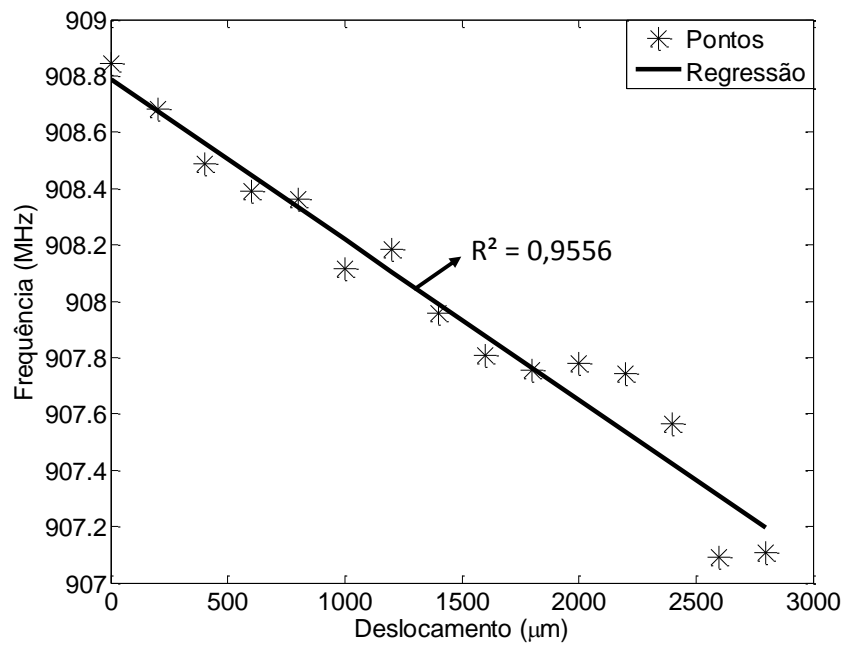
**Sensor III-c:** Os resultados obtidos no equipamento podem ser visualizados na Figura 86. Com zero de deslocamento após o tratamento dos dados descrito na metodologia deste trabalho, a frequência de ressonância obtido foi o valor de 908,84 MHz. Os dados coletados em cada medida para cada deslocamento, a média e o desvio padrão, podem ser visualizados no APÊNDICE G. Assim, realizando a regressão linear simples dos valores de frequência de ressonância e deslocamento, Figura 87, é possível visualizar que o sensor reduz sua frequência com o aumento dos deslocamentos aplicados. Uma tendência linear pode ser atribuída ao comportamento deste sensor, já que um alto valor do coeficiente de determinação, cujo valor foi de 0,9472, ou seja, 94,72 % dos dados atribuídos pelos pontos podem ser representados pela regressão. A regressão linear simples realizada com os dados de deformação, Figura 88, apresentou um maior tendência linear, um coeficiente de determinação com o valor de 0,9783. Também podendo ser atribuído um comportamento linear a este sensor. Comportamentos lineares podem ser observados em diversos outros trabalhos. A Figura 89 apresenta as amplitudes medidas.

Figura 86 – Resultados obtidos do equipamento sensor III-c.



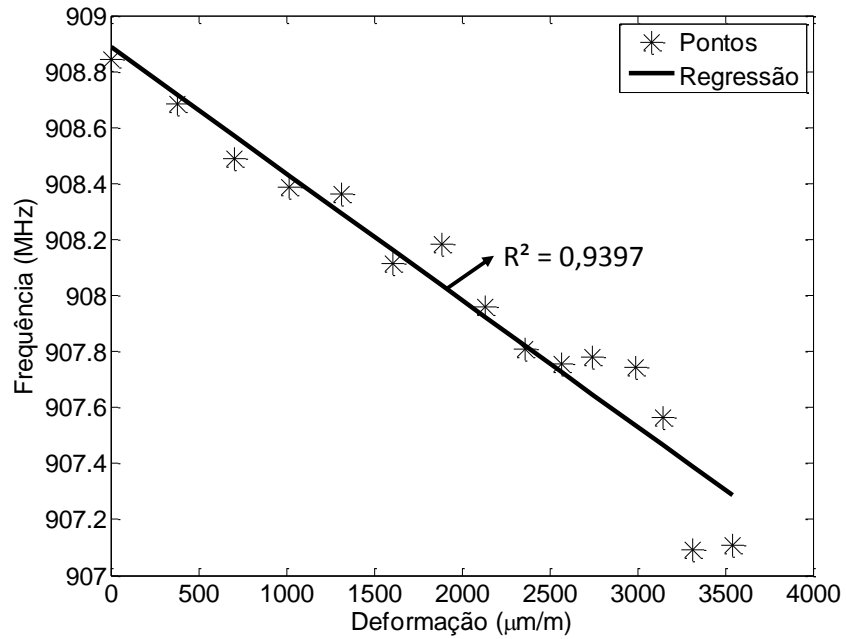
Fonte: Autor (2017).

Figura 87 – Regressão linear simples para os deslocamentos sensor III-c experimental.



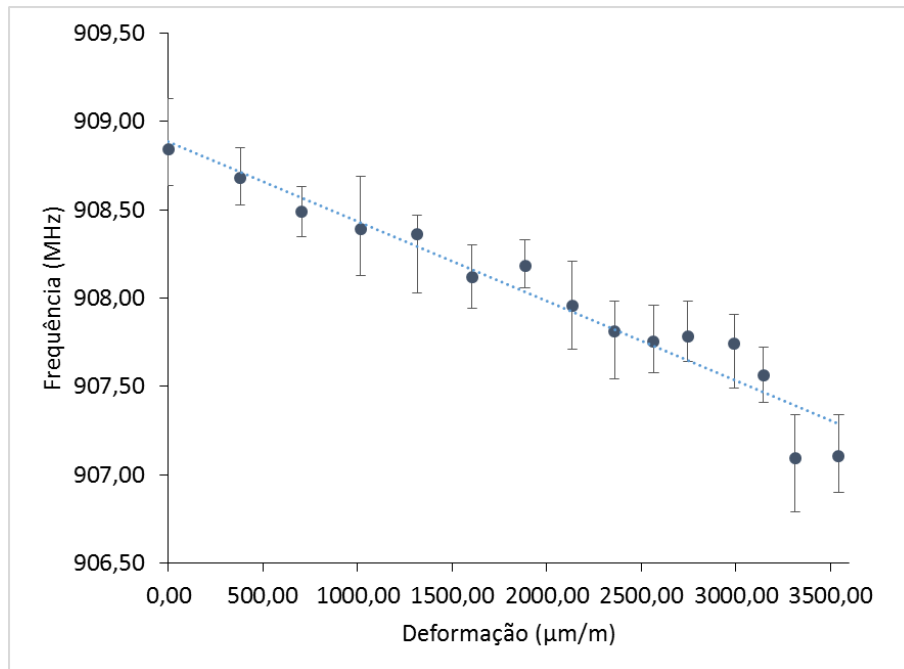
Fonte: Autor (2017).

Figura 88 – Regressão linear simples para as deformações sensor III-c experimental.



Fonte: Autor (2017).

Figura 89 – Representação das amplitudes para cada deformação do sensor III-c.



Fonte: Autor (2017).



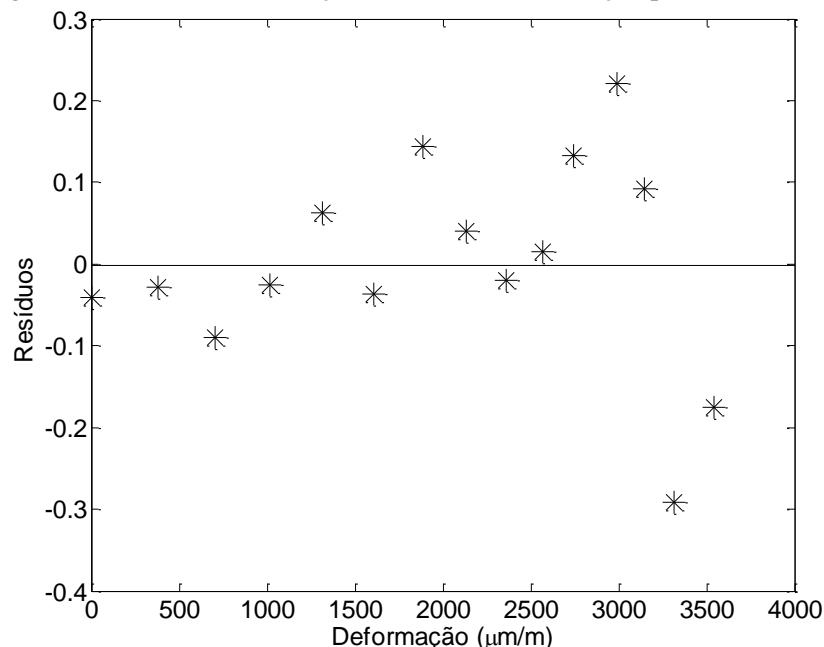
- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 87.

As hipóteses I, II e IV descritas na revisão bibliográfica são assumidas. O valor da média dos erros obtida foi  $-1,44E-13$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,52, afirmando a não existência de auto correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,98$  ou seja, os erros possuem distribuição normal. Assim, a regressão linear simples entre frequência e deslocamento é válida.

- Análise estatística da regressão linear simples referente à Figura 88.

As hipóteses I, II, IV são assumidas. O valor da média dos erros obtido foi  $-9,85E-14$ , que é aproximadamente a zero. Assim a hipótese III foi validada. A hipótese V foi validada através do Teste Durbin-Watson, já que apresentou um valor de  $d$  igual à 1,21, assim não pode ser afirmado se existe auto correlação entre os resíduos, assim foi utilizado o método de análise de gráfica dos resíduos. A Figura 90 apresenta os resíduos em função da variável deformação. Nota-se que os resíduos não possuem nenhum tipo de tendência no seu conjunto de dados. Mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. Mostrando a não existência de correlação entre os resíduos. A hipótese VI foi verificada através do teste Shapiro-Wilk, cujo resultado obtido foi  $W = 0,96$ , ou seja, os erros possuem distribuição normal. Dessa forma a regressão linear simples entre frequência e deformação pode ser validada.

Figura 90 - Resíduos em função da variável deformação para o sensor III-c.



Fonte: Autor (2017).

#### 4.2.4 Comparação entre Simulação Numérica e Experimental

Nesta seção será abordado uma comparação entre os resultados obtidos pela simulação numérica e os ensaios experimentais para os três modelos propostos. A análise comparativa irá comparar a frequência de ressonância do sensor, máxima distância teórica de leitura e a sensibilidade levando em consideração a inclinação da equação da regressão linear simples.

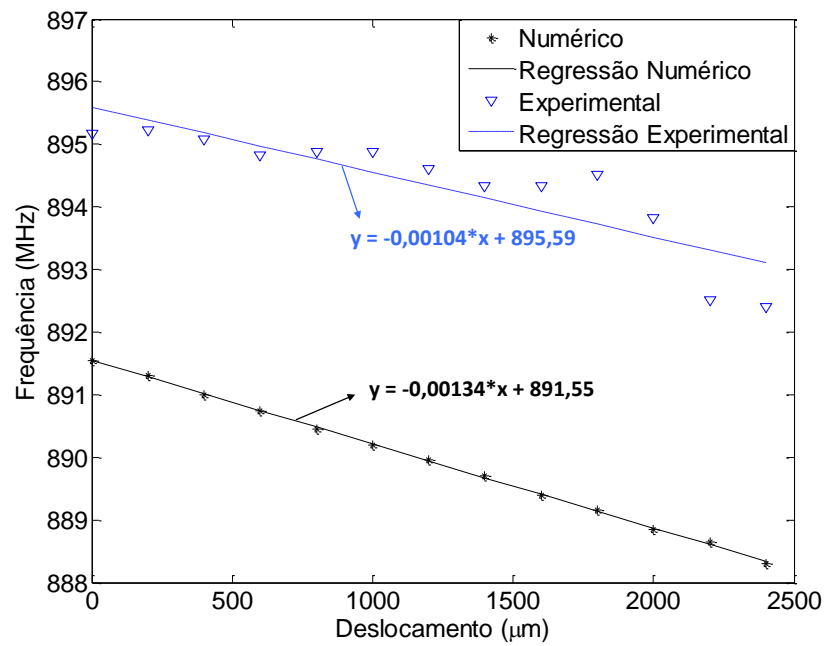
**Sensor I:** Os dados de frequência de ressonância e máxima distância teórica de leitura são comparados de acordo com a Tabela 5, apesar de numericamente o erro ser baixo e os valores próximos no caso da frequência de ressonância, esta diferença pode afetar bastante o resultado, levando a um descasamento de impedância e gerando alterações na distância de leitura. Outra observação seria a grande diferença entre a distância de leitura, um motivo já explicado na frase anterior pode ser o um dos fatores que causam esta grande diferença. Além deste, o uso da equação 18 para o cálculo da distância de leitura na simulação não considera as perdas que um ambiente de ensaio possui, dentre elas as reflexões que serão geradas. Na análise da reta de regressão gerada pela Figura 91, apesar da regressão não possuir um coeficiente de determinação próximo de 1 para o caso experimental, podemos verificar que o coeficiente angular da reta de ambas as regressões, experimental e numérico, possuem valores distintos, isto não gera um comportamento semelhante ao esforços em tração. Para a Figura 92 comportamento não semelhante, entre as inclinações, também é verificado. Os valores de frequência de ressonância, para a condição inicial, sem deformação, podem variar principalmente devido ao método de produção do sensor, que baseia-se em aplicar as vias com esforço mecânico e manual. Assim este método é considerado um gerador de divergências entre o experimental e o numérico. Utilizou-se este método pois era o único disponível no laboratório.

Tabela 5 – Comparativo Sensor I.

Modelo I			
	Simulação Numérica	Experimental	Erro relativo ao experiental (%)
Frequência de Ressonância (MHz)	891,55	895,17	0,40
Máxima Distância Teórica de Leitura (m)	2,96	1,06	179,25

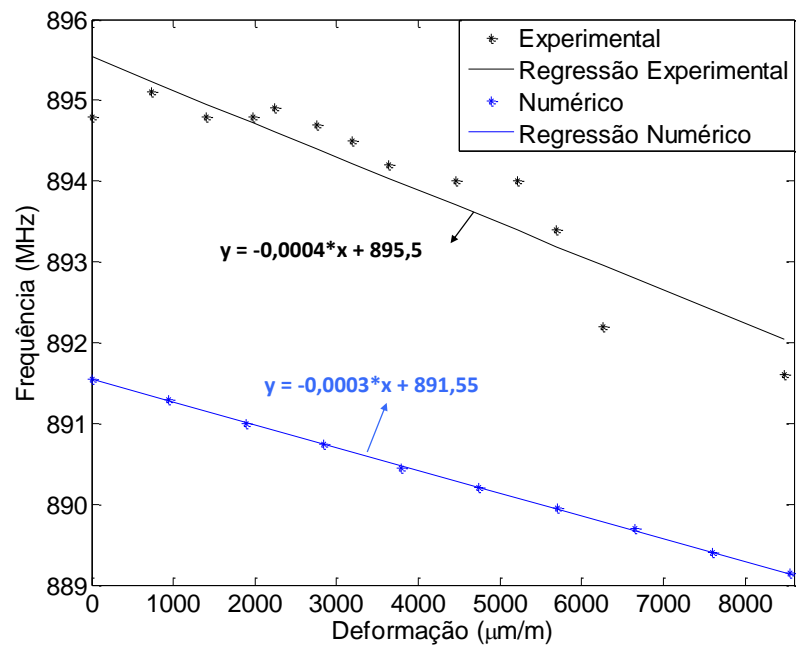
Fonte: Autor (2017).

Figura 91 – Comparativo regressões deslocamento Sensor I.



Fonte: Autor (2017).

Figura 92 – Comparativo regressões deformação Sensor I.



Fonte: Autor (2017).

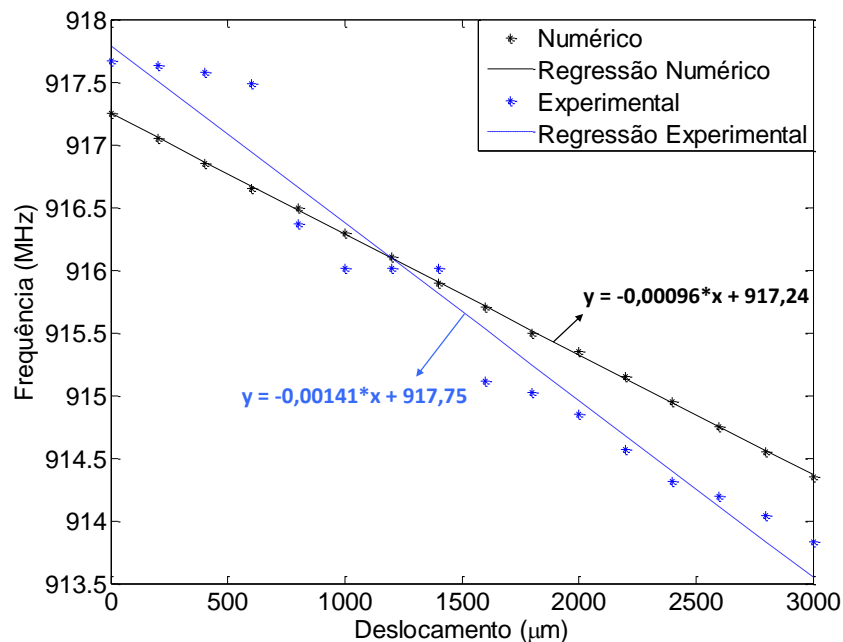
- Sensor II:** Para o sensor II os dados de frequência de ressonância e máxima distância teórica de leitura para cada sensor são comparados de acordo com a Tabela 6. A comparação entre as regressões foi realizada apenas para o sensor II-A, visto que os demais não obtiveram uma tendência linear. Não foi descoberto o motivo de um comportamento anormal para os sensores II-B e II-C. Para o sensor II-A, valores de máxima distância de leitura bem próximos foram obtidos. Uma maior sensibilidade, maior coeficiente angular da reta de regressão foi observado experimentalmente para este em ambas as Figuras 93 e 94. Uma sensibilidade superior a 3 vezes ao simulado foi encontrada, porém devido à dificuldade de replicar este sensor no processo de fabricação acarreta em dúvidas referente ao seu comportamento.

Tabela 6 – Comparativo sensor II.

		Frequência de Ressonância (MHz)	Máxima Distância Teórica de Leitura (m)
Sensor II-A	Simulação Numérica	914,90	1,75
	Experimental	917,66	1,65
	Erro relativo ao experimental (%)	0,30	6,06
Sensor II-B	Experimental	909,68	0,72
	Erro relativo ao experimental (%)	0,57	143,06
Sensor II-C	Experimental	916,05	1,31
	Erro relativo ao experimental (%)	0,13	33,59

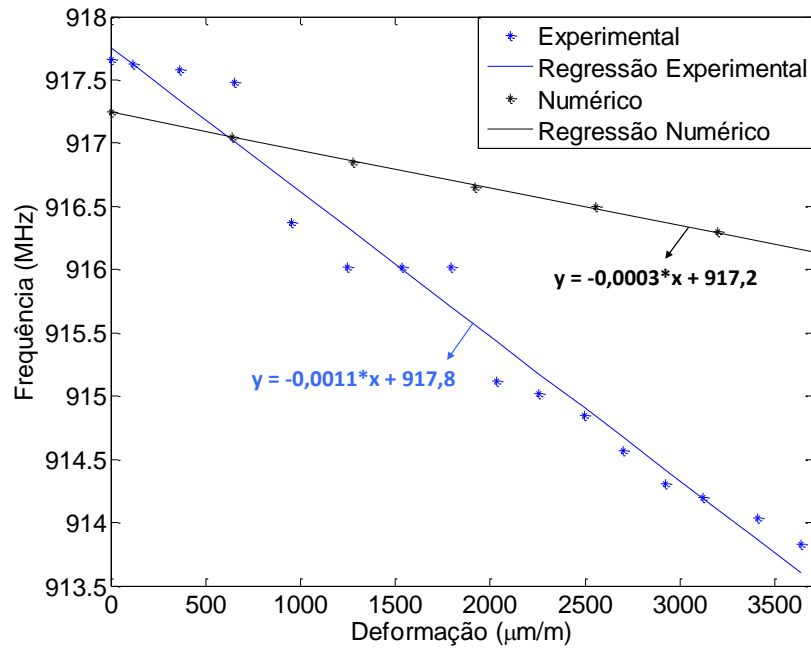
Fonte: Autor (2017).

Figura 93 – Comparativo regressões deslocamento Sensor II-A.



Fonte: Autor (2017).

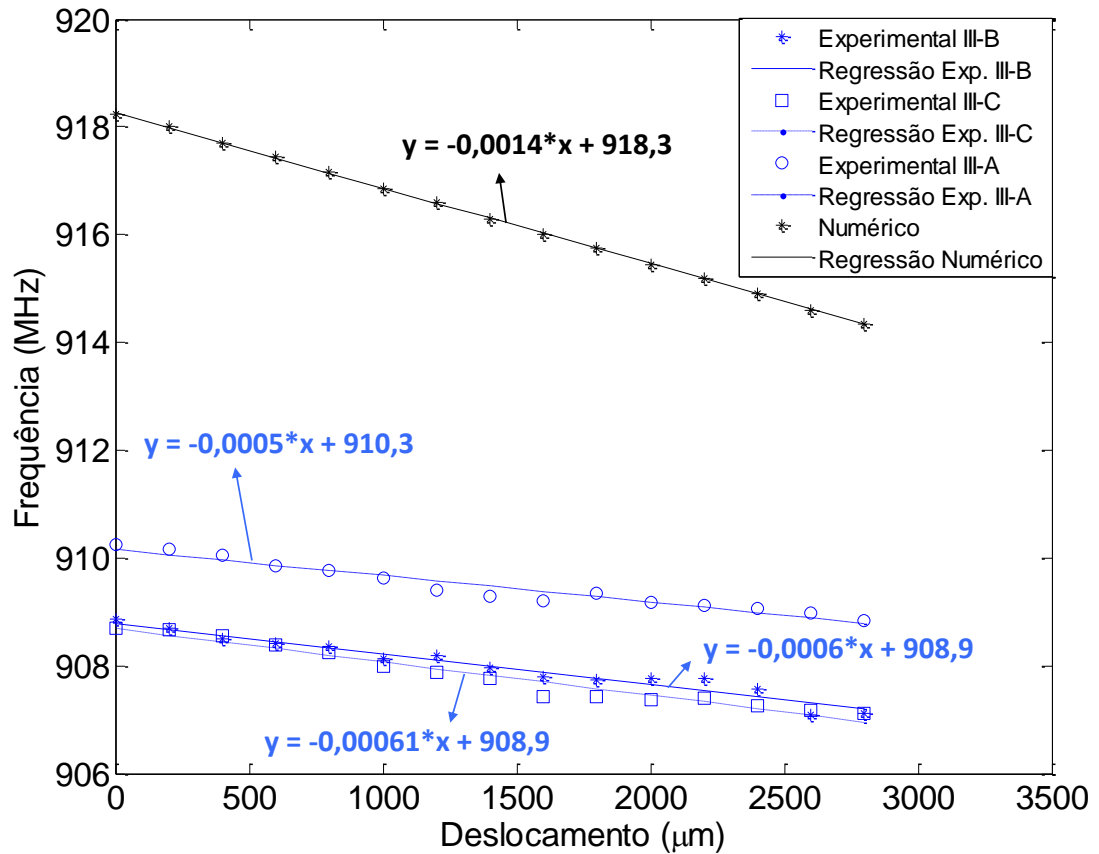
Figura 94 – Comparativo regressões deformação Sensor II-A.



Fonte: Autor (2017).

- Sensor III:** Para o sensor III os dados de frequência de ressonância e máxima distância teórica de leitura para cada sensor são comparados de acordo com a Tabela 7. Para ambos os sensores às máximas distâncias de leitura e as frequências de ressonância diferiram do simulado. Porém valores bem próximos de máxima distância de leitura foram obtidos para os 3 sensores ensaiados. Além disso, os valores de frequência de ressonância dos sensores ensaiados foram bem próximos, assim mostrando que este tipo de sensor se apresentou com uma maior facilidade para a sua replicação. Sua sensibilidade, avaliada através do coeficiente angular da reta, para os modelos numéricos, sofreu um aumento de valor, confirmando a hipótese de aumento de sensibilidade, com o aumento do comprimento do patch, visualizada na Figura 95. Para os ensaios experimentais III-A e III-B, valores próximos do modelo numérico para o coeficiente angular da reta foram obtidos. Acreditando o comportamento linear do sensor e sua possibilidade de replicabilidade. Para a Figura 96, os valores do coeficiente angular das retas de regressão para o modelo numérico, sensor III-A e III-B foram iguais. O fato da reta de regressão simulada e a experimental apresentarem o mesmo comportamento, coeficiente angular da reta muito próximos, valida o modelo de simulação aplicado neste trabalho.

Figura 95 – Comparativo regressões deslocamento Sensor II-A.



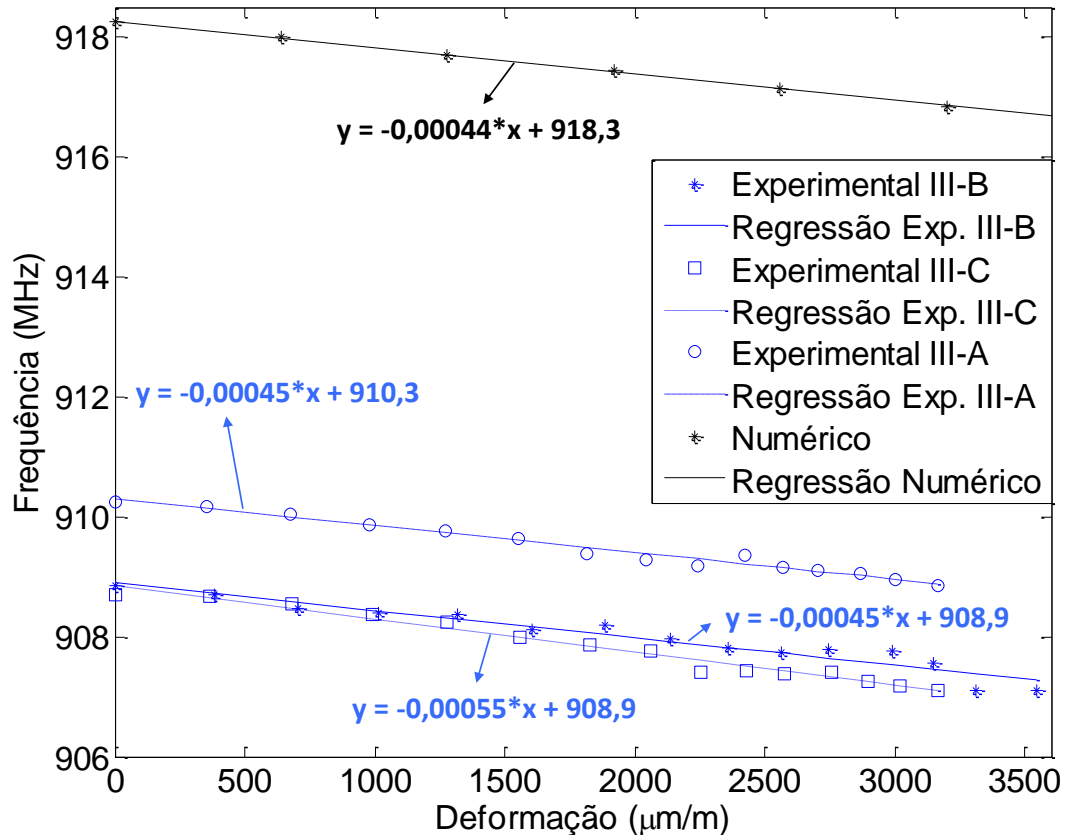
Fonte: Autor (2017).

Tabela 7 – Comparativo Sensor III.

		Frequência de Ressonância (MHz)	Máxima Distância Teórica de Leitura (m)
Sensor III-A	Simulação Numérica	918,25	2,09
	Experimental	910,24	1,25
	Erro relativo ao experimental (%)	0,88	67,20
Sensor III-B	Experimental	908,71	1,34
	Erro relativo ao experimental (%)	1,05	55,97
Sensor III-C	Experimental	908,84	1,24
	Erro relativo ao experimental (%)	1,04	68,55

Fonte: Autor (2017).

Figura 96 – Comparativo regressões deformação Sensor II-A.



#### 4.2.5 Comparação entre Modelos

Como mencionado anteriormente, alterações na geometria do sensor e no fator de qualidade afetam diretamente na obtenção dos dados dos sensores. A proposta do sensor III foi gerar um aumento de sensibilidade, aumentando a dimensão do comprimento da antena, que é a principal responsável pela frequência de ressonância observado no ensaio. Comparando as simulações dos sensores I, II, III, verificamos que o aumento da dimensão do patch levou sim a um aumento da sensibilidade, coeficiente angular da reta de regressão, podendo ser verificado nas Figuras 92, 94, 96 (YI, 2014) (XIAOHUA YI, CHUNHEE CHO e BENJAMIN COOK, 2013). Os modelos numéricos I e II por apresentarem praticamente os mesmos valores do comprimento da antena, não modificaram seus coeficientes angulares, 0,0003. Já o modelo numérico do sensor III sofreu uma grande modificação no comprimento da antena que gerou uma modificação no coeficiente angular da reta de regressão, aumento sua sensibilidade.

Para a etapa experimental, o sensor III, coeficiente angular igual a 0,00045 se demonstrou mais sensível que o sensor I, coeficiente angular igual a 0,0004. Porém o sensor II-A obteve uma coeficiente angular bem maior, 0,0011. O sensor III possui o menor fator de qualidade, bem próximo ao sensor I, Tabela 8, já o sensor II-A o maior fator de qualidade e experimentalmente o maior coeficiente angular na regressão. Como verificado o aumento da sensibilidade devido a geometria na simulação é em torno de 47%, valor este não compatível ao experimental que é de 12,5%, comparando os modelos I e III que possuem valores próximos de fator de qualidade.

Esta discrepância de resultado mostra que não pode ser afirmado que o fator de qualidade influencia na sensibilidade destes sensores e que o aumento do fator de qualidade leva a um aumento da sensibilidade do sensor, porém pode ser afirmado que um alto fator de qualidade gera um aumento de precisão na medida da frequência de ressonância, reduzindo erros de interpolação, podendo esta precisão ser avaliada através do valor do desvio padrão encontrado nas medidas para os sensores. Os APÊNDICES A, B, C, D, E, F e G apresentam os valores de desvio padrão obtidos para cada deslocamento. O Sensor II-A apresentou um menor desvio padrão quando comparados aos demais, pois possui o maior fator de qualidade entre os sensores. (XIAOHUA YI, CHUNHEE CHO, *et al.*, 2013) . A Figura 97 apresenta a largura de banda dos sensores.

Tabela 8 – Fator de Qualidade

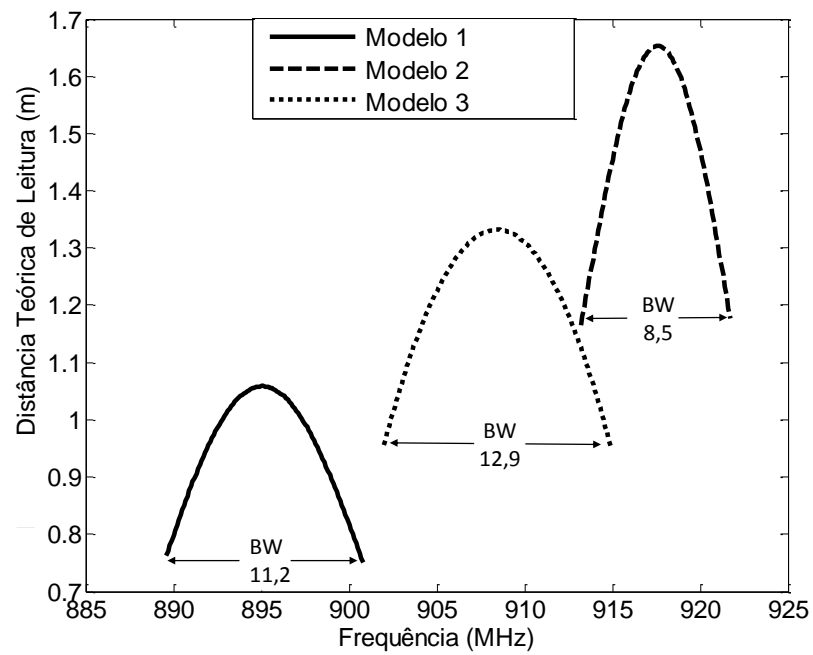
	Fator de Qualidade
I	79,93
II	107,96
III	70,45

Fonte: Autor (2017).

A validação do uso do modelo de regressão linear simples para as geometrias propostas podem ser resumidas através da tabela 9. Pode ser verificado que as regressão para as amostras II-A, III-A e III-C para deformações são válidas. Os valores destacados em amarelo representam situações onde o teste Durbin-Watson não pode inferir nenhum tipo de conclusão e estes já foram discutidos anteriormente.



Figura 97 – Largura de Banda sensores.



Fonte: Fonte: Autor (2017).

Tabela 9 – Resumo Modelo de Regressão Linear Simples.

Sensor		Média do erro	$d$	Condição $d$	$W$	Cond. $W$	Regressão Linear
I	Desl.	$3,49E^{-14}$	0,39	$1,34 < d < 2,66$	0,88	$W > 0,87$	✘
	Def.	$-6,10E^{-14}$	0,83	$1,34 < d < 2,66$	0,89	$W > 0,87$	✘
II-A	Desl.	$-1,56E^{-13}$	1,36	$1,37 < d < 2,63$	0,97	$W > 0,89$	✔
	Def.	$-7,10E^{-14}$	1,72	$1,37 < d < 2,63$	0,95	$W > 0,89$	✔
III-A	Desl.	$-1,02E^{-12}$	0,73	$1,36 < d < 2,64$	0,80	$W > 0,88$	✘
	Def.	$3,03E^{-14}$	1,68	$1,36 < d < 2,64$	0,93	$W > 0,88$	✔
III-B	Desl.	$1,51E^{-13}$	0,63	$1,36 < d < 2,64$	0,90	$W > 0,88$	✘
	Def.	$-1,36E^{-13}$	1,34	$1,36 < d < 2,64$	0,88	$W > 0,88$	✘
III-C	Desl.	$-1,44E^{-13}$	1,52	$1,36 < d < 2,64$	0,98	$W > 0,88$	✔
	Def.	$-9,85E^{-14}$	1,21	$1,36 < d < 2,64$	0,96	$W > 0,88$	✔

Fonte: Autor (2017).

## 5 CONCLUSÕES

Na persistente busca de nova tecnologias os sensores RFID passivos se habilitam como uma boa alternativa para monitoramento de deformação em estruturas metálicas sem a utilização de cabos. Neste trabalho a aplicação de uma RFID *tag* como sensor de deformação foi investigada. Os resultados obtidos indicam que é possível o uso de *tags* RFID para a detecção e monitoramento de deformação e deslocamentos em estruturas metálicas, porém uma maior repetibilidade e estudo da incerteza da medida devem ser realizados.

Foi verificado numericamente e experimentalmente que o comprimento do *patch* é a principal dimensão da geometria do sensor, porém variações em outras dimensões do sensor também levam à variações de frequência de ressonância. Assim a direção de maior sensibilidade ao esforço mecânico é a direção do comprimento do *patch*. Logo, o conhecimento do comportamento dessas regiões e o tipo de solicitação mecânica aplicado ao sensor é fundamental para o desenvolvimento deste tipo de sensor. Além disso foi comprovado que o uso de elementos metálicos, como vias, reduzem o tamanho de antenas microfita.

A existência de uma correlação linear entre a frequência de ressonância e deformação foi observada tanto experimentalmente quanto numericamente. Assim o uso da ferramenta de elementos finitos para a construção e a análise de sensibilidade do sensor mostrou-se um método confiável e prático.

Na construção dos protótipos dos sensores foi verificado que, por se tratar de um processo manual, a rebitagem das vias gera variações na frequência de ressonância do sensores e conseqüentemente em suas máximas distâncias de leitura. A precisão de medida da frequência de ressonância do sensor é afetada diretamente pelo fator de qualidade, dessa forma quanto maior o fator de qualidade, maior a precisão na medida.

Os sensores III se mostraram mais confiáveis devido à repetibilidade de seu comportamento perante a solicitação mecânica. Altos valores, acima de 0,93, do coeficiente de determinação foram obtidos para estes sensores. As regressões entre frequência de ressonância e deformação para o sensor IIIA e IIIC foram validadas pelas hipóteses do modelo linear simples.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho sugere que trabalhos futuros analisem:

- A influência da temperatura e da umidade nas características do sensor.
- Desenvolver procedimento de inserção de vias para redução da variabilidade dos resultados.
- Avaliar procedimento e material de adesão do sensor na superfície a ser monitorada.
- Desenvolver sensor com maior fator de qualidade.

## 7 REFERÊNCIAS

- AROR, S. R.; DEAVOURS, D. D. Evaluation of the State of Passive UHF RFID: An Experimental Approach. **IEEE SYSTEMS JOURNAL**, v. 1, p. 168-176, Dezembro 2007. ISSN 1932-8184.
- BALANIS, C. A. **ANTENNA THEORY - ANALYSIS AND DESIGN**. 3º. ed. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 2005.
- BALANIS, C. A. **MODERN ANTENNA HANDBOOK**. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 2008.
- BLAKE, L. V.; LONG, M. W. **Antennas: Fundamentals, Design, Measurement**. 3º. ed. [S.l.]: SciTech Publishing, Inc., 2009.
- BUTLER, J. C.; VIGLIOTTI, A. J.; VERDI, F. W. Wireless, passive, resonant-circuit, inductively coupled, inductive strain sensor. **Sensors and Actuators**, v. A 102, p. 61-66, 2002. ISSN 0924-4247.
- CAIZZONE, S.; DIGIAMPAOLO, ; MARROCCO, G. Wireless Crack Monitoring by Stationary Phase Measurements from Coupled RFID Tags. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION**, v. 62, p. 6412-6419, Dezembro 2014.
- CHUANG, J.; THOMSON, D. J.; BRIDGES, G. E. Embeddable wireless strain sensor based on resonant rf cavities. **REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS**, v. 76, 2005. ISSN doi: 10.1063/1.2051808.
- DALIRI, A. et al. Wireless strain measurement using circular microstrip patch antennas. **Sensors and Actuators A : Physical**, n. 184, p. 86-92, 2012. ISSN 0924-4247.
- DALIRI, A.; GALEHDAR,. Quality Factor Effect on the Wireless Range of Microstrip Patch Antenna Strain Sensors. **Sensors**, v. 14, p. 595-605, 2014. ISSN 1424-8220.
- DESHMUKH, S.; HUANG, H. Wireless interrogation of passive antenna sensors. **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 21, 2010. ISSN 0957-0233.
- DEY, S.; KARMAKAR , N. C. **Design and Feasibility Analysis of Conventional Planar Antennas as Chipless RFID Strain Sensors**. Antennas and Propagation (ISAP), 2015 International Symposium. [S.l.]: [s.n.]. 2015.
- DOBKIN, D. ; WEIGAND , S.. **Environmental Effects on RFID Tag Antennas**. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 4.
- FERREIRA, M. R. P. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS TESTES DE NORMALIDADE DE JARQUE-BERA E LILLIEFORS EM MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR. **Revista de Matemática e Estatística - USP**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 89-98, 2006.
- FINKENZELLER, K. **RFID Handbook - Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- GARG, R. **Microstrip Antenna Design Handbook**. [S.l.]: Artech House, 2001.
- GLSBR. Disponível em: <<https://www.gs1br.org/codigos-e-padres/epc-rfid>>. Acesso em: 6 julho 2016.

- GOMES, H. M. C. **Construção de um sistema de RFID com fins de localização especiais**. [S.l.]: Departamento de Engenharia Electrónica - Telecomunicações e Informática. 2007.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **BASIC ECONOMETRICS**. 4<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: The McGraw–Hill, 2004.
- GURPREET KAUR; ER. SONIA GOYAL. To Study the Effect of Substrate Material for Microstrip Patch Antenna. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 36, n. 9, p. 490-493, 2016. ISSN 2231-5381.
- GUSTAFSSON, M.; NORDEBO, S. BANDWIDTH, Q FACTOR, AND RESONANCE MODELS OF ANTENNAS. **Progress In Electromagnetics Research - PIER**, n. 62, p. 1-20, 2006.
- HANSEN, R. C.; COLLIN, R. E. **SMALL ANTENNA - HANDBOOK**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- HASANI, M.; VENA, A. Implementation of a Dual-Interrogation-Mode Embroidered RFID-Enabled Strain Sensor. **IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS**, v. 12, p. 1272-1275, 2013.
- HOFFMANN, R. **ANÁLISE DE REGRESSÃO - Uma Introdução à Econometria**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2015.
- HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. RFID: A Guide to Radio Frequency Identification. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Cap. 3, p. 27-29.
- IEEE XPLORE. 145-1983 - IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. **IEEE Xplore - Digital Library**, 22 Junho 1983. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/30651/>>. Acesso em: 11 Dezembro 2016.
- INMETRO. INMETRO - avaliação de dados de medição — Guia para a expressão da incerteza de medição, 2008. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso\\_gum\\_versao\\_site.pdf](http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2017.
- JANG, S.-D.; KANG, B.-W.; KIM, J. Frequency selective surface based passive wireless sensor for structural health monitoring. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, v. 22, 2013.
- JOHNSON, R. C. **ANTENNA ENGINEERING HANDBOOK**. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1993.
- KANAN, R.; AZIZI, A. **UHF RFID Transponders Antenna Design for Metal and Wood Surfaces**. IEEE International Conference on RFID. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 270- 277.
- KARMAKAR, N. C. **HANDBOOK OF SMART ANTENNAS FOR RFID SYSTEMS**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- KIM, J.; WANG, Z.; KIM, W. S. Stretchable RFID for Wireless Strain Sensing With Silver Nano Ink. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 14, p. 4395- 4401, Dezembro 2014.
- KUROKAWA, K. Power Waves and the Scattering Matrix. **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES**, p. 194-202, Março 1965.
- LANTZ, G. CRACK DETECTION USING A PASSIVE WIRELESS STRAIN SENSOR. **Georgia Tech Library**, 2011. Disponível em: <<https://smartechnology.gatech.edu/handle/1853/45773>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

- LITON, P. C. et al. The Effect of Changing Substrate Material and Thickness on the Performance of Inset Feed Microstrip Patch A. **American Journal of Networks and Communications**, v. 4, p. 54-58, 2015. ISSN 2326-8964.
- MARROCCO,. The Art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 50, p. 66-79, Fevereiro 2008.
- MERILAMPI, S.; BJORNINEN, T. Embedded wireless strain sensors based on printed RFID tag. **Sensor Review**, v. 31, p. 32-40, 2011.
- MILES, S. B.; SARMA, S. E.; WILLIAMS, J. R. RFID Technology and Applications. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. Cap. 1, p. 4-8.
- MILLIGAN, T. A. **MODERN ANTENNA DESIGN**. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 2005.
- MOHAMMAD, I.; GOWDA, V.; ZHAI, H. Detecting crack orientation using patch antenna sensors. **Measurement Science and Technology**, n. 23, p. 9, 2012. ISSN 0957-0233.
- MOHAMMAD, I.; HUANG, H. An Antenna Sensor for Crack Detection and Monitoring. **Advances in Structural Engineering**, v. 14, p. 47- 53, 2011.
- MORITA, K.; NOGUCHI, K. **Crack Detection Methods Using Radio Frequency Identification and Electrically Conductive**. The 14<sup>o</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: [s.n.]. 2008.
- MUKHOPADHYAY, S. C. **Smart Sensors, Measurement and Instrumentation**. Berlin: Springer, v. 5, 2013.
- NASIMUDDIN. **MICROSTRIP ANTENNAS**. [S.l.]: InTech, 2011.
- NIKITIN, P. V.; SESHAGIRI RAO, K. V.; LAM, S. F. Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tag Design. **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES**, v. 53, p. 2721-2725, Setembro 2005. ISSN 0018-9480.
- OCCHIUZZI, C.; PAGGI, C.; MARROCCO,. Passive RFID Strain-Sensor Based on Meander-Line Antennas. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION**, v. 59, p. 4836-4840, Dezembro 2011. ISSN 0018-926X.
- ORFANIDIS, S. J. Electromagnetic Waves and Antennas , 2016. Disponível em: <<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- PARK ELECTROCHEMICAL CORP. Park Advanced Circuitry Materials. **PARK ELECTROCHEMICAL CORP**. Disponível em: <<http://www.parkelectro.com/>>. Acesso em: 28 mar. 2017.
- PRATA, P. I. **Sistemas de Localização para Ambientes Interiores**. [S.l.]: Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática - Universidade de Aveiro. 2008.
- PRERADOVIĆ. **ADVANCED RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION DESIGN AND APPLICATIONS**. [S.l.]: InTech, 2011.
- RAUMONEN, P. et al. **Folded dipole antenna near metal plate**. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450). [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. 848-851.

- REAZ, M. B. I. **Radio Frequency Identification from System to Applications**. [S.l.]: InTech, 2013.
- RENGIFO, E. Z. **Miniaturização de antenas microstrip para aplicações RFID**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- REZAIESARLAK, R.; MANTEGHI, M. **Chipless RFID - Design Procedure and Detection Techniques**. [S.l.]: Springer, 2015.
- RIEBACK, M. R.; CRISPO, B.; TANENBAUM, A. S. The Evolution of RFID Security. **IEEE PERVASIVE computing**, p. 62-69, janeiro-março 2006. ISSN 1536-1268.
- SAINATI, R. A. **CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications**. [S.l.]: Artech House, 1996.
- SANDEEP, B. S.; KASHYAP, S. S. DESIGN AND SIMULATION OF MICROSTRIP PATCH ARRAY ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATIONS AT 2.4 GHZ. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 3, Novembro 2012. ISSN 2229-5518.
- SANG-DONG, J.; BYUNG-WOO, K.; JAEHWAN, K. Frequency selective surface based passive wireless sensor for structural health monitoring. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, n. 22, p. 7, 2013. ISSN 0964-1726.
- SANG-DONG, J.; JAEHWAN, K. Passive wireless structural health monitoring sensor made with a flexible planar dipole antenna. **Smart Materials and Structures**, n. 21, p. 6, 2012. ISSN 0964-1726.
- SANGHERA, D. P.; THORNTON, F.; HAINES, B. How to Cheat at Deploying and Securing RFID. [S.l.]: Syngress Publishing, Inc. Elsevier, Inc., 2007.
- SARTORIS, A. **ESTATÍSTICAS e Introdução à Econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003.
- SCUDINO, P. A. **A Utilização de Alguns Testes Estatísticos para Análise da Variabilidade do Preço do Mel nos Municípios de Angra dos Reis e Mangaratiba, estado do Rio de Janeiro**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, p. 21. 2008.
- SESHAGIRI RAO, K. V.; NIKITIN, P. V.; LAM, S. F. Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION**, v. 53, p. 3870-3876, Dezembro 2005.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. J stor. **J stor**, 1965. Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/2333709?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/2333709?seq=1#page_scan_tab_contents)>. Acesso em: 09 jan. 2017.
- TATA, U.; DESHMUKH, S. Bio-inspired sensor skins for structural health monitoring. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, v. 18, 2009. ISSN 0964-1726.
- TATA, U.; HUANG, H.; CARTER, R. L. Exploiting a patch antenna for strain. **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 20, p. 1-7, 2009. ISSN 0957-0233.
- THAI, T. T.; AUBERT, H.; TENTZERIS, M. M. **A newly developed radio frequency wireless passive highly sensitive strain transducer**. SENSORS, 2011 IEEE. LIMERICK: IEEE. 2011. p. 211-214.
- TURCU, C.; CERLINCA, T.; CERLINCA, M. **Deploying RFID - Challenges, Solutions, and Open Issues**. [S.l.]: InTech, 2011.

- UKKONEN, L.; SYDÄNHEIMO, L. Effects of Metallic Plate Size on the Performance of Microstrip Patch-Type Tag Antennas for Passive RFID. **IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS**, v. 4, p. 410-413, 2005. ISSN 1536-1225.
- UKKONEN, L.; SYDANHEIRNO, L.; KIVIKOSKI, M. **A novel tag design using inverted-F antenna for radio frequency identification of metallic objects**. IEEE/Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications. [S.l.]: [s.n.]. 2004.
- VOLAKIS, J. L.; EIBERT, T. F. **Antenna Engineering Handbook**. 4<sup>o</sup>. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- VOYANTIC. **Tag Measurement System - Manual Tagformance 8**. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- WANG, W.; LIU, T.; GE, H. **Strain Measurement Based on Microstrip Patch Antennas**. 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). [S.l.]: [s.n.]. 2015. p. 1-6.
- WATERHOUSE, R. B. **Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide**. [S.l.]: Springer Science+Business Media, LLC, 2003.
- WEBSTER, J. **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- WONG, K.-L. **Compact and Broadband Microstrip Antennas**. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, INC., 2002.
- XIAOHUA YI et al. Passive wireless antenna sensor or strain and crack sensing - electromagnetic modeling, simulation, and testing. **Smart Materials and Structures**, n. 22, p. 17, 2013. ISSN 0964-1726.
- XIAOHUA YI; CHUNHEE CHO; BENJAMIN COOK. Design and simulation of a slotted patch antenna sensor for wireless strain sensing. **Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2013**, v. Vol. 8694, 2013.
- YEOMAN, M. S.; O'NEILL, M. A. **Impedance Matching of Tag Antenna to Maximize RFID Read Ranges & Design Optimization**. Proceedings of the 2014 COMSOL. Cambridge: [s.n.]. 2014.
- YI, X. **A Slotted Patch Antenna for Wireless Strain Sensing**. 2014 structures congress. Boston: [s.n.]. 2014. p. 2734-2743.
- YI, X.; FANG, C.; COOPER, J. **Strain Sensing through a Passive Wireless Sensor Array**. 20th Analysis and Computation Specialty Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 117-126.
- ZUFFANELLI, S.; AGUILA, P.; ZAMORA, G. A High-Gain Passive UHF-RFID Tag with Increased Read Range. **sensors**, v. 16, p. 8, Julho 2016.



## APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR I.

Deformação (µm)	0,00	733,33	1409,52	1971,43	2238,10	2752,38	3195,24	3638,10	4457,14	5209,52	5695,24	6266,67	8476,19
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
<b>Medida</b>													
1	895,05	895,32	895,07	894,89	894,95	894,94	894,95	894,44	894,30	894,64	893,95	892,60	892,39
2	895,15	895,08	895,15	894,78	894,81	894,85	895,07	894,31	894,31	894,46	893,88	892,44	892,53
3	895,21	895,24	895,20	894,88	894,79	894,78	894,37	894,33	894,28	894,42	893,94	892,42	892,26
4	895,17	895,25	895,17	894,85	894,91	894,99	894,51	894,26	894,29	894,51	893,94	892,44	892,48
5	895,12	895,05	894,93	894,80	894,89	894,80	894,59	894,28	894,29	894,47	893,68	892,58	892,32
6	895,12	895,27	895,11	894,74	894,87	894,88	894,37	894,32	894,39	894,48	893,70	892,50	892,28
7	895,26	895,20	895,01	894,72	894,89	894,76	894,52	894,25	894,28	894,50	893,91	892,44	892,54
8	895,23	895,22	895,07	894,89	894,97	894,73	894,58	894,27	894,32	894,59	893,75	892,46	892,27
9	895,10	895,23	894,98	894,89	894,77	894,99	894,58	894,43	894,37	894,36	893,74	892,63	892,35
10	895,31	895,34	895,10	894,80	894,87	894,98	894,44	894,46	894,41	894,70	893,76	892,64	892,49
<b>Média</b>	895,17	895,22	895,08	894,82	894,87	894,87	894,60	894,34	894,32	894,51	893,83	892,52	892,39
<b>Desvio Padrão</b>	0,0800	0,0926	0,0858	0,0648	0,0656	0,1006	0,2334	0,0793	0,0481	0,1027	0,1086	0,0878	0,1106

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-A.

Deformação (µm)	0	114,29	364,80	651,89	949,03	1243,43	1532,34	1794,74	2031,54	2258,29	2493,26	2698,97	2922,06	3120,46	3405,71	3634,29
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
<b>Média</b>																
1	917,58	917,60	917,49	917,45	916,82	916,03	916,07	916,07	915,1	915,08	914,86	914,57	914,28	914,21	913,98	913,82
2	917,64	917,62	917,53	917,46	916,46	915,99	915,98	915,98	915,11	915,03	914,76	914,55	914,31	914,20	914,18	913,74
3	917,67	917,65	917,63	917,47	916,56	916,00	916,01	916,01	915,14	915,00	914,93	914,55	914,31	914,21	913,99	913,77
4	917,66	917,69	917,58	917,52	916,36	916,03	915,99	915,99	915,11	915,06	914,85	914,62	914,32	914,21	914,01	913,80
5	917,66	917,64	917,60	917,43	916,34	915,96	915,99	915,99	915,10	915,000	914,87	914,63	914,30	914,25	914,04	913,72
6	917,69	917,62	917,60	917,54	916,28	915,96	916,01	916,01	915,14	915,02	914,92	914,64	914,34	914,20	914,04	913,81
7	917,67	917,62	917,59	917,45	916,22	916,06	916,04	916,04	915,11	915,08	914,80	914,56	914,35	914,15	914,05	913,92
8	917,68	917,64	917,59	917,47	916,19	915,98	915,94	915,94	915,13	915,07	914,81	914,50	914,15	914,15	914,09	913,88
9	917,67	917,62	917,62	917,51	916,30	916,07	916,03	916,03	915,06	915,06	914,88	914,64	914,23	914,17	914,000	913,80
10	917,67	917,64	917,58	917,49	916,37	915,92	916,05	916,05	915,10	914,97	914,88	914,61	914,35	914,24	913,98	913,84
11	917,68	917,61	917,56	917,46	916,49	916,06	916,04	916,04	915,11	915,00	914,80	914,56	914,27	914,19	914,05	913,92
12	917,68	917,63	917,58	917,55	916,33	916,01	915,99	915,99	915,14	915,01	914,80	914,50	914,39	914,19	914,09	913,82
13	917,69	917,62	917,59	917,51	916,22	916,14	916,04	916,04	915,14	915,02	914,83	914,48	914,36	914,23	914,03	913,83
14	917,67	917,61	917,54	917,48	916,29	915,97	916,04	916,04	915,12	914,94	914,92	914,56	914,39	914,23	914,04	913,86
15	917,66	917,63	917,57	917,47	916,33	916,05	916,03	916,03	915,13	914,96	914,9	914,52	914,37	914,13	913,99	913,90
<b>Média</b>	917,66	917,63	917,58	917,48	916,37	916,02	916,02	916,02	915,12	915,02	914,85	914,57	914,31	914,20	914,04	913,83
<b>Desvio Padrão</b>	0,0267	0,0215	0,0356	0,0350	0,1608	0,0558	0,0337	0,0337	0,0220	0,0438	0,0523	0,0526	0,0640	0,0349	0,0531	0,0602

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE C - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-B.

Deformação (µm)	0	370,15	684,92	986,77	1274,77	1551,69	1811,08	2013,23	2179,38	2331,69	2447,08	2608,77	2896,62	3008,31	3164,31
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
<b>Média</b>															
1	909,78	909,33	909,01	908,77	908,96	908,08	908,21	908,00	907,79	907,82	908,06	909,07	909,55	907,98	908,60
2	909,71	909,35	908,97	908,69	908,92	908,16	908,39	908,16	907,78	907,85	908,06	909,33	909,77	907,93	908,55
3	909,68	909,35	908,87	908,73	908,20	908,16	908,67	908,07	907,86	908,24	907,98	909,43	909,58	908,17	908,51
4	909,65	909,55	909,14	908,83	908,11	908,24	908,62	908,18	907,81	908,11	907,99	909,41	909,65	908,04	908,53
5	909,86	909,41	909,21	908,80	908,08	908,17	908,55	908,20	907,93	907,96	907,89	909,49	909,45	908,01	908,86
6	909,89	909,42	909,07	908,84	908,30	908,38	908,56	907,96	907,77	908,02	908,00	909,41	909,66	908,21	908,21
7	909,65	909,31	909,09	908,59	908,63	908,22	908,53	908,21	907,85	907,98	908,22	909,62	909,62	907,93	908,38
8	909,73	909,37	909,12	908,59	908,39	908,30	908,54	908,10	907,90	907,94	907,99	909,59	909,64	908,11	908,56
9	909,69	909,39	909,16	908,70	908,27	908,42	908,44	908,08	907,87	907,94	908,07	909,50	909,77	908,28	908,53
10	909,64	909,46	909,20	908,60	908,19	908,14	908,46	908,02	907,91	908,03	908,05	909,48	909,71	908,21	908,69
11	909,67	909,47	909,16	908,70	908,10	908,59	908,38	908,17	907,77	907,98	908,04	909,22	909,75	908,29	908,72
12	909,60	909,45	909,18	908,79	908,16	908,41	908,44	908,19	908,02	908,02	908,12	909,21	909,64	908,09	908,84
13	909,52	909,36	909,18	908,89	908,14	908,41	908,19	908,14	907,67	908,04	908,13	909,20	909,84	907,96	908,81
14	909,60	909,59	909,20	908,69	908,12	908,38	908,28	908,14	907,85	908,15	908,24	909,18	909,78	908,17	908,88
15	909,55	909,38	909,22	908,70	908,13	908,31	908,22	908,14	907,74	908,13	908,30	909,30	909,69	908,15	909,09
<b>Média</b>	909,68	909,41	909,12	908,73	908,31	908,29	908,43	908,12	907,83	908,01	908,08	909,36	909,67	908,10	908,65
<b>Desvio Padrão</b>	0,1031	0,0796	0,1008	0,0925	0,2913	0,1400	0,1523	0,0769	0,0869	0,1115	0,1101	0,1625	0,1017	0,1221	0,2227

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE D - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR II-C.

Deformação (µm)	0	376,39	696,92	999,69	1290,92	1568,77	1844,77	2081,31	2291,77	2478,92	2639,31	2821,62	2997,00	3144,23	3145,15
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
<b>Média</b>															
1	916,12	915,92	916,00	915,76	915,45	915,42	915,20	915,33	915,21	915,25	915,34	915,27	915,65	915,57	915,80
2	915,99	916,27	916,09	915,75	915,52	915,47	915,42	915,31	915,29	915,24	915,42	915,60	915,72	915,57	915,68
3	916,03	915,93	915,75	915,71	915,47	915,37	915,28	915,38	915,19	915,22	915,29	915,38	915,65	915,59	915,73
4	915,92	915,87	915,81	915,86	915,35	915,45	915,29	915,29	915,18	915,31	915,32	915,14	915,53	915,51	915,76
5	916,10	916,05	916,00	915,81	915,36	915,30	915,33	915,59	915,36	915,48	915,13	915,49	915,56	915,57	915,63
6	916,02	916,10	915,98	915,68	915,48	915,35	915,28	915,41	915,33	915,39	915,24	915,59	915,63	915,68	915,69
7	916,09	915,94	915,89	915,82	915,47	915,35	915,22	915,44	915,38	915,29	915,20	915,46	915,66	915,42	915,57
8	916,04	916,06	916,08	915,71	915,48	915,32	915,47	915,38	915,22	915,48	915,40	915,53	915,56	915,62	915,59
9	916,04	916,01	916,03	915,71	915,37	915,39	915,13	915,37	915,14	915,40	915,28	915,63	915,49	915,67	915,67
10	916,07	916,17	915,89	915,75	915,59	915,43	915,31	915,12	915,17	915,40	915,34	915,66	915,85	915,63	915,69
11	916,12	915,99	915,91	915,75	915,57	915,44	915,37	915,37	915,28	915,27	915,27	915,44	915,94	915,74	915,68
12	916,04	915,99	916,12	915,88	915,68	915,34	915,45	915,32	915,47	915,35	915,36	915,62	915,43	915,37	915,55
13	916,11	916,03	916,01	915,56	915,43	915,54	915,52	915,29	915,43	915,43	915,47	915,64	915,49	915,81	915,54
14	916,18	916,28	916,02	915,74	915,58	915,53	915,38	915,39	915,26	915,27	915,52	915,42	915,69	915,58	915,41
15	915,93	916,19	916,09	915,82	915,60	915,39	915,55	915,20	915,38	915,45	915,27	915,68	915,37	915,80	915,83
<b>Média</b>	916,05	916,05	915,98	915,75	915,49	915,41	915,35	915,35	915,29	915,35	915,32	915,50	915,61	915,61	915,65
<b>Desvio Padrão</b>	0,0713	0,1261	0,1077	0,0794	0,0966	0,0719	0,1203	0,1065	0,1020	0,0901	0,1020	0,1550	0,1514	0,1230	0,1097

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE E - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-A.

Deformação (µm)	0	355,39	674,77	980,31	1269,23	1548,92	1815,69	2043,69	2242,15	2424,00	2568,00	2702,77	2868,00	3001,85	3166,15
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
<b>Média</b>															
1	910,34	910,12	910,11	909,78	909,53	909,73	909,32	909,51	909,35	909,26	909,18	909,10	908,87	908,97	908,79
2	910,28	909,94	910,01	909,86	909,91	909,57	909,55	909,30	909,09	909,30	909,22	909,18	909,17	908,99	908,94
3	910,27	910,09	910,02	909,91	909,70	909,77	909,35	909,22	909,24	909,34	909,19	909,24	909,25	908,91	908,83
4	910,37	910,27	910,00	909,94	909,75	909,69	909,41	909,30	909,21	909,38	909,27	909,16	909,14	908,95	908,92
5	910,15	910,15	910,04	909,83	909,86	909,70	909,35	909,28	909,35	909,34	909,03	909,08	908,91	908,91	908,85
6	910,23	910,27	910,01	909,93	909,71	909,70	909,61	909,22	909,05	909,34	909,10	909,10	909,06	909,09	908,88
7	910,29	910,12	910,10	909,95	909,81	909,56	909,27	909,42	909,28	909,44	909,22	909,17	909,15	909,01	908,92
8	910,18	910,16	910,13	910,01	909,76	909,61	909,41	909,23	909,23	909,34	909,14	909,11	909,11	908,96	908,73
9	910,14	910,21	910,10	909,76	909,69	909,67	909,55	909,19	909,31	909,35	909,29	908,98	909,12	909,04	908,79
10	910,15	910,15	910,06	909,84	909,72	909,57	909,37	909,25	909,13	909,31	909,37	909,18	909,03	909,01	908,84
11	910,22	910,20	910,03	909,95	909,63	909,68	909,36	909,18	909,16	909,33	909,03	909,09	908,97	908,91	908,79
12	910,22	910,14	910,22	909,65	909,87	909,54	909,34	909,47	909,12	909,47	909,15	909,03	909,07	909,00	909,03
13	910,14	910,22	910,07	909,76	909,84	909,69	909,28	909,31	908,99	909,37	909,05	909,23	909,04	908,80	908,81
14	910,32	910,24	910,04	909,87	909,73	909,62	909,25	909,31	909,30	909,34	909,12	909,14	909,12	909,00	908,73
15	910,37	910,14	909,89	909,96	909,88	909,45	909,46	909,15	909,05	909,36	909,15	908,95	909,00	908,94	908,78
<b>Média</b>	910,24	910,16	910,06	909,87	909,76	909,64	909,39	909,29	909,19	909,35	909,17	909,12	909,07	908,97	908,84
<b>Desvio Padrão</b>	0,0826	0,0827	0,0741	0,0977	0,1040	0,0858	0,1080	0,1054	0,1162	0,0514	0,0973	0,0836	0,1012	0,0684	0,0832

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE F - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-B.

Deformação (µm)	0,00	365,54	682,15	987,69	1278,46	1557,23	1824,92	2057,54	2252,31	2429,54	2576,31	2757,23	2893,85	3017,54	3167,08
Deslocamento (µm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
<b>Média</b>															
1	908,69	908,76	908,69	908,38	908,05	908,09	907,83	908,00	907,44	907,37	907,56	907,25	907,22	907,08	907,18
2	908,79	908,69	908,62	908,26	908,16	908,13	907,83	907,78	907,31	907,50	907,26	907,27	907,16	907,34	907,12
3	908,60	908,57	908,67	908,35	908,29	908,04	907,83	907,69	907,49	907,42	907,15	907,43	907,18	907,34	906,95
4	908,68	908,68	908,50	908,50	908,25	908,14	907,99	907,75	907,40	907,29	907,37	907,64	907,42	907,21	907,02
5	908,58	908,59	908,45	908,31	908,33	907,92	907,88	907,84	907,47	907,40	907,67	907,45	907,22	907,22	907,17
6	908,54	908,58	908,56	908,47	908,27	907,98	907,90	907,66	907,29	907,47	907,39	907,60	907,38	907,13	907,16
7	908,79	908,74	908,57	908,38	908,22	908,09	907,73	907,78	907,42	907,33	907,18	907,52	907,41	907,17	907,11
8	908,71	908,65	908,51	908,46	908,15	908,01	907,88	907,70	907,39	907,26	907,54	907,32	907,34	907,06	906,94
9	908,81	908,69	908,55	908,36	908,37	908,01	907,97	907,63	907,47	907,37	907,45	907,35	907,23	907,20	907,25
10	908,77	908,63	908,41	908,51	908,25	907,89	907,91	907,74	907,38	907,48	907,36	907,40	907,21	907,16	907,20
11	908,55	908,64	908,51	908,50	908,09	908,02	907,81	907,71	907,32	907,53	907,31	907,39	907,11	907,17	907,07
12	908,83	908,72	908,51	908,31	908,35	908,04	907,86	907,74	907,52	907,58	907,36	907,50	907,20	907,21	907,02
13	908,68	908,66	908,50	908,35	908,18	907,88	907,71	907,75	907,51	907,44	907,43	907,36	907,31	906,87	907,06
14	908,86	908,66	908,40	908,35	908,33	907,83	907,86	907,71	907,26	907,63	907,31	907,28	907,34	907,26	907,16
15	908,76	908,70	908,71	908,26	908,28	907,90	907,96	907,87	907,54	907,41	907,39	907,26	907,23	907,31	907,13
<b>Média</b>	908,71	908,66	908,54	908,38	908,24	908,00	907,86	907,76	907,41	907,43	907,38	907,40	907,26	907,18	907,10
<b>Desvio Padrão</b>	0,1040	0,0563	0,0950	0,0852	0,0954	0,0959	0,0794	0,0919	0,0885	0,1030	0,1383	0,1223	0,0955	0,1201	0,0909

Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE G - DADOS EXPERIMENTAIS SENSOR III-C.

Deformação (µm)	0,00	380,31	704,31	1016,31	1315,39	1606,15	1884,92	2136,00	2358,46	2565,23	2745,23	2989,85	3145,85	3312,92	3543,69
Deslocamento (µm)	0,00	200,00	400,00	600,00	800,00	1000,00	1200,00	1400,00	1600,00	1800,00	2000,00	2200,00	2400,00	2600,00	2800,00
<b>Média</b>															
1	908,69	908,53	908,55	908,13	908,41	907,96	908,23	907,88	907,92	907,95	907,82	907,60	907,67	907,04	907,10
2	908,84	908,70	908,38	908,38	908,37	908,13	908,06	907,99	907,83	907,58	907,71	907,81	907,72	907,14	907,13
3	908,83	908,67	908,48	908,27	908,32	908,10	908,08	907,71	907,84	907,75	907,74	907,83	907,70	907,02	907,18
4	908,99	908,76	908,62	908,31	908,44	908,30	908,19	908,21	907,83	907,82	907,76	907,85	907,62	907,13	907,22
5	908,83	908,68	908,40	908,44	908,36	908,17	908,18	907,98	907,77	907,80	907,81	907,63	907,62	907,11	907,24
6	909,00	908,85	908,54	908,37	908,45	908,15	908,22	907,85	907,54	907,96	907,84	907,90	907,59	907,34	907,08
7	908,80	908,59	908,46	908,50	908,35	908,03	908,18	908,03	907,83	907,64	907,98	907,91	907,44	907,15	907,05
8	908,82	908,81	908,46	908,36	908,39	908,18	908,33	907,89	907,58	907,68	907,67	907,49	907,58	906,79	907,34
9	908,83	908,65	908,63	908,46	908,36	908,17	908,06	908,06	907,74	907,76	907,76	907,78	907,51	907,21	907,28
10	908,64	908,66	908,54	908,42	908,31	908,14	908,18	907,95	907,98	907,61	907,81	907,71	907,42	907,03	907,04
11	909,13	908,71	908,41	908,28	908,03	908,20	908,33	908,13	907,83	907,76	907,69	907,79	907,56	907,10	907,13
12	908,88	908,54	908,45	908,42	908,41	907,94	908,14	907,82	907,74	907,80	907,87	907,76	907,41	907,16	907,05
13	908,83	908,66	908,35	908,30	908,44	908,13	908,25	907,93	907,91	907,77	907,64	907,78	907,51	906,86	906,94
14	908,84	908,72	908,50	908,69	908,47	907,96	908,20	908,01	907,87	907,64	907,70	907,60	907,48	907,11	906,91
15	908,71	908,72	908,56	908,50	908,33	908,18	908,14	907,93	907,93	907,82	907,91	907,73	907,62	907,18	906,90
<b>Média</b>	908,84	908,68	908,49	908,39	908,36	908,12	908,18	907,96	907,81	907,76	907,78	907,74	907,56	907,09	907,11
<b>Desvio Padrão</b>	0,1240	0,0880	0,0844	0,1291	0,1045	0,1015	0,0829	0,1246	0,1221	0,1123	0,0947	0,1196	0,0990	0,1343	0,1316

Fonte: Autor (2017).