



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de sensor micro maquinado para  
medição de forças***

**David Filipe de Sousa Caseiro**

Leiria, *Outubro de 2013*



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de sensor micro maquinado para  
medição de forças***

**David Filipe de Sousa Caseiro**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Ferreira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Engenheiro Sérgio Santos, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Outubro de 2013*

***À Minha Família, Namorada e Amigos***

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ***Agradecimentos***

---

Neste trabalho tive o prazer de ter várias pessoas que me ajudaram, contribuindo significativamente para um trabalho de maior qualidade e para todas elas vai o meu agradecimento.

Os meus primeiros agradecimentos vão para os meus dois orientadores: Professor Carlos Ferreira e Professor Sérgio Santos, que me acompanharam ao longo de toda a tese. Agradeço todo o empenho, disponibilidade e tempo que me foi dispendido assim como todo o conhecimento que me transmitiram. Agradeço ainda o facto de me darem forças e motivação face às muitas adversidades encontradas no trabalho.

Agradeço aos responsáveis técnicos do Laboratório de Engenharia Automóvel, Engenheiro Nuno Pires e Engenheiro Diogo Costa, pela valiosa ajuda na parte prática do trabalho, ajuda esta fulcral para a concretização correta de algumas operações.

Agradeço ao responsável técnico do Laboratório de Engenharia Mecânica, Engenheiro Carlos Dias, pela sua colaboração no fabrico dos amplificadores. Sem o seu conhecimento técnico não teria sido possível produzir os mesmos.

Agradeço a todos os docentes que de uma maneira ou de outra contribuíram para o sucesso do trabalho, nomeadamente ao Professor Doutor Fernando Romeiro, pela ajuda na realização dos ensaios experimentais na máquina de ensaios de tração Introm onde transmitiu o seu conhecimento e experiência neste tipo de ensaios, ao Professor Doutor Carlos Neves no suporte à componente de fabrico dos specimens e ao Professor Doutor Nuno Martinho pela inesgotável disponibilidade quando abordado para discutir alguns processos e análises ao trabalho realizado.

Agradeço ao meu pai, Fernando Caseiro, à minha mãe, Aida Caseiro, e ao meu irmão, Pedro Caseiro, por estarem sempre comigo, pelo seu apoio e por me lembrarem constantemente que eu consigo atingir os objetivos a que me proponho.

Agradeço à minha namorada, Ana Poim, por todo o apoio que me facultou durante a totalidade do trabalho, e especialmente nas suas partes mais difíceis em que mais presente se mostrou e mais forças me deu para continuar.

Agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo deste ano de trabalho, por acreditarem em mim, e por manterem a minha motivação sempre alta, nomeadamente ao Engenheiro Rui Lopes, que se mostrou sempre disposto a ajudar e ao Engenheiro Ruben Santos, pela apoio que facultou. A todos eles um muito obrigado!

Agradeço por fim, mas sem menos importância, ao Instituto Politécnico de Leiria, que disponibilizou meios e recursos para que este projeto fosse possível e à empresa Vyroba Tenzometru A Snimacu que forneceu gratuitamente as amostras de extensómetros semi-condutores.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a concretização deste projeto!

## **Resumo**

---

O Projeto usa cada vez mais técnicas e ferramentas de simulação capazes de prever e dimensionar o comportamento dos materiais para a sua vida útil. Contudo a mudança de condições ou estado faz com que a monitorização dos materiais nas condições de trabalho represente uma adicional garantia de fiabilidade e segurança. Essa monitorização é na maior parte dos casos efetuada por sensores, a sua evolução e miniaturização têm desempenhado um papel fundamental no atual desenvolvimento tecnológico. Nos veículos automóveis a integração de micro sensores é responsável pelos baixos consumos, elevadas performances e níveis de segurança atuais. Neste sentido o principal objetivo deste trabalho é projetar um sensor micro para medição de forças podendo ter inúmeras aplicações nomeadamente em componentes estruturais dos veículos.

A tecnologia escolhida em que é baseado o micro sensor de força, neste projeto, é a da piezoresistividade, conhecida pela sua linearidade, pouca histerese e possibilidade de integrar nos sensores fabricados por micro maquinagem. Recorre-se ao software “Ansys Multiphysics” para o desenvolvimento e otimização da geometria deste sensor, respeitando as regras de micro maquinagem (Apêndice I). São testadas algumas geometrias encontradas na bibliografia e realizam-se otimizações de modo a melhorar a sensibilidade ao stress. Como resultado deste trabalho é proposta uma geometria que apresenta uma sensibilidade ao stress de 3.5347 mV/V/MPa. Para verificar o método numérico, recorre-se ao método experimental para testar a funcionalidade da geometria proposta numa escala adaptada à utilização com extensómetros, apresentando-se assim o conceito de amplificador mecânico. Diferentes amplificadores são testados por método numérico e experimental, e no final são comparados os resultados. Comprovando-se assim a funcionalidade do sensor proposto para a medição de forças.

Palavras-chave: amplificador mecânico, linearidade, método experimental, método numérico, micro maquinagem, piezoresistividade, sensibilidade, sensor de força.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ***Abstract***

---

Measuring the integrity of structures or in components is based on continuous monitoring of mechanical behavior status. Sensors are devices that are encharge of obtaining that information. The sensors evolution and miniaturization have played a key role in the current technological development. In vehicles the integration of micro sensors is responsible for low consumption, high performance and increasing passanger safety. In this sense, the main objective of the work is to design a micro sensor for measuring material forces that could be used in to numerous applications including vehicle structural components.

The micro sensor is based on piezoresitivity, known for its low hysteresis and the possibility to integrate the sensors made by micro machining. “Ansys Multiphysics” software was used to development and optimization of the geometry of the sensor, respecting the rules of micro machining (Apêndice I). Some geometries found in the literature are tested and optimization are carried out in order to improve the sensitivity to stress. As a result of this work is proposed a geometry that has sensitivity to the stress of 3.5357 mV/V/MPa. To validate the numerical method refers to the experimental procedure for testing the functionality of the proposed geometry using an appropriate scale for the use with strain gauge, thus introducing the concept of a mechanical amplifier. Different amplifiers are tested by experimental and numerical method and results were compared. The result of this work allowed to prove the functionality of the proposed sensor.

**Key-Words:** mechanical amplifier, linearity, experimental method, numerical method, micro machining, piezoresistivity, sensitivity, force sensor.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## Índice de Figuras

---

Figura 2.1 – Mola sujeita a uma força de compressão com LVDT (a), sensor de força incorporando um sensor de pressão (b) .....	8
Figura 2.2 – Extensómetro de folha metálica .....	10
Figura 2.3 – Efeito do coeficiente de Poisson num bloco rectangular, isotrópico e elástico. Uma força de tração longitudinal resulta na deformação dos dois eixos ortogonais .....	11
Figura 2.4 – Extensómetro semiconductor com compensação de temperatura (os sinais "+" e "-" indicação, respetivamente fatores de gauge positivos e negativos) .....	14
Figura 2.5 – Alavanca integrando um elemento extensómetro. F = força, 1 = alavanca, 2-5 extensómetros em formas de C .....	15
Figura 2.6 – Estrutura de um elemento sensor.....	15
Figura 2.7 – Representação esquemática de um microsensor de binário.....	16
Figura 2.8 – Princípio de uma célula de carga baseada na compressão do silício.....	17
Figura 2.9 – Efeito piezoelétrico: a força aplicada resulta na geração de tensão entre os eléctrodos .....	18
Figura 2.10 – Sensor táctil, piezoelétrico ativo .....	19
Figura 2.11 – Disco ressoador piezoelétrico funcionando como sensor de força diamétrico.....	20
Figura 2.12 – Exemplos de sensores simples de capacidade: (a) placa móvel, (b) área variável e (c) dielétrico móvel .....	21
Figura 2.13 – Sensor de capacidade diferencial.....	22
Figura 2.14 – Sensor de força capacitivo com o princípio de distância variável.....	24
Figura 2.15 – Exemplo de um sistema de deteção com modulação de intensidade simples.....	25
Figura 2.16 – Exemplo de um sistema de medição de posição espacial.....	27
Figura 2.17 – Diagrama de blocos do sensor de ressonância .....	30
Figura 2.18 – Fotografia de um ressoador metálico .....	32
Figura 2.19 – Vista das várias secções nos diferentes passos de fabrico. (a) Deposição da camada de nitreto de silício, (b) deposição e padronização do óxido de alumínio como camada membrana, (c) deposição e padronização do nícrómio como camada piezoresistiva, (d) deposição e padronização de alumínio como camada de contato, (e) deposição de 180 nm de camada de óxido de alumínio para proteger os piezoresistores durante a calcinação e (f) mostra a remoção da poliamida sacrificada.....	34
Figura 2.20 – Circuito força-tensão .....	35
Figura 2.21 – Sensor de força piezoresistivo à base de papel. (A) Vista esquemática do sensor de força com base em papel usando resistor de carbono como componente sensitivo. (B) Processo de fabrico do sensor à base de papel.....	36

Figura 2.22 – Integração monolítica de uma ponte Wheatstone num sensor baseado em papel. (A) Esquema. (B) Fotografia da ponte Wheatstone colocada na base do sensor .....	37
Figura 2.23 – A principal diferença entre as duas tecnologias: Com transdutores à base de extensómetros a sensibilidade depende da capacidade (esquerda); com transdutores piezoelétricos depende apenas do material do cristal usado.....	38
Figura 2.24 – Arranjo dos extensómetros nas vigas elásticas .....	40
Figura 2.25 – Conexões da ponte dos extensómetros .....	41
Figura 2.26 – Estrutura do sensor .....	42
Figura 2.27 – Modelo de deformação do sensor quando aplicada uma força das três orientações	43
Figura 2.28 – Distribuição dos piezoresistores no sensor .....	43
Figura 2.29 – As várias cores são devido ao calor durante projeção da camada isoladora (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) no disco transdutor. Podem ser vistos dois extensómetros semicondutores.....	45
Figura 2.30 – Imagem SEM da estrutura sensitiva. As curvas têm uma largura de aproximadamente 2 µm. A resistência inicial é de cerca de 80 kΩ .....	46
Figura 2.31 – Esquema do sensor de força. Devido à conceção em armaduras o sensor de força apenas deflete na direção "x" .....	47
Figura 2.32 – Força-deflexão característica do sensor ( $k=4.8 \text{ nN}/\mu\text{m}$ ) mostrando uma linearidade para uma larga gama de deformação (aprox. 150 µm). Resolução de deslocamento de 100 nm leva a resoluções de força de aprox. 500 pN.....	48
Figura 3.1 – Geometria recorrendo a alavancas .....	51
Figura 3.2 – Geometria em anel.....	52
Figura 3.3 – Geometria “círculos” (vista de cima).....	52
Figura 3.4 – Geometria “círculos” (vista de baixo).....	53
Figura 3.5 – Curva de <i>stress</i> ao longo do sensor para geometria “círculos” .....	53
Figura 3.6 – Geometria (acima) e respetiva curva para “triângulos” (abaixo).....	55
Figura 3.7 – Geometria (acima) e respetiva curva para “trapézios” (abaixo).....	56
Figura 3.8 – Gráfico do índice de performance para a configuração 1 .....	59
Figura 3.9 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 1.....	59
Figura 3.10 – <i>Stress</i> ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 1.....	60
Figura 3.11 – “Triângulos geometria 1” (esquerda) e “Triângulos geometria 2” (direita).....	61
Figura 3.12 – Gráfico do índice de performance para a configuração 2 .....	62
Figura 3.13 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 2.....	63
Figura 3.14 – <i>Stress</i> ao longo do x da melhor geometria desenvolvida para a configuração 2 .....	63
Figura 3.15 – <i>Stress</i> ao longo do y da melhor geometria desenvolvida para a configuração 2 .....	64
Figura 3.16 – Gráfico do índice de performance para a configuração 3 (parte 1) .....	67
Figura 3.17 – Gráfico do índice de performance para a configuração 3 (parte 2) .....	68
Figura 3.18 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 3.....	69
Figura 3.19 – <i>Stress</i> ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 3.....	70
Figura 3.20 – Gráfico do índice de performance para a configuração 4 .....	73
Figura 3.21 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 4.....	74
Figura 3.22 – <i>Stress</i> ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 4.....	75
Figura 3.23 – Gráfico do índice de performance para a configuração 5 .....	77
Figura 3.24 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 5.....	78
Figura 3.25 – <i>Stress</i> ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 5.....	79

Figura 3.26 – Geometria dividida em diferentes volumes para se obter a convergência .....	81
Figura 3.27 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 1 .....	82
Figura 3.28 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 2 .....	83
Figura 3.29 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 3 .....	84
Figura 3.30 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 4 .....	85
Figura 3.31 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 5 .....	86
Figura 3.32 – Linhas de <i>stress</i> alterando o número de elementos do volume 1 (refinar) .....	87
Figura 3.33 – Frequência 1 da análise modal para diferentes números de elementos finitos.....	88
Figura 3.34 – Frequência 2 da análise modal para diferentes números de elementos finitos.....	89
Figura 3.35 – Geometria 60 x 60 x 30 mm como amplificador .....	91
Figura 3.36 – Geometria 60 x 60 x 8 como amplificador .....	92
Figura 3.37 – Geometria 40 x 40 x 8 como amplificador .....	93
Figura 3.38 – Geometria do sensor alterada.....	94
Figura 3.39 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria 60 x 60 x 8.....	95
Figura 3.40 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria 40 x 40 x 8.....	96
Figura 3.41 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria semelhante à do sensor de força .....	97
Figura 3.42 – Geometria melhorada para ter mais amplificação.....	98
Figura 3.43 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria melhorada .....	99
Figura 3.44 – Gráfico representativo da ampliação com as alterações das características da superfície a colocar .....	100
Figura 3.45 – Ambiente do software "Autodesk Inventor" .....	101
Figura 3.46 – Maquinação na CNC a maquinar a primeira geometria em aço .....	102
Figura 3.47 – Rectificadora para acabamento do amplificador .....	102
Figura 3.48 – Peça 60 x 60 x 30 mm finalizada: A – vista superior; B – vista inferior .....	103
Figura 3.49 – Máquina CNC a maquinar uma das geometrias em alumínio.....	104
Figura 3.50 – Amplificadores acabados e prontos a testar: A – vista superior da geometria 1; B – vista inferior da geometria 1; C – vista superior da geometria 2; D – vista inferior da geometria 2; E – vista superior da geometria 3; F – vista inferior da geometria 3 .....	105
Figura 3.51 – Exemplo de um teste recorrendo ao software "Labview" .....	106
Figura 3.52 – Esquema do diagrama de blocos usado para o teste.....	107
Figura 3.53 – Representação esquemática da montagem experimental .....	108
Figura 3.54 – Teste experimental.....	109
Figura 4.55 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 1 .....	111
Figura 4.56 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para a geometria 1 .....	112
Figura 4.57 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 2 .....	113
Figura 4.58 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para a geometria 2 .....	114
Figura 4.59 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 3 .....	115
Figura 4.60 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para a geometria 3 .....	116
Figura 4.61 – Geometria 3 com extensómetro semi-condutor .....	117

Figura 4.62 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 3 com extensómetro semi-condutor (hipótese 1) .....	120
Figura 4.63 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 3 com extensómetro semi-condutor (hipótese 2) .....	120

## ***Índice de Tabelas***

---

Tabela 2.1 – Fator de gauge para diferentes materiais .....	12
Tabela 2.2 – Desempenho de sensores de ressonância, piezoresistivos e capacitivos .....	29
Tabela 3.1 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 1 .....	58
Tabela 3.2 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 2 .....	62
Tabela 3.3 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 3 (parte 1) .....	66
Tabela 3.4 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 3 (parte 2) .....	67
Tabela 3.5 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 4 .....	72
Tabela 3.6 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 5 .....	76

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ***Nomenclatura***

---

A	Área	[m <sup>2</sup> ]
a	Aceleração	[m/s <sup>2</sup> ]
C	Capacidade	[F]
c	Velocidade da luz no vazio	[m/s]
d	Distância	[m]
d <sub>ij</sub>	Coefficiente de carga	[C/N]
E	Módulo de Young	[MPa]
F	Força	[N]
f	Frequência	[Hz]
GF	Fator de gauge (Gauge factor)	[ ]
I	Momento de inércia de área	[m <sup>4</sup> ]
k	Constante de rigidez elástica da mola	[N/m]
l	Comprimento	[m]
M	Momento fletor	[Nm]
m	Massa	[Kg]
n	Número harmónico	[ ]
Q	Carga eléctrica	[C]
R	Resistência	[Ω]
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação	[ ]
t	Espessura	[m]
V	Volume	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>e</sub>	Tensão eléctrica	[V]
v	Velocidade	[m/s]
w	Largura	[m]
ε	Extensão elástica (strain)	[ ]
ε <sub>0</sub>	Permeabilidade no vazio	[ ]

$\varepsilon_r$	Permeabilidade relativa	[ ]
$\theta$	Rotação	[rad]
$\pi$	Coefficiente piezoresistivo	[ ]
$\rho$	Densidade	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	Resistividade do material	[ $\Omega$ m]
$\sigma$	Tensão mecânica (stress)	[MPa]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	[ ]

#### Abreviaturas

AFM	Atomic Force Microscopy
EBiD	Electron Beam-Induced Deposition
EMC	Environmental and electromagnetic compatibility
EPAS	Electric power-assisted steering
FEM	Finite Element Method
LED	Light emitting diode
LVDT	Linear variable differential transformer
MEMS	Microelectromechanical systems
OT	Optical tweezers
PVDF	Polymer material polyvinylidene fluoride
PZT	Lead zirconate titanate
SOI	Silicon On Insulator
SOS	Silicon-on-sapphire

# Índice

---

DEDICATÓRIA .....	I
AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIII
NOMENCLATURA .....	XV
ÍNDICE .....	XVII
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 PRESENTE CONTRIBUIÇÃO .....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1 SENSORES TÁCTEIS, DE FORÇA E DE TENSÃO MECÂNICA .....	5
2.2 PRINCÍPIO PIEZORESISTIVO .....	9
2.2.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM SENSOR BASEADO NO PRINCÍPIO PIEZORESISTIVO .....	13
2.2.1.1 Dispositivos baseados em silício .....	13
2.3 PRINCÍPIO PIEZOELÉTRICO .....	17
2.3.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM SENSOR BASEADO NO PRINCÍPIO PIEZOELÉTRICO .....	19
2.4 PRINCÍPIO CAPACITIVO .....	21
2.4.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM SENSOR BASEADO NO PRINCÍPIO CAPACITIVO .....	23
2.5 PRINCÍPIO ÓTICO .....	24
2.5.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM SENSOR BASEADO NO PRINCÍPIO ÓTICO .....	28
2.6 PRINCÍPIO DE RESSONÂNCIA .....	29
2.6.1 EXEMPLO DA APLICAÇÃO DE UM SENSOR BASEADO NO PRINCÍPIO DE RESSONÂNCIA .....	31
2.7 OUTROS TIPOS DE SENSORES .....	32
2.8 TENDÊNCIA VERIFICADA .....	32
2.9 ESTADO DA ARTE .....	33
METODOLOGIA .....	49

<b>3.1 SOFTWARE</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE FORÇA</b> .....	<b>50</b>
3.1.1 CONFIGURAÇÃO 1 .....	57
3.1.2 CONFIGURAÇÃO 2 .....	60
3.1.3 CONFIGURAÇÃO 3 .....	65
3.1.4 CONFIGURAÇÃO 4 .....	70
3.1.5 CONFIGURAÇÃO 5 .....	75
3.1.6 ANÁLISE DOS ELEMENTOS FINITOS A USAR .....	79
<b>3.3 DESENVOLVIMENTO DO AMPLIFICADOR MECÂNICO</b> .....	<b>90</b>
3.2.1 CONCEÇÃO.....	101
3.2.2 TESTES PRÁTICOS E RESULTADOS.....	106
<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>111</b>
<b>4.1 RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE</b> .....	<b>111</b>
4.1.1 GEOMETRIA 1.....	111
4.1.2 GEOMETRIA 2.....	112
4.1.3 GEOMETRIA 3.....	114
4.1.4 GEOMETRIA 3 COM EXTENSÓMETRO SEMI-CONDUTOR.....	116
<b>4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS ESPERADOS</b> .....	<b>121</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>125</b>
<b>5.1 CONCLUSÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>125</b>
<b>5.2 TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>127</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>129</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>131</b>
<b>6.1 APÊNDICE I</b> .....	<b>131</b>
<b>6.2 APÊNDICE II</b> .....	<b>134</b>
<b>6.3 APÊNDICE III</b> .....	<b>138</b>
6.3.1 FICHEIRO MAIN .....	138
6.3.2 FICHEIRO GEOMETRY .....	139
6.3.3 FICHEIRO MATPROPS.....	144
6.3.4 FICHEIRO MESHING .....	145
6.3.5 FICHEIRO CONSTRAINTSLOADSFx .....	146
6.3.6 FICHEIRO ANALYSISSTATIC.....	147
6.3.7 FICHEIRO POST_STATICSTRESSFx .....	148
6.3.8 FICHEIRO POST_STATICDISPLACEMENTFx .....	152
6.3.9 FICHEIRO ANALYSISMODAL .....	153
6.3.10 FICHEIRO POST1MODAL.....	154

# ***Introdução***

---

## **1.1 Contexto e motivação**

Ao longo dos últimos anos, a sensibilidade dos sensores aumentou, as dimensões diminuíram, a seletividade aumentou e os preços diminuíram. O que não alterou foram os princípios fundamentais no projeto dos sensores, eles ainda são regidos pelas leis da natureza. É reconfortante o facto das leis da natureza não mudarem com o tempo, apenas o nosso apreço se torna mais refinado. [1]

Um sensor é geralmente definido como um “dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo”. Esta definição é ampla. Na verdade é tão ampla que abrange quase tudo, desde um olho humano a um gatilho de uma pistola. [1]

Devido ao facto da maioria dos estímulos não serem elétricos, desde a entrada até à saída, um sensor pode conter diversos estágios de conversão de energia antes de produzir a saída como sinal elétrico. Por exemplo, a pressão aplicada a um sensor de pressão de fibra ótica, primeiramente resulta numa extensão na fibra que, por sua vez, causa deflexão no índice de refração, resultando numa mudança geral na transmissão ótica e na modulação da densidade fotónica. Para finalizar, o fluxo de fotões é detetado por um fotodíodo e convertido em corrente elétrica. Estes são os denominados sensores complexo. Existem ainda os sensores diretos que conseguem converter diretamente um sinal não elétrico num sinal elétrico. [1]

Em veículos automóveis a integração da eletrónica e de sensores tem vindo a aumentar (seja para medir aceleração, pressão, temperatura, etc.), juntamente com o facto dos micro

sensores possuem boas características (baixos preços, reduzidas dimensões, sensibilidade elevada e facilidade de integração de eletrónica), originando uma aliança necessária entre aspetos. No entanto existe uma lacuna, não existe a integração de sensores para medição direta de força nos veículos. Neste âmbito, é desenvolvido um sensor de força que permitiria, por exemplo, verificar o estado de amortecedores ou mesmo o estado da estrutura, possibilitando novas funcionalidades e otimizações de aspetos tão importantes como a segurança e eficiência do veículo.

Várias são as tecnologias que permitem uma medição de força, e é neste sentido que se baseia a revisão bibliográfica, Capítulo 2 do trabalho, onde se apresentam as várias tecnologias e se seleciona a mais apropriada aos recursos disponíveis.

## **1.2 Objetivos**

O primeiro objetivo do trabalho passa por escolher a tecnologia apropriada em que o sensor de força se baseia. O objetivo principal do trabalho vem de seguida, consistindo na otimização de design para o sensor, geometria e disposição dos extensómetros que o torne o mais sensível possível (parâmetro selecionado para otimizar). É também objetivo deste trabalho a conceção de um macro sensor baseado no design proposto, que pretende, por um lado confirmar os testes obtidos pelo método numérico, e por outro validar a aplicação de um amplificador mecânico.

## **1.3 Presente contribuição**

A elaboração do sensor de força tem em vista um alargamento das possibilidades de utilização de um sensor de força piezoresistivo. Este alargamento advém do facto de maximizarmos um dos parâmetros: a sensibilidade. Ao ser maximizada a sensibilidade conseguem-se novas utilizações deste sensor para forças de mais baixo valor nominal. O parâmetro sensibilidade é obtido abdicando de uma maior gama de utilização do sensor. Com o presente trabalho pretende-se contribuir para a área dos sensores com a adição de um sensor de força micro maquinado de alta sensibilidade. Este sensor, de características:

elevada sensibilidade, pequenas dimensões, baixo custo e possível de fabricar recorrendo às técnicas de fabricação de circuitos integrados, permite novas aplicações, nomeadamente em veículos, levando ao desenvolvimento de novas metodologias de controlo e de diagnóstico que permitem otimizar a eficiência e segurança dos sistemas.

Com a elaboração deste projeto visa-se também contribuir para a indústria de desenvolvimento e para todas as utilizações que requerem extensómetros, onde o parâmetro sensibilidade seja desejado, com a adição de uma estrutura amplificadora mecânica.

## **1.4 Organização do trabalho**

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste numa introdução ao tema do trabalho, contextualizando o problema. São ainda apresentados os objetivos e a presente contribuição. No segundo capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica dando uma visão geral das tecnologias presentes para a medição de forças, assim como alguns exemplos do estado da arte. No terceiro capítulo está descrita a metodologia de trabalho utilizada, desde as configurações encontradas na revisão bibliográfica ao desenho final do sensor, assim como a conceção dos amplificadores mecânicos para análise por método experimental. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, comparando os resultados dos métodos experimental e numérico. No quinto e último capítulo são retiradas as conclusões de todo o trabalho desenvolvido e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ***Revisão da literatura***

---

### **2.1 Sensores tácteis, de força e de tensão mecânica**

Enquanto que a cinemática estuda a posição dos objetos e o seu trajeto, a dinâmica responde à questão “O que causa o movimento?”. A mecânica clássica lida com objetos que se movem a velocidades substancialmente inferiores à velocidade da luz. As partículas que se movem, tais como átomos e elétrões, são alvo de estudo pela mecânica quântica e pela teoria da relatividade. Um problema típico de mecânica clássica é: “Qual é o trajeto de um objeto, com uma determinada massa, carga, momento dipolar e posição sujeito a uma interação com um objeto com determinada massa, carga, momento dipolar e posição?”. A mecânica clássica lida com interação entre macro objetos. [1]

De uma forma geral, o problema foi resolvido por Sir Isaac Newton (1643-1727). Ele desenvolveu a brilhante ideia de Galileo e outros grandes mecânicos. Newton proclamou a sua primeira lei: “Every body persists in its state of rest or of uniform motion in a straight line unless it is compelled to change that state by forces impressed on it.” Também denominada por lei da inércia. Outra maneira de enunciar a lei é: se não existem forças a atuar num corpo a sua aceleração é igual a zero. [1]

Quando uma força é aplicada a um corpo livre, existe uma aceleração na direção da força. A força pode ser definida como um vetor. Newton descobriu que a aceleração “a” é diretamente proporcional à força “F” e inversamente proporcional à massa “m” que é escalar. [1]

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

A equação (1) é conhecida como a segunda lei de Newton, o nome foi dado pelo grande matemático e físico Leonhard Euler em 1752, 65 anos depois da publicação de Newton's Principia. A primeira lei está contida na segunda como um caso especial: quando a força é nula a aceleração também. [1]

A segunda lei de Newton permite estabelecer as unidades mecânicas. Em unidades SI temos massa (kg), comprimento em (m) e tempo (s) como unidades básicas. A força e a aceleração são unidades derivadas. A unidade de força pode ser traduzida como a força necessária para acelerar 1 kg de massa até à aceleração de  $1 \text{ m/s}^2$ , a unidade é denominada de Newton. [1]

A terceira lei de Newton estabelece o princípio de interação mútua entre dois corpos: “To every action there is always opposed an equal reaction; or, the mutual actions of two bodies upon each other are always equal, and directed to contrary parts.” [1]

Nas medições de engenharia é frequentemente necessário saber a densidade de um meio, que é a quantidade de matéria por unidade de volume. A densidade pode ser definida através da massa “m” e do volume “V” pela equação (2).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

A unidade de densidade é  $\text{kg/m}^3$ . A força é uma das principais unidades quantitativas em física. Sempre que a pressão é medida é necessária a medição da força. Geralmente a força é medida quando se trabalha com sólidos e trabalha-se com a pressão quando se lida com fluidos. A força é considerada quando é aplicada num ponto e a pressão é medida quando a força é distribuída por uma área considerável. [1]

Os sensores de força podem ser divididos em duas classes: quantitativos e qualitativos. Os sensores quantitativos medem a força realmente e representam-na na forma de sinal elétrico. Exemplos destes sensores são extensómetros e células de carga. Os sensores qualitativos são os dispositivos com limiar que não são projetados para apresentar com

fidelidade o valor de força. A sua função é meramente indicativa se a força foi suficientemente aplicada, isto é, o sinal de saída indica se a magnitude da força excedeu o valor de limiar predefinido ou não. Um exemplo deste tipo de detetores é o teclado do computador, em que cada tecla faz contacto apenas quando é pressionada com uma determinada força. Os sensores de força qualitativos são frequentemente utilizados para deteção de movimento e posição. Os vários métodos de medição de forças podem ser categorizados quanto ao tipo: [1]

1. Fazendo atuar a força desconhecida sobre a força gravitacional e uma massa padrão;
2. Medindo a aceleração de uma massa conhecida à qual a força é aplicada;
3. Fazendo atuar a força sobre uma força desenvolvida electro-magneticamente;
4. Convertendo a força para uma pressão de um fluido e medindo essa pressão;
5. Medindo a tensão produzida, numa membrana elástica, pela força desconhecida.

Nos sensores atuais, o mais frequentemente usado é o método 5, os métodos 3 e 4 são usados ocasionalmente. [1]

Na maioria dos sensores, a força não é diretamente convertida para um sinal elétrico. Alguns passos intermédios são usualmente necessários, fazendo com que os sensores de força sejam sensores complexos. Tendo isto em conta, alguns sensores de força são fabricados combinando um conversor de força para deslocamento e um sensor de posição. Este conversor pode ser uma simples mola, em que a compressão “ $x$ ” pode ser definida através do constante elástica “ $k$ ” para uma determinada força de compressão “ $F$ ” segundo a equação (3).

$$F = k \times x \quad (3)$$

O sensor da Figura 2.1a é composto por uma mola e um sensor de deslocamento LVDT (linear variable differential transformer). Durante a compressão da mola o LVDT produz uma tensão mecânica diretamente proporcional à força aplicada. Um sensor similar pode ser construído com outros tipos de molas e sensores de pressão, tal como mostrado na Figura 2.1b. O sensor de pressão pode ser combinado com um armazenamento de fluido onde é sujeito à pressão. O fluido funciona como um conversor de força-pressão distribuindo a força de entrada sobre uma membrana de pressão. [1]

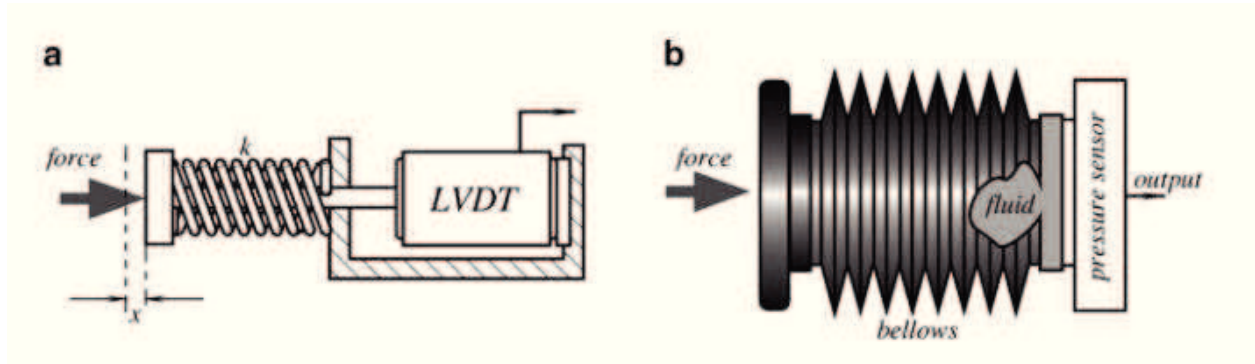


Figura 2.1 – Mola sujeita a uma força de compressão com LVDT (a), sensor de força incorporando um sensor de pressão (b)

Num mundo altamente industrializado, a força está entre as quantidades mensuráveis mais importantes. Os sensores de força podem ter um alcance de mais de 10 kN a menos de 1  $\mu$ N. A precisão da medição pode ser muito variada desde 5 % até melhor do que 0.01 % em toda a largura de escala, dependendo da aplicação. Histerese e efeitos não lineares nas estruturas mecânicas devem ser o mais reduzidos possíveis e a resolução da medição, o mais alta possível. Os sensores precisam de ser robustos para suportar condições adversas, tais como temperatura, vibração e humidade (facilmente encontradas no ramo automóvel), e devem ainda fornecer medições fiáveis durante longos períodos de tempo. Os dispositivos devem ter uma frequência e respostas transientes adequadas de modo a estar compatível com a rapidez de alteração da força. [2]

Existem muitos métodos para medir força. Usualmente, a força é medida convertendo-a numa alteração de comprimento de um elemento mola. A alteração nas dimensões é medida pelo sensor, por exemplo, um piezoresistivo, um capacitivo ou um sensor de ressonância. [2]

A maior parte dos dispositivos de força utilizam a antiga e fiável tecnologia de extensómetros. Infelizmente, os extensómetros metálicos são relativamente insensíveis de tal forma que é normal obter apenas alguns milivolt de tensão elétrica analógica antes de ser amplificada, não podendo ser significativamente sobrecarregados. A largura de escala e a capacidade de suportar a carga são grandes restrições. Além disso estes dispositivos consomem relativamente grande energia (exemplo: 250 mW). [2]

No geral, a instrumentação da medição precisa de dispositivos sensoriais menores e de menor consumo de potência com grande largura de escala e capacidade de suportar cargas. Ter uma boa compatibilidade com dispositivos digitais é altamente desejável. Por vezes é necessária a não existência de contacto e operações wireless e, em alguns casos, dispositivos com fontes de energia através de baterias. A produção de dispositivos usando extensómetros metálicos necessita usualmente de grande maquinaria qualificada, podendo necessitar de processos de calibração relativamente ineficientes. [2]

Nos últimos anos os construtores de sensores de força têm vindo a diminuir o uso de extensómetros, existindo já construtores a usar tecnologia de ressonância metálica e de quartzo, enquanto que companhias mais pequenas estabelecem nichos de mercado recorrendo à tecnologia SAW (surface acoustic wave), tecnologia ótica e tecnologia magneto-elétrica. [2]

Surgem desenvolvimentos para melhorar a construção dos dispositivos e também a sensibilidade e a robustez da operação. Medições em estruturas mais duras com níveis de tensão muito inferiores são atualmente possíveis. [2]

## **2.2 Princípio Piezoresistivo**

A palavra piezoresistividade vem da palavra grega “piezin” que significa “pressionar”. É um efeito apresentado por vários materiais que exigem uma alteração na resistividade devido à pressão aplicada. Este efeito foi descoberto por Lord Kelvin em 1856, que observou que a resistência dos fios de cobre e de ferro aumentava quando sujeitos a tensão. Ele observou ainda que os fios de ferro apresentavam uma maior alteração de resistência do que os de cobre. A primeira aplicação do efeito piezoresistivo não apareceu até aos anos 1930, cerca de 75 anos depois da descoberta de Lord Kelvin. Em vez de usar fios de metal, os extensómetros são geralmente feitos a partir de uma folha fina de metal montada numa película de suporte, que pode ser colada a uma superfície. Um extensómetro típico de metal é representado na Figura 2.2. [2]

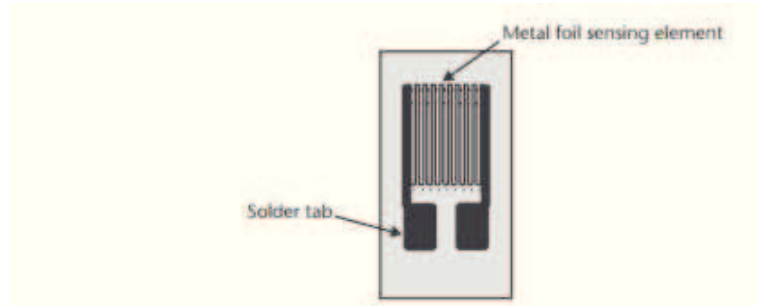


Figura 2.2 – Extensômetro de folha metálica

A sensibilidade de um extensômetro é geralmente referida como fator de gauge. Esta é uma grandeza adimensional e é dada pela equação (4). [2]

$$GF = \frac{\text{variação relativa na resistência}}{\text{extensão aplicada}} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde “R” é a resistência inicial do extensômetro e “ $\Delta R$ ” é a variação de resistência. O termo “ $\Delta L/L$ ” é, por definição, a extensão aplicada e é denotado como “ $\varepsilon$ ” (adimensional). Para todos os materiais elásticos existe uma relação entre a tensão mecânica “ $\sigma$ ” ( $\text{N/m}^2$ ) e a extensão “ $\varepsilon$ ”, isto é, obedecem à lei de Hooke deformando linearmente com a força aplicada. A constante de proporcionalidade é o módulo de elasticidade ou módulo de Young do material e é dado pela equação (5). [2]

$$\text{Módulo de Young, } E = \frac{\text{Tensão}}{\text{Extensão}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (5)$$

O módulo de Young do silício é de 190 GPa ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ), que é perto do valor para o aço inoxidável típico (cerca de 200 GPa). Para um dado material, quanto maior o valor do módulo de Young, menor é a deformação para a tensão mecânica aplicada. [2]

Quando um material elástico é sujeito a uma força ao longo do seu eixo, também deforma ao longo dos eixos ortogonais. Por exemplo, se um bloco rectangular de um material é esticado ao longo do seu comprimento, a sua largura e espessura diminuem. Por outras palavras, uma tensão de tração ao longo do comprimento vai resultar numa tensão de compressão nas direcções ortogonais. Tipicamente, as tensões axiais e transversais irão diferir e o rácio entre os dois é conhecido pelo coeficiente de Poisson, “ $\nu$ ”. A maioria dos

materiais elásticos têm um coeficiente de Poisson de 0.3 (0.22 para silício). O efeito do bloco rectangular é representado na Figura 2.3. A tensão ao longo do comprimento, largura e espessura é denotada, respetivamente, por:  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_t$ . [2]

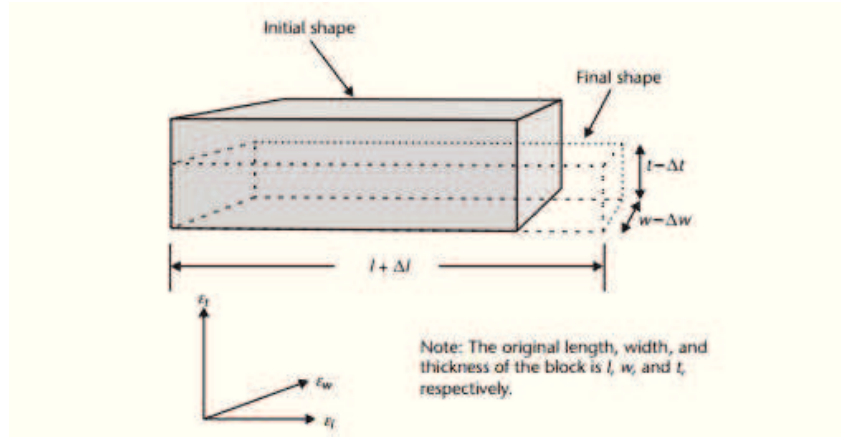


Figura 2.3 – Efeito do coeficiente de Poisson num bloco rectangular, isotrópico e elástico. Uma força de tração longitudinal resulta na deformação dos dois eixos ortogonais

É assumido que o bloco é feito de material resistivo, e a sua resistência “R”, é dada pela equação (6). [2]

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (6)$$

Onde “ $\rho_m$ ” é a resistividade do material ( $\Omega\text{cm}$ ), “l” é o comprimento, e “A” é a área de secção transversal, isto é, o produto da largura “w” pela espessura “t”, dado pela equação (7). [2]

$$R = \frac{\rho_m \times l}{w \times t} \quad (7)$$

Podendo o fator de gauge ser dado pela equação (8).

$$GF = \frac{dR/R}{\varepsilon_l} = \frac{d\rho_m/\rho_m}{\varepsilon_l} + (1 + 2\nu) \quad (8)$$

Da equação (8) temos claramente dois efeitos distintos, que contribuem para o efeito de gauge. O primeiro termo é o efeito piezoresistivo  $\frac{d\rho_m/\rho_m}{\varepsilon_l}$  e o segundo  $(1 + 2\nu)$  é o efeito geométrico. Sendo o coeficiente de Poisson usualmente entre 0.2 e 0.3, a contribuição do fator de gauge pelo efeito geométrico faz variar entre 1.4 e 1.6. Sensores que mostram uma

alteração na resistência como resultado de uma tensão aplicada são geralmente denominados de extensômetros. Aqueles em que o efeito piezoresistivo é dominante são usualmente referidos como piezoresistivos. A Tabela 2.1 mostra que materiais diferentes podem ter fatores de gauge muito diferentes. [2]

Tabela 2.1 – Fator de gauge para diferentes materiais

Material	Fator de Gauge
Extensômetro metálico	2 - 5
Película fina de metal	2
Silício monocristalino	-12.5 to +200
Silício policristalino	± 30
Resistência fina	10

Assim, para um extensômetro metálico, o efeito geométrico domina sobre o efeito piezoresistivo, enquanto que para um semicondutor é exatamente o contrário. [2]

Extensômetros de semicondutores possuem um fator de gauge muito elevado. O silício tipo “P” tem um fator de até 200 tendo o silício tipo “n” um fator até valores negativos de -125. A polaridade negativa do fator de gauge indica que a resistência diminui com o aumento da tensão aplicada. Para além disso, além de ter uma grande sensibilidade à tensão mecânica, extensômetros de semicondutores são muito sensíveis à temperatura. Assim, é usual recorrer a métodos de compensação de temperatura quando se recorrem a extensômetros semicondutores. [2]

Essencialmente, as transferências efetivas dos portadores de carga são afetadas pela tensão aplicada. Com materiais do tipo “p”, a mobilidade das lacunas diminui e, conseqüentemente, a resistividade aumenta. Para materiais do tipo “n”, a mobilidade efetiva dos elétrons aumenta e, portanto, a resistividade diminui com a tensão aplicada. O efeito é altamente dependente da orientação. Se o efeito geométrico do extensômetro semicondutor for desprezado, então a alteração fracionária na resistividade é dada pela equação (9). [2]

$$\frac{d\rho_m}{\rho_m} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (9)$$

Onde  $\pi_l$  e  $\pi_t$  são os coeficientes piezoresistivos longitudinais e transversais e  $\sigma_l$  e  $\sigma_t$  são as tensões correspondentes. O sentido longitudinal é definido como paralelo ao fluxo de corrente no piezoresistor, enquanto que o transversal é ortogonal a este. Os dois coeficientes dependem da orientação do cristal, da dopagem (tipo “p” ou tipo “n”) e concentração. O coeficiente de temperatura na piezoresistividade é cerca de 0.25 %/°C em ambas as direções. [2]

Os adesivos podem contribuir para um fenómeno chamado fluência, em que o extensómetro pode escorregar e, portanto, produzir leituras incorretas pelo facto de o adesivo amolecer com o aumento de temperatura ao longo de períodos longos de tempo. [2]

### ***2.2.1 Exemplo de aplicação de um sensor baseado no princípio piezoresistivo***

#### **2.2.1.1 Dispositivos baseados em silício**

Extensómetros baseados em materiais semicondutores tais como silício têm sido muito usados ao longo dos últimos anos, e apesar de serem mais caros e mais difíceis de aplicar a uma superfície do que os strain gauges metálicos, a sua grande vantagem reside no facto de terem um fator de gauge de aproximadamente 130, permitindo medições com pequenas deformações (na ordem dos micro). Deve-se ter em conta que o fator de gauge para um metal é cerca de 2. Em extensómetros semicondutores a maior parte da variação da resistência provém do efeito piezoresistivo. Este extensómetro não é nada linear a tensões altas, isto é, o fator de gauge varia com a tensão. Por exemplo, se o factor de gauge é 130 a 0.2 % da tensão, pode ser 112 a 0.4 % da tensão, que é o limite elástico do extensómetro. Além disso, o factor de gauge varia significativamente com a temperatura, cerca de - 0.15 %/°C, que é mais de 10 vezes pior do que os extensómetros metálicos. Esta

sensibilidade à temperatura é substancialmente reduzida usando dois extensômetros, cada contendo duas peças de material semiconductor, tendo quase o mesmo, mas sinais opostos de fator de gauge. Os dois extensômetros são montados com os seus eixos perpendiculares no membro a ser solicitado pela força, e as quatro resistências são conectadas na ponte como mostra a Figura 2.4. Todas as resistências têm coeficiente de temperatura semelhantes. A saída na ponte é proporcional à tensão mecânica, mas existe um desequilíbrio devido à variação de temperatura. São também usadas outras disposições dos extensômetros. Extensômetros semicondutores podem ser muito pequenos, tendo comprimentos de 0.7 mm a 7 mm, com largura, tipicamente, 10 vezes inferior ao comprimento, sendo fundamentais para a medição de tensões localizadas. [2]

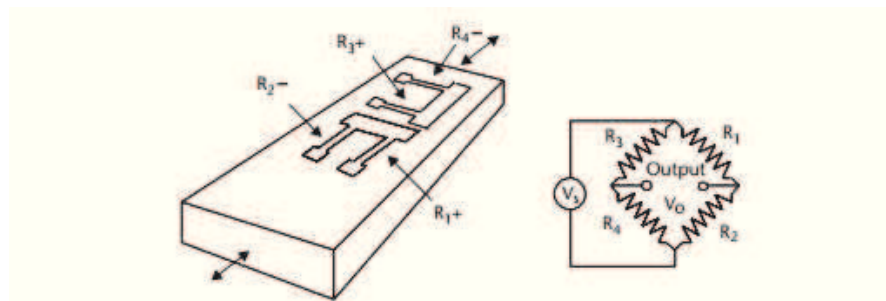


Figura 2.4 – Extensômetro semiconductor com compensação de temperatura (os sinais "+" e "-" indicação, respectivamente fatores de gauge positivos e negativos)

Num extensômetro semiconductor difundido (Figura 2.5), uma base n-Si tem uma camada difundida p-Si, e esta camada trabalha como um condutor sensível à tensão quando a sua resistência é medida entre condutores ligados ao metal depositado. Um braço de suporte com a forma de “C” de extensômetro é tracionado e comprimido na sua superfície superior e inferior, respetivamente, quando o braço de suporte sofre uma deformação de flexão de uma força “F”. Todos os extensômetros são idênticos desde que feitos sobre o mesmo molde e durante o mesmo ciclo. [2]

A tecnologia MEMS recorre ao uso de silício como material estrutural devido às excelentes propriedades mecânicas e à relativa facilidade de fabrico em elevados números de pequenos dispositivos através de processos de micro-maquinagem. [2]

O silício é um material piezoresistivo excelente com boas propriedades mecânicas. O silício amorfo pode ser depositado diretamente sobre a parte mecânica, por exemplo, vidro

ou plástico. A estrutura básica deste sensor é mostrada na Figura 2.6. Uma camada fina de silício amorfo (n-, p-, ou micro-compensada) atua como a área sensível, com tamanho de  $300 \times 300 \mu\text{m}$ , e quatro contactos metálicos. Dois destes contactos são usados para aplicar uma corrente fixa ao elemento de detecção, enquanto que as outras duas, ortogonais das anteriores, fornecem como saída uma tensão proporcional à tensão mecânica aplicada. Quando uma tensão mecânica é aplicada, ocorre uma modificação anisotrópica da resistividade. [2]

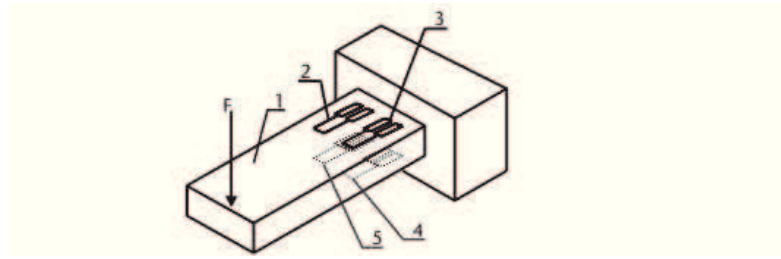


Figura 2.5 – Alavanca integrando um elemento extensómetro. F = força, 1 = alavanca, 2-5 extensómetros em formas de C

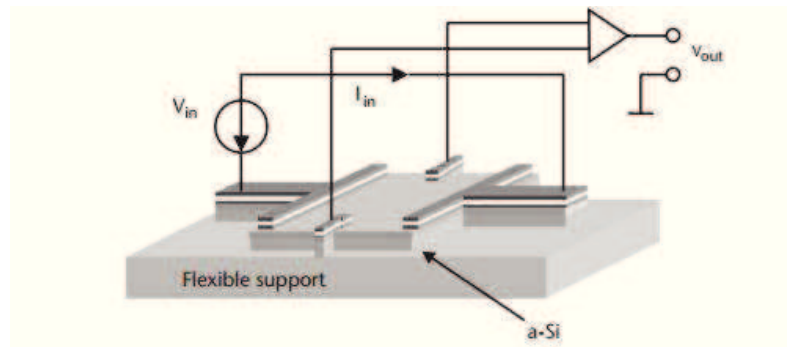


Figura 2.6 – Estrutura de um elemento sensor

O uso simultâneo de silício em componentes maquinados de produção em massa, e a miniaturização de alta precisão de estruturas mecânicas em estruturas numa configuração híbrida, pode resolver os problemas de medição facilmente. Como exemplo, temos um micro-sensor de binário baseado na força diferencial para uso na indústria de relojoaria, que tem sido desenvolvido com resoluções melhores do que  $0.5 \mu\text{Nm}$  para uma largura de banda de  $-200$  a  $200 \mu\text{Nm}$ , tendo um volume de  $3 \times 3 \times 1 \text{ cm}$ . O sensor de binário é representado esquematicamente na Figura 2.7. Este consiste em dois sensores de força piezoresistivos. Uma lâmina de mola de  $100 \mu\text{m}$  de espessura, feito de berílio e cobre, e montada perpendicularmente ao eixo, converte binário para força que atua sobre os dois sensores de força. Os sensores de força são de silício micromaquinados e atuam como uma

barra restringida num dos vértices. Uma barra perpendicular é montada sobre o eixo e atua sobre a lâmina da mola por meio de dois parafusos ajustáveis. A lâmina da mola atua através de dois pontos sobre os sensores de força. O binário aplicado ao eixo aumentará a pressão num dos sensores e diminuirá no outro. [2]

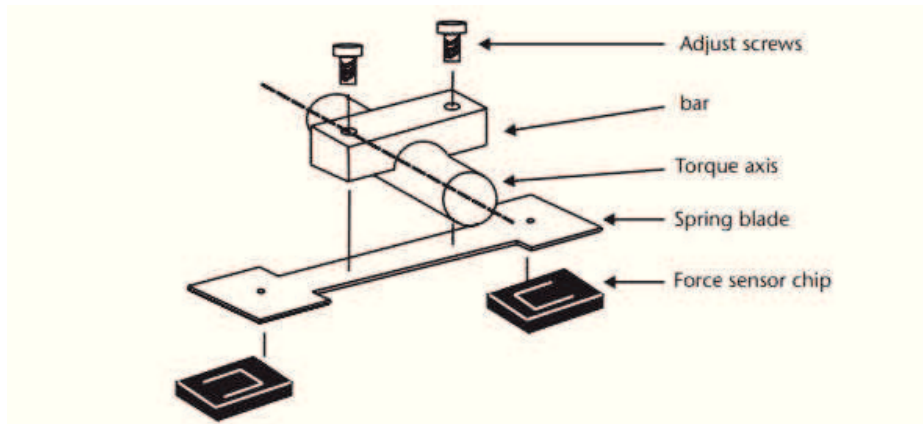


Figura 2.7 – Representação esquemática de um micro sensor de binário

As células de carga são sensores de força usados para pesagem de equipamentos. Na maioria das células de carga convencionais o elemento mola é feito de aço ou alumínio, e a resistência dos extensômetros metálicos é usada como elemento sensor. O silício não sofre os efeitos de histerese e deformação e, por isso, a célula de carga feita de silício pode ser uma alternativa às células de carga convencionais feitas de aço. Flexões estruturais podem ser usadas para cargas até 150 kg, mas para cargas elevadas (acima dos 1000 kg), as células de carga têm de se basear na compressão do silício, como mostrado na Figura 2.8. Este sensor é composto por duas lâminas de silício ligadas. A borda do sensor é comprimida sob a carga, e a quantidade de compressão pode ser verificada medindo a mudança de capacidade entre as duas placas localizadas no centro. Outra concepção de células de carga de silício para cargas até 1000 kg tem sido relatada. Para além de grandes forças e binários, quantidades muito pequenas podem ser medidas; um sensor de binário de micro-medição de força com base na diferença de forças já tem mais de 10 anos. [2]

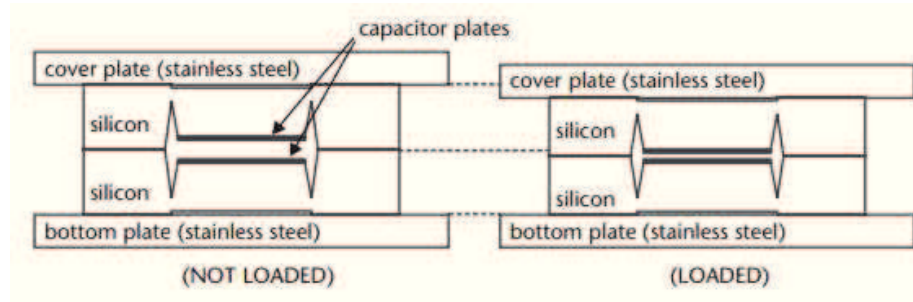


Figura 2.8 – Princípio de uma célula de carga baseada na compressão do silício

## 2.3 Princípio Piezoelétrico

Algumas classes de cristais têm a propriedade de produzir descargas elétricas quando sujeitos a uma força mecânica (efeito direto). Eles também deformam em resposta a um campo elétrico aplicado externamente (efeito inverso). Este é um efeito raro e pode atuar como sensor e atuador. Foi descoberto pela primeira vez em quartzo por Jacques e Pierre Curie em 1880. A origem física da piezoelectricidade surge por causa da taxa de assimetria no interior da estrutura do cristal. Tais cristais são usualmente designados por “noncentrosymmetric” e, devido à falta de simetria, têm características anisotrópicas. Devido à sua estrutura cristalina simétrica, o silício não é, portanto, piezoelétrico. Alguns cristais, tais como o quartzo e o “Rochelle salt” (Potassium sodium tartrate) são naturalmente piezoelétricos, enquanto outros, como o cerâmico barium titanate, PZT (lead zirconate titanate) e PVDF (polymer material polyvinylidene fluoride) são ferroelétricos. Os materiais ferroelétricos são aqueles que apresentam polarização espontânea quando sujeitos a campos elétricos. Por outras palavras, os ferroelétricos têm de ser polarizados de modo a torná-los com comportamento piezoelétrico. Eles são análogos aos materiais ferromagnéticos em muitos aspetos. A Figura 2.9 mostra como a força aplicada faz aumentar a carga elétrica (e portanto a tensão) entre as faces de uma placa de material piezoelétrico. [2]

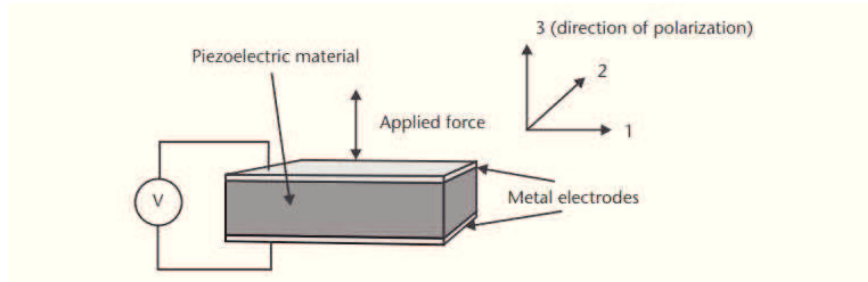


Figura 2.9 – Efeito piezoelétrico: a força aplicada resulta na geração de tensão entre os elétrodos

Se um material ferroelétrico for exposto a uma temperatura que excede o ponto de Curie, ele vai perder as propriedades piezoelétricas. Assim, existe um limite para além do qual eles não podem ser usados como sensores (ou atuadores). O ponto de Curie do PZT tipo 5H é cerca de 195 °C, e a sua temperatura máxima de funcionamento é geralmente inferior a este valor. Além disso, os coeficientes piezoelétricos do material também variam com a temperatura, e é referido como o efeito piroelétrico. Isto pode ser explorado, sensores piroelétricos baseados em PZT modificado são frequentemente usados como base de conjuntos de sensores de infravermelhos. [2]

Devido à natureza anisotrópica dos materiais piezoelétricos, um sistema de identificação de cada um dos eixos é necessário para especificar os seus parâmetros. Por convenção, a direção de polarização é tomada como o eixo 3, com os eixos 1 e 2 perpendiculares. Por exemplo, o material mostrado na Figura 2.9 tem os elétrodos em toda a espessura do material e, por conseguinte, este é o eixo 3. Um parâmetro piezoelétrico importante é o coeficiente de carga “ $d_{ij}$ ” (C/N). Isto refere-se à quantidade de carga gerada nas superfícies do material no eixo “ $i$ ” para a força aplicada no eixo “ $j$ ”. No exemplo dado, a força aplicada e a carga gerada são ambas ao longo de toda a espessura do material e, por conseguinte, este coeficiente de carga é denotado como  $d_{33}$ . Se a força,  $F_3$ , for aplicada à amostra piezoelétrica, então a carga gerada é dada pela equação (10). [2]

$$Q_3 = d_{33} \times F_3 \quad (10)$$

E a tensão elétrica produzida pelo bloco rectangular de área “ $A$ ”, espessura “ $t$ ”, e permeabilidade relativa “ $\epsilon$ ” é dado pela equação (11).

$$V_e = \frac{Q_3}{C} = \frac{d_{33} \times F_3 \times t}{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times A} \quad (11)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade no vazio. Para uma placa de 10 x 10 mm de PZT 5H ( $d_{33} = 600$  pC/N,  $\epsilon_r = 3000$ ) de espessura de 1 mm, uma força aplicada de 100 N vai produzir uma tensão elétrica, em circuito aberto de 22.6 V. Em rigor, o valor de permissividade relativa também é dependente do sentido em que é utilizado e das condições de fronteira impostas no material. A nomenclatura torna-se um pouco incómoda, no entanto, e para efeitos deste trabalho, deve presumir-se que o valor citado é para a direção em que o piezoelétrico está a ser usado. [2]

### 2.3.1 Exemplo de aplicação de um sensor baseado no princípio piezoelétrico

O efeito piezoelétrico pode ser usado em sensores de força passivos ou ativos. Contudo, deve-se ter em conta que o efeito piezoelétrico é AC. Por outras palavras, converte uma variação de força numa variação no sinal elétrico, conseqüentemente uma força constante não produz qualquer resposta elétrica. No entanto, a força pode alterar algumas propriedades do material, que iriam afetar a resposta de um sensor piezoelétrico AC quando alimentado por um sinal de excitação ativo. Um exemplo de uma abordagem ativa é mostrado na Figura 2.10. [1]

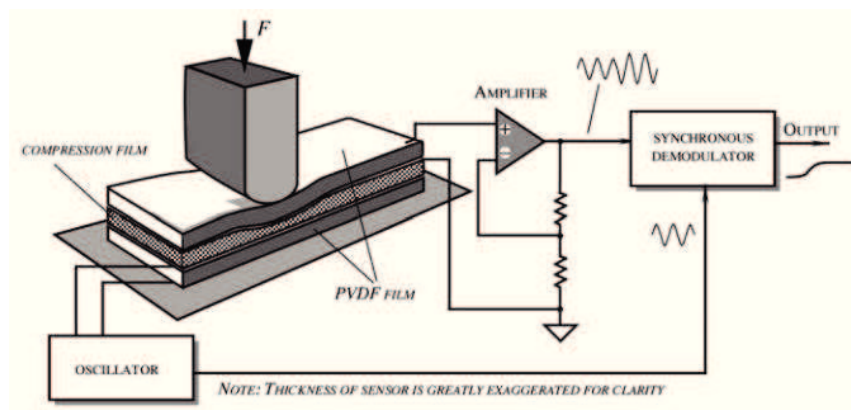


Figura 2.10 – Sensor tátil, piezoelétrico ativo

No entanto, para medições quantitativas, a força aplicada tem de ser relacionada com a ressonância mecânica do cristal piezoelétrico. O princípio básico da operação deste tipo de sensores é que certos cortes de cristal de quartzo, quando usados como ressonadores em osciladores eletrônicos, mudem a frequência de ressonância ao serem carregados mecanicamente. A equação que descreve o espectro das frequências naturais de um oscilador piezoelétrico pode ser traduzida pela equação (12).

$$f_n = \frac{n}{2l} \times \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (12)$$

Onde “n” é o número harmônico, “l” é a dimensão determinística da ressonância (por exemplo, a espessura de uma placa relativamente espessa, ou o comprimento de uma cabo fino), “k” é a constante de rigidez elástica eficaz (por exemplo, a tensão de corte constante para a direção da espessura de uma placa ou o módulo de Young para o caso de uma haste fina), e o “ρ” é a densidade do material do cristal. [1]

A alteração de frequência induzida pela força externa é devida aos efeitos não lineares no cristal. Na equação acima descrita, a constante de rigidez elástica eficaz “k” varia ligeiramente com a tensão aplicada. O efeito da tensão em “l” e na densidade é insignificante. A sensibilidade mínima a uma força externa pode ocorrer quando a dimensão comprimida está alinhada com uma direção para um determinado corte. Estas direções são habitualmente escolhidas quando os osciladores de cristal são desenhados, devido à importância da estabilidade mecânica. Contudo, em aplicações de sensores, o objetivo é o oposto. Por exemplo, a força diamétrica usada para um transdutor de pressão de alta performance, Figura 2.11. [1]

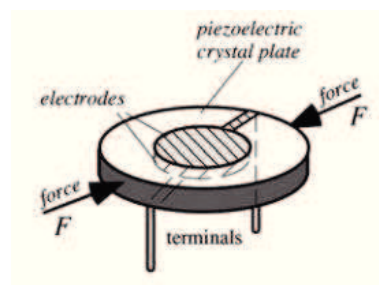


Figura 2.11 – Disco ressoador piezoelétrico funcionando como sensor de força diamétrica

## 2.4 Princípio Capacitivo

As estruturas físicas dos sensores capacitivos são relativamente simples. No entanto, esta técnica fornece uma forma precisa de detectar movimento de um objeto. Essencialmente, os dispositivos contêm um conjunto de um (ou mais) elétrodos fixos e um (ou mais) elétrodos que se movem. Estes são geralmente distinguidos por uma característica de não linearidade e sensibilidade à temperatura, mas a possibilidade de integrar um circuito de condicionamento do sinal perto do sensor permite ter uma boa sensibilidade, e recorrem ainda a dispositivos de compensação. A Figura 2.12 ilustra três configurações para uma estrutura de um condensador de placas paralelas simples. [2]

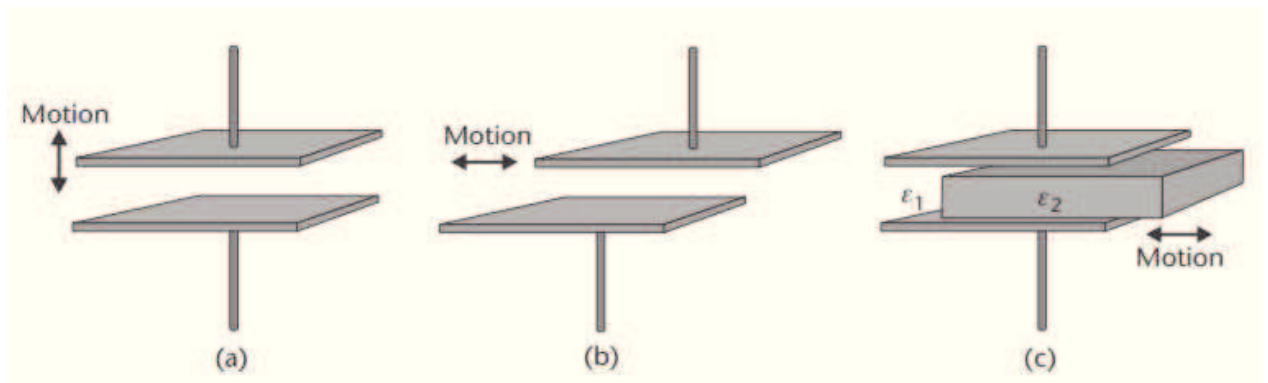


Figura 2.12 – Exemplos de sensores simples de capacidade: (a) placa móvel, (b) área variável e (c) dielétrico móvel

Para uma estrutura de um condensador de placas paralelas simples, ignorando as linhas de campo não perpendiculares às placas, a capacidade é dada pela equação (13).

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times A}{d} \quad (F) \quad (13)$$

Onde “ $\epsilon_0$ ” é a permissividade no vácuo, “ $\epsilon_r$ ” é a permissividade relativa do material entre placas, “ $A$ ” é a área de sobreposição entre os elétrodos, e “ $d$ ” é a distância entre elétrodos. A equação mostra que a capacidade pode variar por alteração de uma ou mais variáveis. A Figura 2.12a mostra o caso simples onde o elétrodo inferior é fixo e o superior se move. Neste caso a distância “ $d$ ” alterando a capacidade de forma não linear. A Figura 2.12b mostra um dispositivo onde a separação é fixa e a área de sobreposição entre elétrodos é variável. Nesta configuração, existe uma relação linear entre a capacidade e a área de

sobreposição. A Figura 2.12c mostra uma estrutura que tem uma distância fixa entre elétrodos e a área de sobreposição constantes. O movimento é aplicado a um material dielétrico (de permitividade “ $\epsilon_2$ ”) que se encontra entre os dois elétrodos. Um problema comum a todos estes dispositivos é que a temperatura irá afetar todos os parâmetros (“d”, “A” e “ $\epsilon_r$ ”) resultando numa mudança no sinal de saída. Este efeito deve ser compensado através de condicionamento de sinal ou de preferência através da geometria. [2]

A Figura 2.13 mostra um sensor de diferencial de capacidade, tendo a natureza similar a um sensor capacitivo com placa móvel com exceção que existe um elétrodo extra fixo. Quaisquer efeitos de temperatura são comuns a ambos os condensadores, sendo portanto cancelados, pois o sinal de saída é função da diferença entre os condensadores de cima e de baixo. Se for assumido que os dois elétrodos exteriores (X e Z) são fixos e que o elétrodo interno (Y) tem movimento livre paralelamente em direção a X, então a distância entre X e Y vai diminuir e a entre Y e Z aumentar. Se a distância nominal é “d” e o elétrodo central é movido por uma distância “x”, então a relação entre a tensão diferencial e a deflexão é dada pela equação (14). [2]

$$(V_{e_2} - V_{e_1}) = V_{e_s} \left( \frac{x}{d} \right) \quad (14)$$

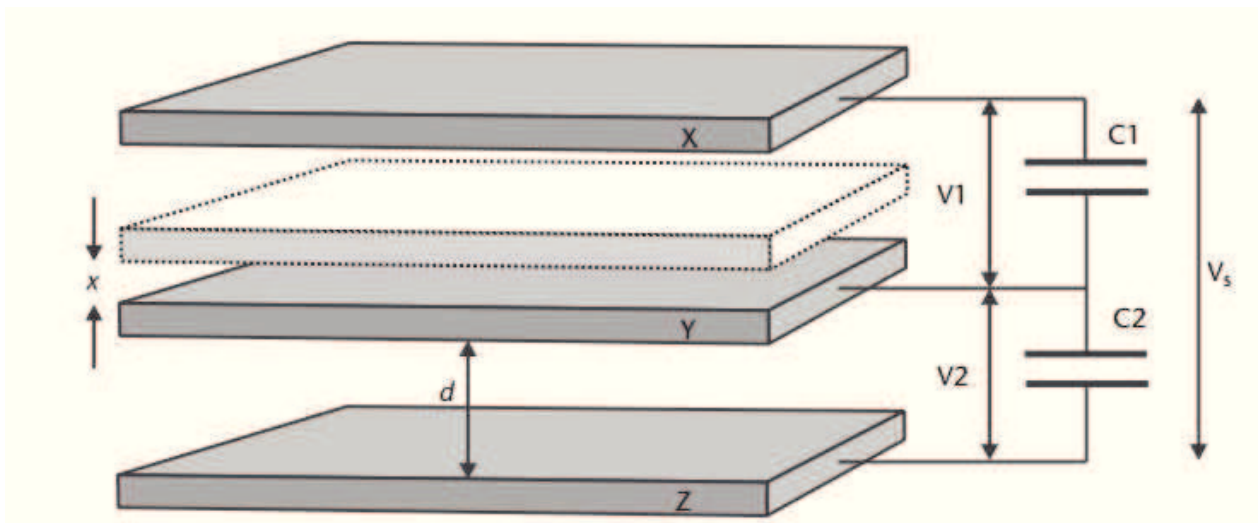


Figura 2.13 – Sensor de capacidade diferencial

Onde “ $V_{e_s}$ ” é a tensão de alimentação. Esta disposição proporciona uma relação linear que é mantida para a gama  $|x| < d$  e é capaz de detetar o deslocamento de alguns picómetros. [2]

Estruturas capacitivas são relativamente simples de fabricar, e dispositivos do tipo membranares são habitualmente usados como base para sensores de pressão e microfones. Em estruturas mais elaboradas, tais como sensores capacitivos interdigitais, as linhas de campo não perpendiculares não podem ser ignoradas. Com estes dispositivos, a equação do condensador de placas paralelas simples apenas fornece uma aproximação muito grosseira da variação de capacidade. [2]

Técnicas capacitivas são inerentemente menos ruidosas que as baseadas na piezoresistividade devido à falta de ruído térmico. Com dispositivos micromaquinados, no entanto, os valores de capacidade são extremamente baixos (na ordem dos atofarad ( $10^{-18}$ ), e o ruído adicional, devido aos circuitos de interface eletrónica, normalmente excedem a de um sistema com base em resistências. [2]

Há uma diversidade de técnicas para medir variações de capacidade, incluindo amplificadores de carga (muitas vezes denominados de dispositivos piezoelétricos), técnicas de equilíbrio de cargas, medições de impedância em ponte AC e diversificadas configurações com osciladores. Existe também uma grande variedade comercialmente disponível de ICs (circuitos integrados) que podem ser usados para medir variações de capacidade de alguns femtofarads ( $10^{-15}$ ) até centenas de picofarads ( $10^{-12}$ ). [2]

#### ***2.4.1 Exemplo de aplicação de um sensor baseado no princípio capacitivo***

Medições de binário sem contacto num veio rotativo podem ser obtidas recorrendo a um sensor capacitivo, apesar da suscetibilidade dos circuitos de telemetria à radiofrequência e interferência eletromagnética poder ser um problema. O binário pode ser medido recorrendo a um conjunto de elétrodos sobre uma extremidade da barra e a um segundo conjunto de elétrodos do lado de fora de um tubo fino de material dielétrico. Este tubo é fixado ao veio no outro extremo da barra de torção. Um conjunto de elétrodos move-se em relação ao segundo quando o binário é aplicado fazendo variar a capacidade entre os dois

conjuntos de elétrodos. A capacidade é parte de um circuito de ressonância induzido ligado a uma bobine na parte estacionária. Cada extremidade da barra pode ter um sensor de deslocamento angular sem contacto, e o binário de torção é monitorizado pela alteração da fase elétrica. [2]

Silício micro maquinado tem sido usado para realizar um sensor de diferencial capacitivo. O princípio de funcionamento do sensor de força por distância variável é mostrado na Figura 2.14. Os condensadores são feitos de duas placas finas (elétrodos), eletricamente isoladas, com uma distância muito pequena. Se a capacidade aumentar de um aumentar, a do outro vai diminuir. Uma leitura diferencial de capacidade assegura uma melhor linearidade e uma maior sensibilidade. Uma distância de  $10\ \mu\text{m}$  dá uma capacidade de  $1\ \text{pF}$ . Podem ser efetuadas medições de forças entre  $0.01\ \text{N}$  a  $10\ \text{N}$ , e o elemento de detecção pode ser usado como sensor táctil no campo da tecnologia nanorrobótica. [2]

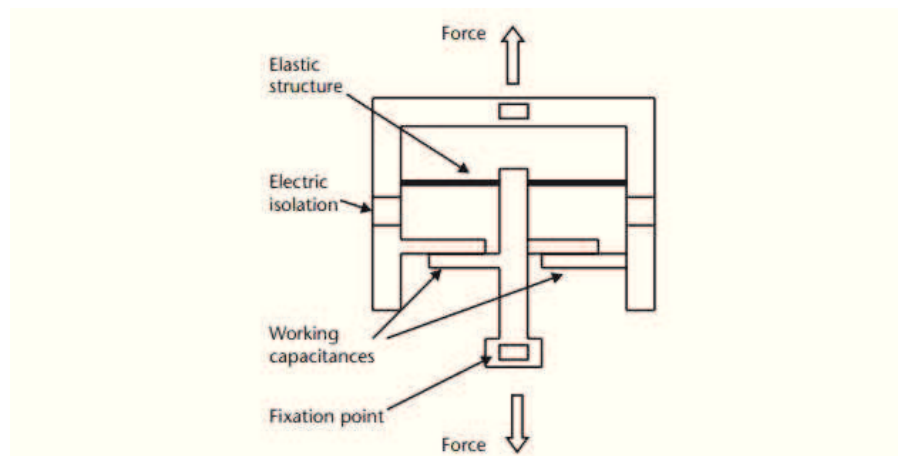


Figura 2.14 – Sensor de força capacitivo com o princípio de distância variável

## 2.5 Princípio Ótico

As técnicas de detecção óticas dependem principalmente da modulação das propriedades de uma frequência de onda eletromagnética ótica. No caso dos sensores óticos, a mensurada modela diretamente as propriedades da onda eletromagnética. No caso de microsensores que recorrem ao uso de interface ótica, o sensor miniaturizado interage com a mensurada. O microsensor modela, posteriormente, a propriedade do sinal ótico no sentido de proporcionar uma indicação da mensurada. As seguintes propriedades da onda

eletromagnética podem ser alteradas: [2]

- a) Intensidade;
- b) Fase;
- c) Comprimento de onda;
- d) Posição espacial;
- e) Frequência;
- f) Polarização.

Os princípios básicos de cada uma destas técnicas serão revistas de seguida.

a) Intensidade

A principal vantagem da modulação em intensidade consiste no facto de as variações na intensidade serem simplesmente detetadas por todos os detetores óticos (fotodíodos, fototransístores), respondendo diretamente a uma variação na intensidade. Portanto, se o microsensor puder ser disposto para variar a intensidade do sinal ótico, estas variações podem ser simplesmente observadas utilizando um fotodetetor. Uma configuração simples é o microsensor se mover em resposta ao mensurando. Este movimento deve ser organizado de modo a bloquear o caminho do feixe incidente sobre o fotodetetor. A Figura 2.15 ilustra uma configuração simples de transmissão, embora a luz refletida seja também usada em algumas configurações. [2]

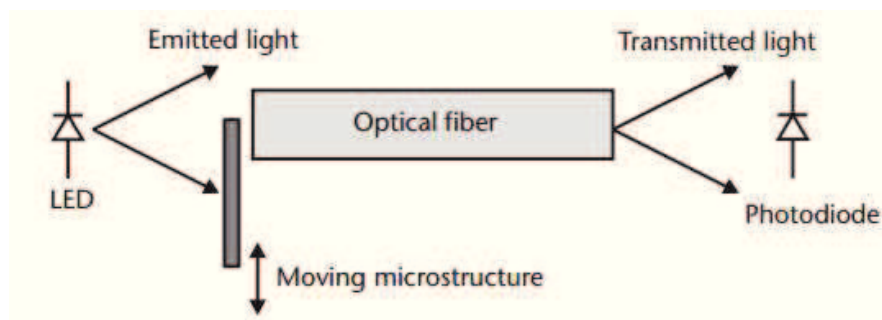


Figura 2.15 – Exemplo de um sistema de deteção com modulação de intensidade simples

A fonte ótica é mostrada como um díodo emissor de luz (LED – light emitting diode), uma vez que não é necessária uma fonte coerente para um sensor baseado em intensidade. Fontes óticas alternativas podem ser a laser, a saída de uma fibra ótica, ou, simplesmente

uma lâmpada de incandescência. A maior dificuldade com os sistemas à base da intensidade é a variação de intensidade com fatores não relacionados com o mensurando. Por exemplo, a saída de uma fonte ótica pode variar com o tempo e temperatura. Por esta razão, os sensores baseados na medição de intensidade usualmente incorporam algum tipo de medição de referência e o rácio entre a intensidade antes e depois da modulação do microsensor. Este problema geralmente anula a simplicidade dos sensores baseados em intensidade. Variações na sensibilidade dos detetores óticos podem causar dificuldades e complicações. [2]

A quantidade estimada de resolução dos sensores baseados em intensidade pode ser obtida por estimativa do tamanho do feixe ótico. O tamanho mínimo de feixe é da ordem do comprimento de onda da fonte ótica, de modo que apresenta uma indicação do deslocamento necessário para dar uma modulação de 100 % da intensidade. [2]

#### b) Fase

Como os fotodetetores não respondem diretamente a variações na fase, é necessário converter a variação na fase para uma variação de intensidade para medições no fotodíodo. Isto é geralmente conseguido recorrendo a um interferómetro combinando um ou mais feixes óticos que interagem com o microsensor, com um ou mais feixes óticos que não são afetados pelo microsensor. Uma fonte coerente, tal como díodos laser, é tipicamente utilizada nas deteções óticas por fase. A interação com o microsensor tem o efeito de alterar o comprimento do caminho ótico a percorrer pelo feixe ótico e, conseqüentemente, a sua fase. Isto pode ser conseguido simplesmente por reflexão do feixe ótico para fora do microsensor e movendo o microsensor em resposta ao mensurando de modo a variar o comprimento do caminho ótico. [2]

A maior vantagem dos sistemas baseados na fase é que variações de fase para comprimentos inferiores ao comprimento de onda podem ser detetadas, o que equivale ao deslocamento submicro do microsensor. Podem ser causadas dificuldades devido ao facto da saída do interferómetro ser periódica, devendo portanto serem tomadas precauções no sentido de estabelecer uma relação entre o ponto de partida e a posição relativa a esse momento. Isto pode levar a uma complexidade nos eléctrodos de referência e a erros de inicialização do sistema. [2]

## c) Comprimento de onda

Sensores à base do comprimento de onda dependem do espectro da fonte a ser modulada pela interação com o microsensar. Normalmente é usada uma fonte de espectro alargado. A luz que retorna do microsensar é dividida em segmentos espectrais que incidem no fotodetector para medição da sua intensidade. Por conhecimento prévio do potencial de modulação do presente mecanismo com o microsensar, podem ser identificados o mensurando e a sua magnitude. Um bom exemplo de um sensor baseado no comprimento de onda é um baseado na absorção de gás, que é altamente específico no comprimento de onda de acordo com a quantidade de gás presente. [2]

A vantagem dos sensores baseados neste princípio é que podem ser tornados insensíveis a variações de intensidade pelo facto deste efeito afetar todo o espectro da mesma maneira. Por conseguinte, a medição do comprimento de onda não absorvido pode ser usado como referência para o absorvido, compensando variações de intensidade. Além disso, estes sensores permitem frequentemente medições de vários parâmetros, devido ao facto do espectro da luz poder ser dividido por vários comprimentos de onda, obtendo os que têm interesse para a situação. [2]

## d) Posição espacial

A Figura 2.16 ilustra o princípio de funcionamento da modulação espacial por meio do movimento do microsensar. Esta técnica, habitualmente conhecida como triangulação, é simples de implementar e tem a vantagem de ser imune a variações de intensidade. A sua resolução é menor do que técnicas baseadas em fase. [2]

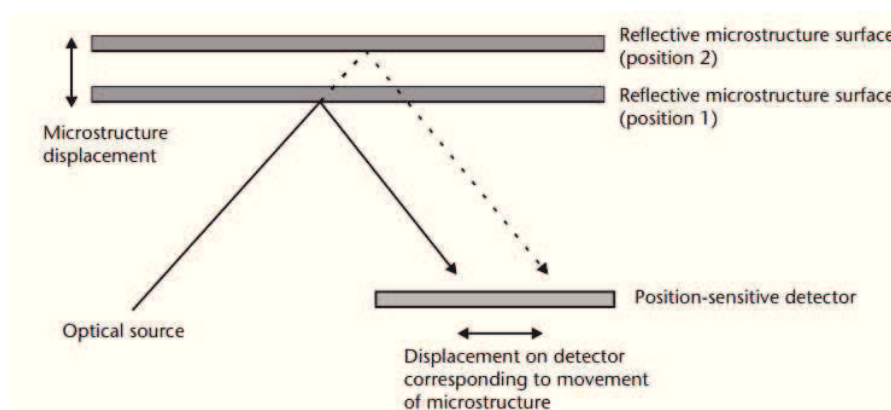


Figura 2.16 – Exemplo de um sistema de medição de posição espacial

## e) Frequência

Se a radiação ótica de frequência “f” for incidente em cima de um corpo movendo-se a velocidade “v”, então a radiação refletida pelo corpo em movimento parece ter uma frequência “f<sub>1</sub>” dada pela equação (15).

$$f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \approx f \left[ 1 + \frac{v}{c} \right] \quad (15)$$

Esta mudança de frequência de Doppler de um alvo em movimento pode ser utilizada pelo princípio de detecção de velocidade de um alvo. Os velocímetros de Doppler a laser são um campo de investigação bem estabelecido. As variações na frequência podem ser convertidas em variações de intensidade recorrendo a um interferómetro combinando a frequência não deslocada de referência com a do feixe deslocado. [2]

## f) Polarização

Polarização linear é definida pela direção do vetor elétrico da onda eletromagnética. Luz polarizada circular é definida pela direção da rotação do vetor de campo elétrico visto olhando para a fonte. Qualquer polarização pode ser traduzida em dois modos ortogonais e a detecção pode ser alcançada alterando o comprimento do percurso ótico a percorrer de um modo em relação ao outro. Na prática, isto é normalmente alcançado por uma modificação relativa no índice de refração. A fonte da luz polarizada, tal como laser é necessária, e um fotodetector pode ser feito para ser sensível à polarização, para tal contendo um polarizador. [2]

Microsensores baseados em perguntas e em polarização ainda não foram amplamente investigados devido à sensibilidade limitada, uma vez que se trata de uma técnica diferencial. Além disso, o método é suscetível a variações de intensidade da fonte. [2]

### ***2.5.1 Exemplo de aplicação de um sensor baseado no princípio ótico***

A medição do binário sempre foi um desafio importante para várias indústrias, tais como a aeroespacial e automóvel. Em particular existe um interesse crescente nos sistemas EPAS

(electric power-assisted steering) entre os construtores de veículos e fornecedores de componentes. Um dos componentes chave do sistema EPAS é o sensor de binário com a simples especificação: a banda de medição do sensor deve ser de  $\pm 10$  Nm, um binário de sobrecarga de cerca de 110 Nm e uma velocidade máxima de rotação de cerca de 90 rpm. O sensor deve cumprir as especificações EMC (environmental and electromagnetic compatibility), sendo os métodos óticos imunes a efeitos de interferência, além de que um sensor sem contacto favorece o aumento da segurança. [2]

## 2.6 Princípio de ressonância

Um ressoador é uma estrutura mecânica concebida para vibrar a uma certa frequência de ressonância. Estes podem ser fabricados a partir de uma gama de materiais monocristalinos com dimensões micro recorrendo a processos de micro maquinagem. As frequências de ressonância destes microressoadores são extremamente estáveis permitindo que sejam usados como base de tempo (por exemplo: o diapasão de quartzo em relógios), ou como um elemento sensível num sensor de ressonância. Os benefícios de desempenho de um sensor de ressonância bem concebido em comparação com técnicas piezoresistivas e capacitivas são mostrados na Tabela 2.2. O fabrico destes dispositivos é, no entanto, mais complexo e os requisitos para a embalagem destes é mais exigente. [2]

Tabela 2.2 – Desempenho de sensores de ressonância, piezoresistivos e capacitivos

Característica	Ressonância	Piezoresistivo	Capacitivo
Forma do sinal de saída	Frequência	Tensão elétrica	Tensão elétrica
Resolução	1 parte em $10^8$	1 parte em $10^5$	1 parte em $10^4 - 10^5$
Precisão	100 – 1000 ppm	500 – 10000 ppm	100 – 10000 ppm
Consumo de energia	0.1 – 10 mW	$\pm 10$ mW	< 0.1 mW
Sensibilidade à temperatura	$-30 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$-1600 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Na Figura 2.17 é mostrado um diagrama de blocos típico de um sensor ressoador. Um sensor de ressonância é concebido de modo a que a sua frequência natural seja função do mensurando. O mensurando normalmente altera a rigidez, massa ou forma do ressoador, causando alterações na sua frequência de ressonância. Os outros componentes do sensor de ressonância são a unidade de vibração e os mecanismos de detecção. A unidade de vibração excita as vibrações na estrutura, enquanto o mecanismo de detecção sente as vibrações. A frequência das vibrações detetadas forma a saída do sensor, e este sinal é usado como feedback para a unidade de vibração através de um amplificador, mantendo a estrutura a ressoar em toda a gama de frequências. [2]

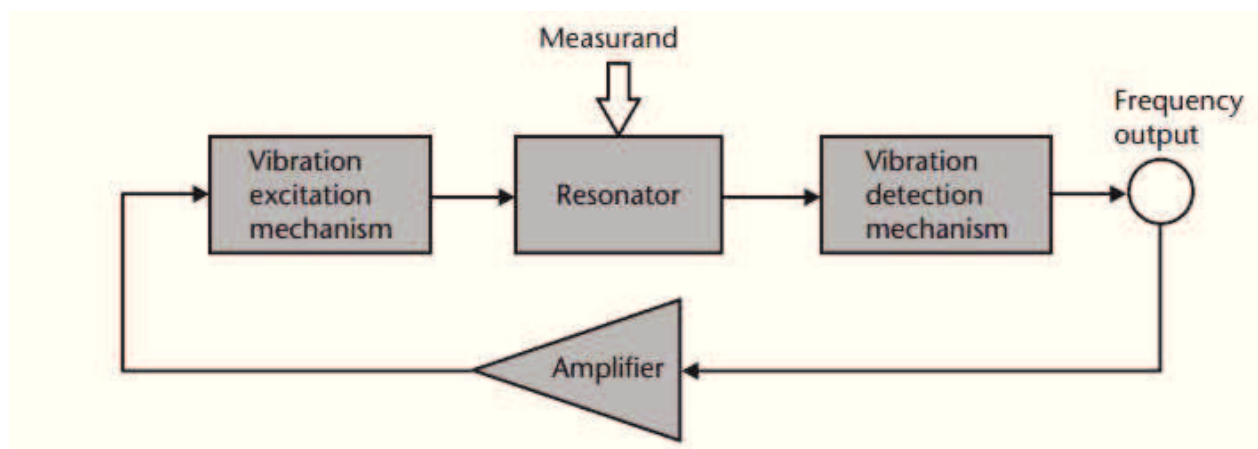


Figura 2.17 – Diagrama de blocos do sensor de ressonância

Em aplicações mecânicas recorrendo a sensores, o mecanismo mais comum para acoplar o ressoador ao mensurando consiste em aplicar uma tensão ao longo da estrutura. Quando usado de um certo modo, o ressoador torna-se um extensómetro de ressonância. O acoplamento com o mensurando é conseguido montando o ressoador no local concebido na estrutura de detecção que deflete devido à aplicação do mensurando. A saída do ressoador pode ser usada para monitorizar a deflexão da estrutura de detecção e, assim, fornecer indicação da magnitude da grandeza medida. Quando usado como extensómetro de ressonância, a tensão efetiva aplicada aumenta a rigidez do ressoador, o que resulta num aumento da sua frequência natural. Este princípio é usado de forma igual para sensores de força, transdutores de pressão e acelerómetros. [2]

O acoplamento do mensurando com a massa do ressoador pode ser obtido envolvendo a estrutura por um líquido ou gás, através do revestimento do ressoador num material sensível quimicamente ou por deposição de material no ressoador. A presença de líquido

ou gás circundante aumenta a inércia afetiva do ressoador e diminui a sua frequência natural. Sensores de densidade e sensores de nível são exemplos de sensores de ressonância de massa acoplada. Revestir o ressoador num material sensível quimicamente é usado em sensores de gases. Este material sensível absorve moléculas de um gás particular, aumentando a massa da película e, portanto, reduzindo a frequência do ressoador. [2]

O efeito de acoplamento de forma é semelhante ao efeito de tensão, com a exceção de que o mensurando altera a geometria do ressoador, o que leva a uma mudança de frequência de ressonância. Este é o método mais incomum de acoplamento. [2]

### ***2.6.1 Exemplo da aplicação de um sensor baseado no princípio de ressonância***

Sensores que utilizam como saída uma variação de frequência são muito apelativos. Estes podem ser muito sensíveis e possuir uma gama larga. A natureza do sinal de saída destes dispositivos faz com que sejam facilmente conjugados com sistemas digitais, e fornece uma boa imunidade ao ruído. Por estas razões, os ressonadores metálicos e de quartzo têm sido aplicados na indústria, existindo ainda sensores recorrendo a tecnologias de silício. [2]

Recentemente foram desenvolvidos extensómetros metálicos digitais. O ressonador metálico de feixe triplo com uma camada espessa de elementos piezoelétricos para conduzir e detetar vibrações é mostrado na Figura 2.18. O substrato ressonador é fabricado por uma técnica de gravura fotoquímica de dupla face, e os elementos piezoelétricos são depositados por um processo normal de serigrafia na camada espessa. O ressonador de 15.5 mm de comprimento e 7 mm de largura é favorecido a 6.2 kHz e com fator Q de 3.100 com sensibilidade à carga de 13 Hz/N. Existem outros meios de acionamento e deteção, como por exemplo, o uso de fibra ótica para refletir a luz de um feixe e uma unidade eletromagnética. [2]

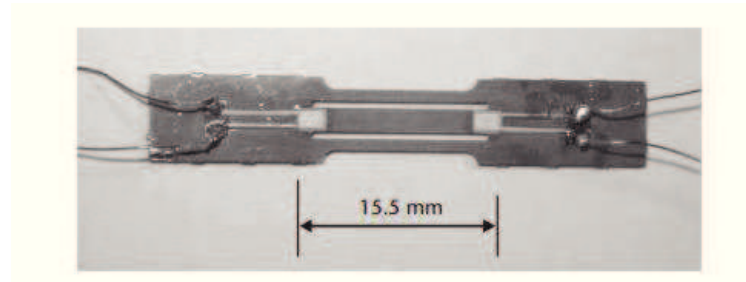


Figura 2.18 – Fotografia de um ressoador metálico

## 2.7 Outros tipos de sensores

Existem outros tipos de tecnologias que permitem a medição da grandeza força, no entanto, estes recorrem aos princípios acima mencionados: piezoresistivos, piezoelétricos e capacitivos. Encontrando-se apenas numa disposição diferente e, juntamente com outros componentes, conseguem ter outro tipo de aplicações. No entanto, o princípio de medição em si é o mesmo dos já referidos anteriormente recorrendo a sensores piezoresistivos, piezoelétricos ou capacitivos para o efeito. São eles os “Dispositivos magnéticos”, “Microscópio de força atômica e digitalização de sondas” e “Sensores tácteis”. [2]

## 2.8 Tendência verificada

É evidente, depois da revisão efetuada, que a tecnologia MEMS está a ter um papel fundamental na medição de forças. [2]

Para além da pesagem industrial, direção assistida, potência num freio, força em unidades de fixação e fixação rápida, os sensores são usados em aplicações tais como microscopia de força, manipulação hábil e dinâmica de objetos frágeis ou irregulares com micro garras e mãos eletrónicas. Estruturas inteligentes na indústria aeroespacial precisam de sistemas de sensores de força integrados de baixo custo, e tecnologias de micro sistemas vão estar na vanguarda dos desenvolvimentos dos novos sensores. Novas abordagens e aplicações estão a surgir cada vez mais frequentemente. [2]

A miniaturização e integração de várias tecnologias, tais como micromaquinação do

silício, microeletrónica, fibras óticas, películas finas ou espessas, vão contribuir para estes desenvolvimentos. A atuação MEMS vai ser combinada com os sensores MEMS para desenvolver sistemas de controlo em malha fechada MEMS em miniatura para controlar pequenas forças. Matrizes de dispositivos oferecerão capacidades para 2 e 3 dimensões. Sensores de força através da ressonância necessitando de muito baixa potência continuarão a ser desenvolvidos para não terem contacto – aplicações remotas, e não existir necessidade de bateria – wireless – dispositivo autónomo. Geradores de baixa energia operando na vibração local devem ser usados. [2]

## 2.9 Estado da arte

Os passos de fabrico de um sensor piezoresistivo micro maquinado genérico encontram-se na Figura 2.19. Inicialmente foi depositada uma camada de passivação de nitreto de silício com 0.4  $\mu\text{m}$  na camada de silício usando “RF magnetron sputtering” (pulverização catódica). Posteriormente a poliamida sacrificada PI2611 foi revestida em rotação a 4000 rpm e curada a 380 °C durante 8 horas, resultando numa espessura final de 5.4  $\mu\text{m}$ . Em seguida uma camada membranar de óxido de alumínio com 1.2  $\mu\text{m}$  de espessura foi depositada pelo processo “RF magnetron sputtering” e padronizada pelo retirar. Na camada superior, uma camada de nícrómio (NiCr 80 / 20 % em peso) foi depositada por “sputtering” e padronizada para formar a camada piezoresistiva. As camadas de nícrómio depositadas à temperatura por “RF magnetron sputtering” são policristalinos ou granulares. Foram fabricadas diferentes estruturas variando a espessura de piezoresistores de nícrómio desde 10 a 40 nm mantendo todas as espessuras das restantes camadas constantes. De maneira similar, as ligações internas dos piezoresistores na ponte Wheatstone foram formadas por “sputtering” e padronizadas em 300 nm de uma camada de alumínio. Para prevenir a oxidação do nícrómio durante a remoção da camada sacrificada sob a porção ativa da membrana, uma camada fina (aproximadamente 180 nm de espessura) de óxido de alumínio foi depositada e padronizada para proteger os piezoresistores e interligar antes da calcinação da camada sacrificada, para libertar a membrana. A calcinação da camada sacrificada foi realizada em plasma de oxigénio, de tal modo que a membrana que prende os piezoresistores foi suspenso por cima do substrato. [3]

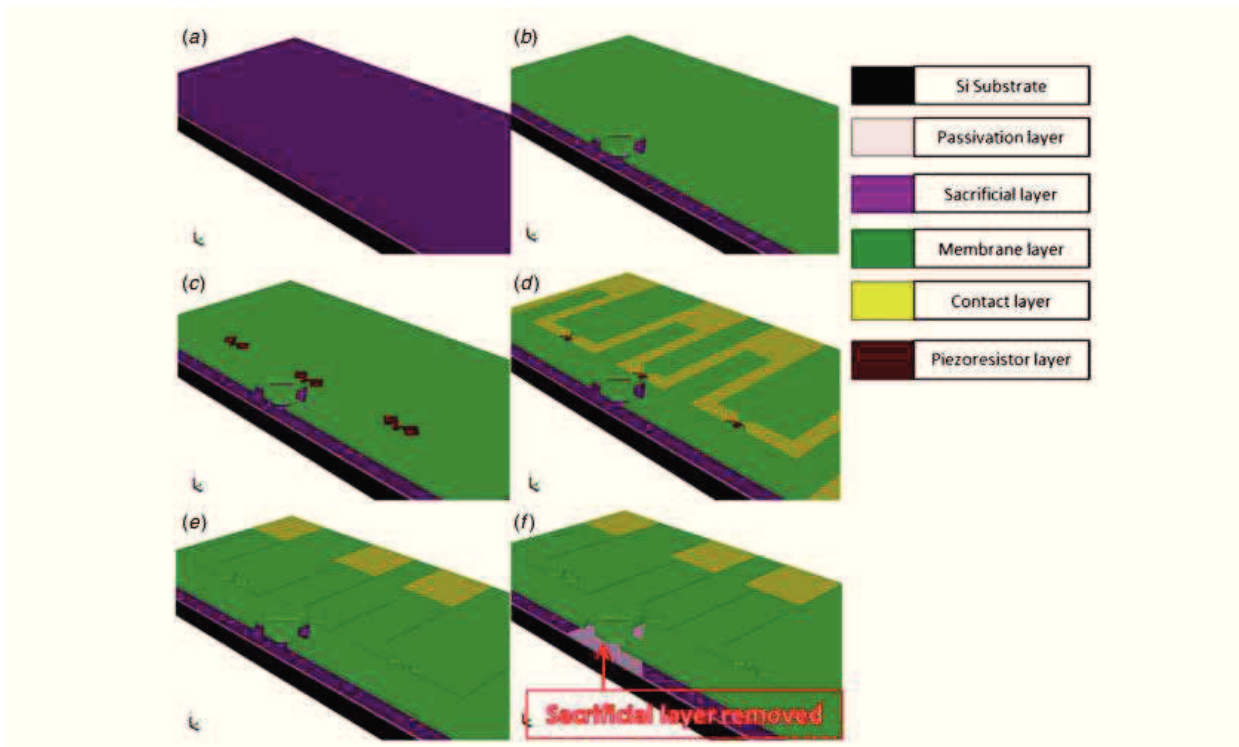


Figura 2.19 – Vista das várias secções nos diferentes passos de fabrico. (a) Deposição da camada de nitreto de silício, (b) deposição e padronização do óxido de alumínio como camada membrana, (c) deposição e padronização do nícrômio como camada piezoresistiva, (d) deposição e padronização de alumínio como camada de contato, (e) deposição de 180 nm de camada de óxido de alumínio para proteger os piezoresistores durante a calcinação e (f) mostra a remoção da poliamida sacrificada

Recorrendo à tecnologia de piezoresistividade, a Tekscan, com os “FlexiForce Sensors”, apresenta uma solução de medição de forças estáticas ou dinâmicas. A variação da resistência dá-se de forma inversa ao aumento da força aplicada. A relação força vs condutância ( $1/R$ ) é quase linear. O sensor FlexiForce é de espessura ultra-fina e consiste num circuito impresso flexível, que pode ser facilmente integrado na maioria das aplicações. São anunciadas propriedades de linearidade, histerese, desvio e sensibilidade à temperatura com melhores desempenhos em relação a qualquer outro sensor de força de espessura fina. A área de deteção é um círculo de 9.525 mm de diâmetro. [4]

O sensor é constituído por duas camadas de substrato. O substrato é composto de poliéster ou poliamida nos casos dos sensores de alta temperatura. Em cada camada, um material condutor (prata) é aplicado, seguido de uma camada de tinta sensível à pressão. É usado adesivo para laminar as duas camadas de substrato juntas para criar a forma do sensor. [4]

Existem várias maneiras de integrar o sensor numa aplicação. Uma destas é recorrendo a um circuito força-tensão. Um exemplo de um possível circuito é mostrado na Figura 2.20. Neste caso, a tensão de excitação DC é de -5 V. O circuito usa um amplificador inversor operacional para produzir saída analógica baseada na resistência e na resistência de referência fixa (RF). Pode ser usado um conversor analógico-digital para converter a saída para digital. Neste circuito, a sensibilidade do sensor pode ser ajustada por trocar a resistência de referência (RF) e/ou tensão de alimentação (V<sub>T</sub>). Um valor mais baixo de referência e/ou tensão de alimentação produzirá uma pior sensibilidade e aumentará a gama do sensor de força. [4]

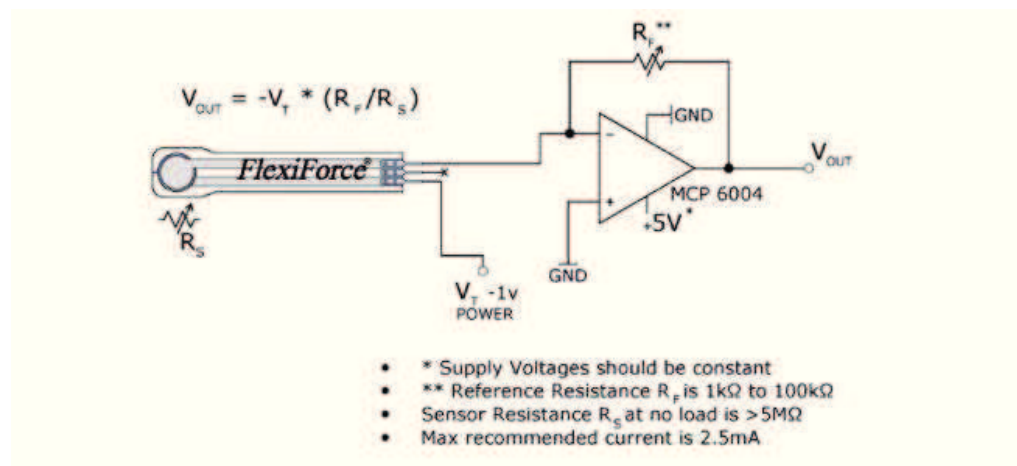


Figura 2.20 – Circuito força-tensão

Deve ser tido em conta o cuidado de distribuir o melhor possível a pressão por toda e somente a área destinada para o efeito, devendo ainda ser evitado o uso do mesmo perto da saturação, ponto a partir do qual um aumento de força não fará variar o valor da resistência, devendo ser ajustado para não atingir este limite. [4]

Foi testado o uso de papel como material estrutural para sensores de força. O princípio sensorial destes sensores é baseado no efeito piezoresistivo de materiais condutivos padronizados em substrato de papel. Este sensor pode detetar forças de 120  $\mu$ N, e gama de medição de  $\pm 16$  mN e a sensibilidade de 0.84 mV/mN. Foi ainda desenvolvida uma balança com base em papel com medições até 15 g de resolução de 25 mg. Este estudo teve como seu principal foco melhorar a relação qualidade/custo reduzindo os custos. O papel é de fácil obtenção, leve, e de fácil degradação por inceneração. [5]

O princípio de detecção do sensor de força baseado em papel é o efeito piezoresistivo de materiais condutivos padronizados numa estrutura de papel. Muitos sensores MEMS partem da mesma vantagem do efeito piezoresistivo, mas estes tipicamente são construídos à base de silício. A Figura 2.21A mostra um esquema de uma alavanca de detecção de forças à base de papel. Neste dispositivo, a resistência em carbono está localizada na base da alavanca. Quando a força é aplicada à viga, a estrutura sofre uma tensão mecânica, que induz uma variação de resistência no resistor. Medindo esta variação consegue-se quantificar a força aplicada. A Figura 2.21B sumariza o processo de fabrico deste dispositivo recorrendo a papel de cromatografia (0.34 mm de espessura) e cortando a laser. Este processo pode ser completado em apenas 1 hora e pode ser efetuado num laboratório comum sem atmosfera controlada. [5]

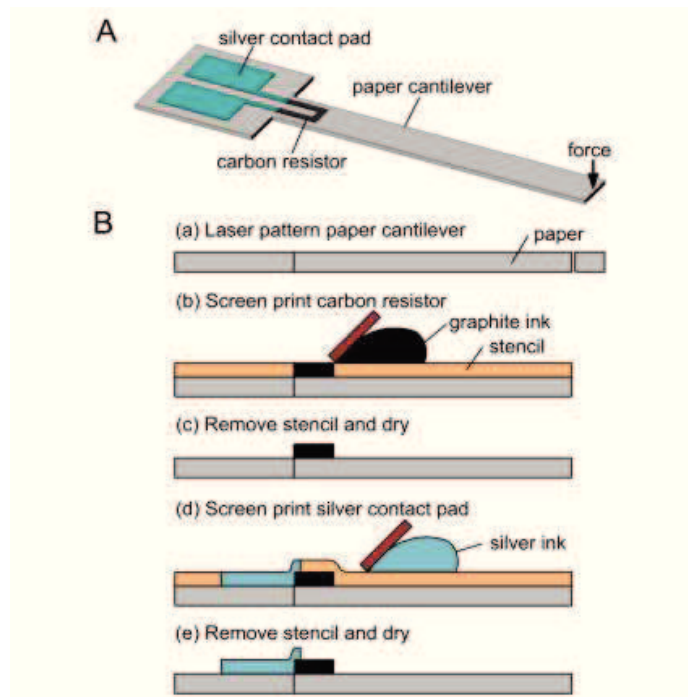


Figura 2.21 – Sensor de força piezoresistivo à base de papel. (A) Vista esquemática do sensor de força com base em papel usando resistor de carbono como componente sensível. (B) Processo de fabrico do sensor à base de papel

Com o intuito de converter a variação de resistência do sensor num sinal elétrico (tensão), recorreu-se a uma ponte Wheatstone como pode ser visto na Figura 2.22. [5]

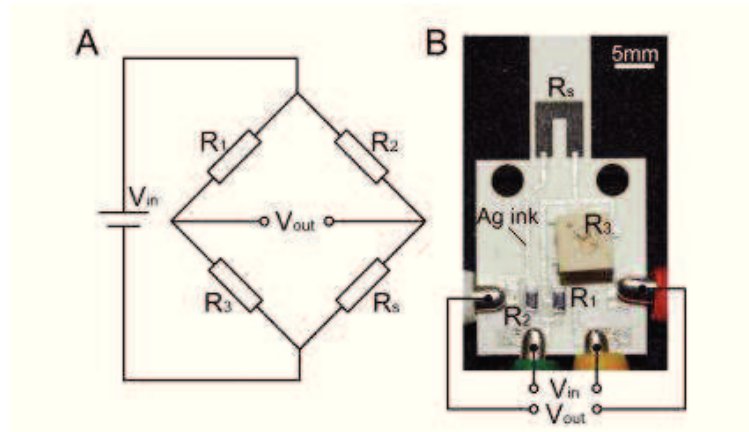


Figura 2.22 – Integração monolítica de uma ponte Wheatstone num sensor baseado em papel. (A) Esquema. (B) Fotografia da ponte Wheatstone colocada na base do sensor

A tecnologia MEMS baseada em papel oferece 4 vantagens:

- ✓ Apresenta uma solução simples, rápida e barata para construir certos tipos de dispositivos;
- ✓ O facto de o papel ser de fácil obtenção, leve, abundante, fácil de manufaturar e de fácil tratamento;
- ✓ O fabrico de dispositivos MEMS baseados em papel serem simples e envolver ferramentas baratas, podendo a prototipagem ocorrer com ferramentas muito simples;
- ✓ O papel pode ser usado como substrato para camadas de circuitos elétricos, permitindo aos circuitos elétricos serem processados e rapidamente integrados com sensores à base de papel. [5]

Stuhebnikov estudou a possibilidade do silício de ser conjugado com uma estrutura heteroepitaxial “silicon-on-sapphire” (SOS). A vantagem evidente no uso de SOS é a extensão significativa do intervalo de temperatura de operação devido à ausência de junções “p-n” (responsáveis pela não-linearidade e dependência da temperatura em transdutores). Conseguiu-se produzir sensores de força e pressão operando numa larga gama de temperatura (desde  $-272$  a  $+350$  °C) com grande precisão e estáveis a radiação de ionização. Embora a membrana SOS nos sensores de pressão possam ser semelhantes em termos de ligação química a membranas de silício, a elevada estabilidade química e a dureza da safira tornam a SOS preferível em sensores de produção em massa. [6]

O autor demonstra os benefícios do uso de SOS em vez do usual silício, atingindo uma gama muito mais alargada de temperaturas e uma boa proteção a radiação de ionização. [6] Uma comparação interessante é efetuada por Thomas Kleckers, comparando sensores de força recorrendo à tecnologia de extensómetros com os que se baseiam na tecnologia piezoelétrica. [7]

Chega-se à conclusão que a forma mecânica do desenho do elemento elástico num extensómetro determina a sensibilidade, podendo a mesma eletrónica de condicionamento de sinal e correção de erros, apesar de ser algo complexa, ser usada para todos os transdutores de força. Os transdutores piezoelétricos são conhecidos pela sua linearidade entre a força aplicada e a carga elétrica disponível como sinal de saída. Esta proporcionalidade é conhecida como o coeficiente piezoelétrico e depende unicamente do material usado, sendo independente do sensor, e necessitando de uma eletrónica apropriada para o caso em questão. Por outras palavras, os transdutores baseados em extensómetros podem ter a mesma eletrónica para todas as forças, com transdutores piezoelétricos, e um transdutor pode ser usado para todas as medições (Figura 2.23). [7]

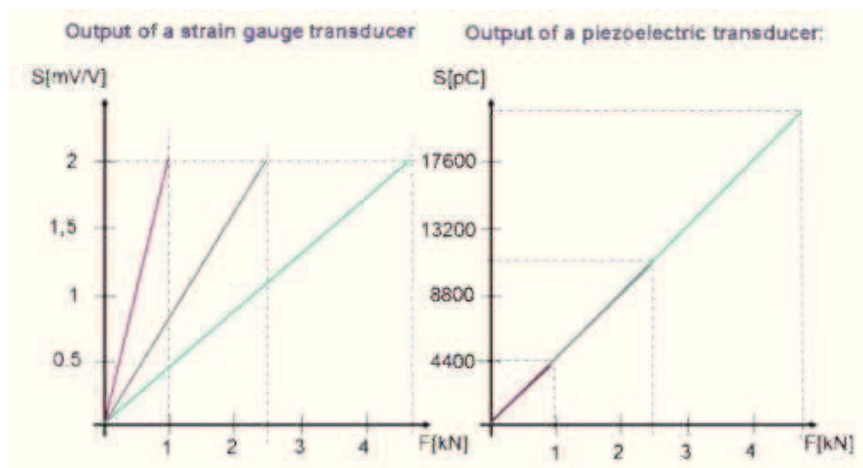


Figura 2.23 – A principal diferença entre as duas tecnologias: Com transdutores à base de extensómetros a sensibilidade depende da capacidade (esquerda); com transdutores piezoelétricos depende apenas do material do cristal usado.

O esquema de um transdutor baseado em extensómetros, numa primeira visão, pode parecer muito complexo. No entanto, o seu circuito elétrico oferece múltiplas opções de compensação, portanto, transdutores de força baseados em extensómetros conseguem obter ótimas prestações em precisão. Além disso, os efeitos da temperatura e erros de linearidade

sistemática podem ser compensados. A sensibilidade desejada pode ser ajustada para máxima precisão. Erros de histerese, linearidade e temperatura podem ter efeitos de incerteza na ordem de menos de 100 ppm relativamente a toda a escala, enquanto que os piezoelétricos estão na ordem dos %. Os transdutores piezoelétricos oferecem um modelo simples e robusto, contudo, estes não permitem a já mencionada correção de erros compensada por circuitos elétricos. [7]

Neste artigo é mostrado que os transdutores baseados em piezoeletricidade e em extensómetros não competem na mesma gama de aplicações. Se o pretendido for estabilidade por longos períodos de tempo, grande precisão e medição de pequenas forças, os transdutores baseados em extensómetros têm bastantes vantagens. Pelo contrário, se o pretendido for grande rigidez e capacidade de suportar sobrecargas, os transdutores piezoelétricos são a melhor opção. [7]

Foi produzido um micro-manipulador onde os sensores têm uma função muito importante que passa pela deteção da deformação ou força com o objetivo de melhorar o desempenho de funcionamento. Na verdade, a natureza das tensões estáticas distribuídas no estágio é compatível com esquemas de deteção de força tradicionais. Portanto, podem ser usados extensómetros na estrutura para serem sensíveis a deslocamentos e a cargas externas. O sensor embebido pode ser usado não só para feedback em malha fechada para os atuadores PZT, mas também para detetar cargas externas. Depois de estudo em Ansys, concluiu-se que os extensómetros deveriam encontrar-se nas posições mostradas na Figura 2.24, nas extremidades das vigas elásticas. Foram selecionadas as extremidades interiores das vigas centrais para conter os extensómetros para detetarem as tensões axiais segundo a direção X e Y que surgem devido a  $F_x$  e  $F_y$ . [8]

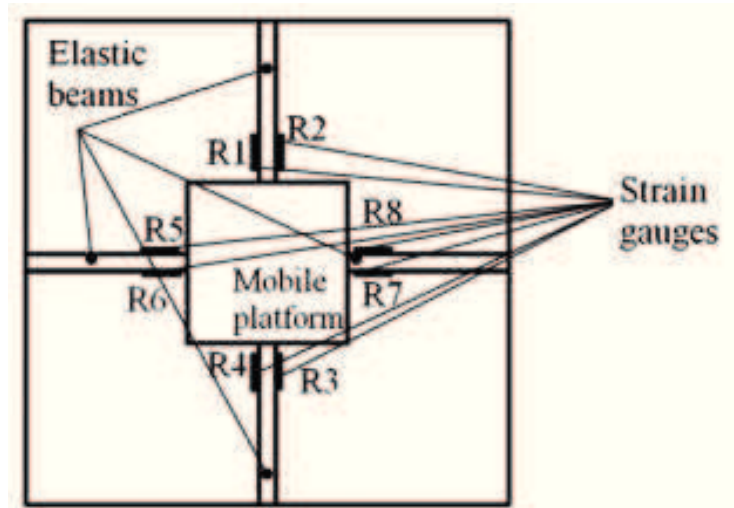


Figura 2.24 – Arranjo dos extensómetros nas vigas elásticas

Como é mostrado na Figura 2.25, combina-se os extensómetros R1, R2, R3 e R4 nas vigas elásticas centrais ao longo da direção radial como grupo x para detetar a força tangencial  $F_x$ , os extensómetros R5, R6, R7 e R8 nas outras duas vigas elásticas centrais ao longo da direção radial, perpendiculares ao grupo x pois o grupo y é responsável por detetar a força tangencial  $F_y$ . Para converter a variação da resistência devido à tensão mecânica em tensão elétrica, proporcionalmente foi usado um circuito. Pelo facto de a ponte Wheatstone ter um alto desempenho, alta sensibilidade, ampla faixa de medição, simplicidade e grande precisão, cumpre os requisitos do projeto. De acordo com a análise de tensão e a posição dos extensómetros, o modo de conexão da ponte de Wheatstone neste sensor embebido é determinado e mostrado na Figura 2.25. Os dois grupos do extensómetros estão conectados em circuito full-bridge, em que em cada braço da ponte está um extensómetro. [8]

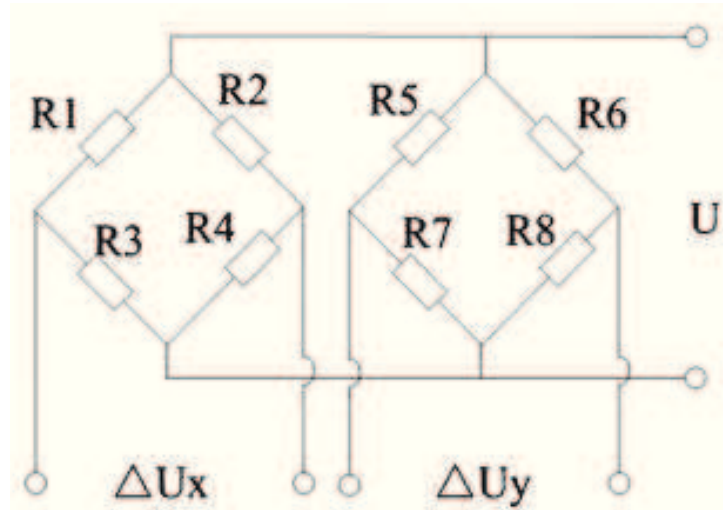


Figura 2.25 – Conexões da ponte dos extensômetros

Os sensores de micro forças mais comercializados são sensores capacitivos, piezoelétricos e piezoresistivos. Yu Sun e Bradley J Nelson desenvolveram um sensor de força bi-axial capacitivo capaz de caracterizar forças até  $490 \mu\text{N}$  com resolução de  $0.01 \mu\text{N}$  em “x”, e até  $900 \mu\text{N}$  com resolução de  $0.24 \mu\text{N}$  em “y” embora com uma estrutura complicada e seguida de um circuito de tratamento difícil de ser fabricado. O sensor capacitivo tem boa resolução, mas estrutura e circuito de tratamento complicados, e o sensor piezoelétrico é difícil de testar a força na gama dos  $\mu\text{N}$ . [9]

Sendo o sensor mais maturo, o sensor piezoresistivo, tem uma boa gama de medição, boa linearidade e circuito de medição simples, tem a maior magnitude e as maiores categorias. Um sensor de força tridimensional à base de silício, fundamentado na piezoresistividade, foi desenvolvido por E. Vzsonyi, M. Adama, Cs. Ducso, Z. Vizvary, A.L. T’oth e I. Barsony contém uma haste retangular, como elemento táctil, emergindo para fora vindo do centro da membrana formada por duas fases de processo de corrosão anisotrópica. Na gama de  $0.5 \text{ N}$  a  $2 \text{ N}$ , o sensor tem boa linearidade e sensibilidade, mas baixa resolução, e a haste não é suficientemente comprida para micro-operação de destreza. Um sensor de força tri-axial com uma sonda de metal usada para a metrologia dimensional de micro-componentes foi introduzido por P. Ruther, J. Bartholomeyczik e A. Trautmann. O componente central do sensor é a estrutura transversal flexível e a resolução lateral é cerca de  $10 \text{ nm}$  tendo a desvantagem de ser facilmente afetado por uma força magnética devido à sonda ser metálica. [9]

É proposto um sensor de força com sonda longa baseado no efeito piezoresistivo, podendo medir micro forças tri-axiais com resolução na gama dos  $\mu\text{N}$ , recorrendo a fibra ótica como sonda para minimizar os efeitos de perturbação magnética, Figura 2.26. A fibra ótica foi seleccionada devido ao seu baixo custo, elevada sensibilidade, resistência eletromagnética insuperável, e por ser pequena o suficiente para detetar micro objetos. O sensor pode ser amplamente utilizado para metrologia dimensional de micro objectos no campo micro e medições de micro forças no campo biomédico e dedos de robôs. [9]

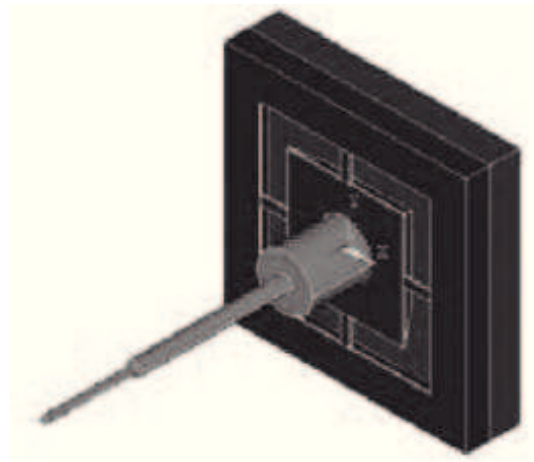


Figura 2.26 – Estrutura do sensor

A sonda tem 5 mm de comprimento com a estrutura de escada, o passo final é de  $900\ \mu\text{m}$  de diâmetro, o segundo de  $250\ \mu\text{m}$  e a ponta de  $125\ \mu\text{m}$ . O núcleo do sensor é a estrutura transversal flexível, sendo fabricado em borracha SOI (Silicon On Insulator) por tecnologias de micromaquinação. Existem 12 piezoresistores dopados em 4 vigas, usados para detetar a força. A dimensão da estrutura é de  $4 \times 4 \times 0.4\ \text{mm}$ , e as vigas são  $450 \times 150 \times 35\ \mu\text{m}$ . A parte inferior do sensor é um vidro quadrado com dimensão de  $4 \times 4 \times 0.5\ \text{mm}$  a proteger o sensor de sobrecarga. [9]

O sensor de força trabalha como é mostrado na Figura 2.27. Quando a força é aplicada na sonda provida da direção “x”, “y” e/ou “z”, a força é transmitida para a plataforma no resultado de deformação das vigas. Com a alteração dos piezoresistores causada pela tensão distribuída nas vigas, a tensão elétrica de saída do sensor variará de forma proporcional à força aplicada. [9]



Figura 2.27 – Modelo de deformação do sensor quando aplicada uma força das três orientações

Foram comparados os valores obtidos pela análise teórica com os obtidos por método FEM (Finite Element Method), recorrendo ao software ANSYS para calcular a tensão e compressão, e definir a posição dos piezoresistores. Comprovada a fórmula teórica do sensor com o software, os resistores devem ser colocados nos extremos das vigas, como mostra a Figura 2.28. [9]

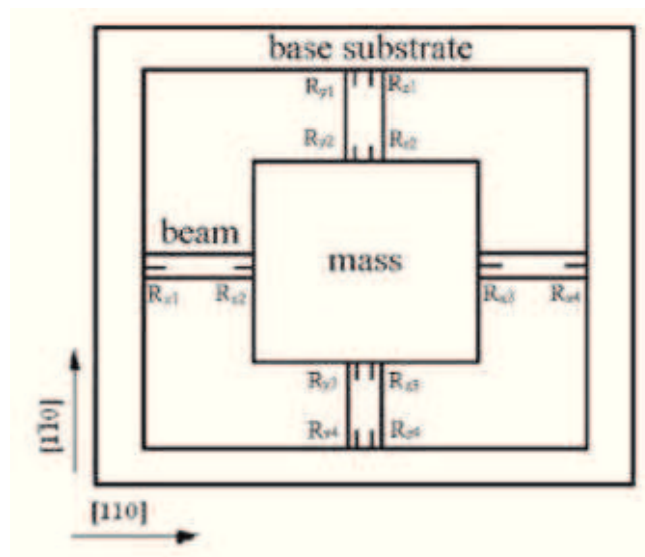


Figura 2.28 – Distribuição dos piezoresistores no sensor

Experimentalmente, a força aplicada na sonda foi de 0 a 1000  $\mu\text{N}$ . A resolução do sensor obtida foi melhor do que 3  $\mu\text{N}$ . A sensibilidade foi de 0.1682 mV/uN e 0.0106 mV/uN nas orientações “x” e “z”, respetivamente, e a não-linearidade da tensão elétrica de saída foi de 0.19 %/FS e 0.94 %/FS nas orientações “x” e “z”, tendo o sensor boas características. [9]

Ao contrário do que acontece na escala macro, em que as forças a considerar se baseiam basicamente nas forças volumétricas relacionadas com a massa, tais como o peso e a

inércia, na escala micro e nano tudo se torna mais complexo. Com o aumento do rácio superfície/volume, as forças de superfície ganham uma maior influência no balanço das forças e o peso das forças volumétricas decai. Duas outras forças de superfície são a eletrostática e forças de capilaridade. [10]

Medições de força na gama micro têm principalmente dois objetivos: Linha de montagem ou aplicações biológicas. Nas linhas de montagem são habitualmente usados para deteção de contato, forças de aperto, etapas de calibração e testes e/ou controlo; em aplicações biológicas são geralmente usados para determinar propriedades das membranas celulares, força de injeção na célula, adesão da célula e força molecular. [10]

Qualquer sinal de força pode ser usado de duas maneiras:

- ✓ Sinal de controlo para um sistema de automação. Dependendo das capacidades do sensor, este pode ser apenas um comutador entre dois pontos ou um valor do qual depende uma decisão.
- ✓ Pode ser usado para um processo de caracterização. Os requisitos neste caso, são largamente superiores, devendo-se ao facto de ser precisa maior resolução, pois este faz a calibração, comparando com o objeto/sensor a ser calibrado. No entanto, nestes casos, o sensor tem de entregar valores absolutos de força.

Entre a gama micro e nano, os sensores de micro força têm de abranger uma larga gama. No mercado, os sensores convencionais com valores nominais mais pequenos estão na ordem dos 0.5 N. A sua resolução é cerca de 0.001 N. Geralmente, estes são baseados em tecnologias de extensómetros metálicos. Outros sensores de força, recorrendo aos princípios piezoresistivos ou capacitivos e feitos de silício, têm um valor nominal mais baixo estando na ordem dos mN ou menos. Estes sensores usualmente recorrem ao princípio piezoresistivo ou capacitivo e são fabricados em silício. Para gamas menores, na ordem das dezenas de nN, estão disponíveis sensores recorrendo a AFM (Atomic Force Microscopy). Abaixo desta gama podem ser usados OT (Optical tweezers), que trabalham na gama dos pN. [10]

Existem no entanto duas falhas:

- ✓ Na gama dos mN. Neste regime o material do transdutor passa do metal clássico para o silício. Estruturas metálicas não são sensíveis o suficiente e são afetadas por oscilações. Por outro lado, o silício é demasiado duro para combinar robustez contra sobrecargas de forças originadas por influências ambientais.
- ✓ Entre AFM e OT. Nesta gama entre pouco menos do que nN até alguns pN, não existem transdutores desenvolvidos. Mesmo estruturas de silício se tornam demasiado delicadas.

Foram sugeridas, três soluções para sensores de micro força. A primeira foi o desenvolvimento de um sensor baseado em extensómetros para medição de força de injeção. O processo de projeto levou ao fabrico de um disco transdutor metálico como pode ser visto na Figura 2.29. A segunda, depois de analisados os extensómetros disponíveis comercialmente, foi apresentada a construção e testes de extensómetros diretamente escritos. Este método possibilitou a aplicação de extensómetros de tamanho micro (por meio de EBiD (Electron Beam-Induced Deposition)), com propriedades próximas das industriais, em superfícies onde estava presente tensão para medição da força, pode ser visto na Figura 2.30. A terceira solução apresentava um sensor de força tátil trabalhando no princípio de “touch-trigger”, sendo usado em linhas de montagem para detetar o contacto entre objetos e ferramentas. [10]

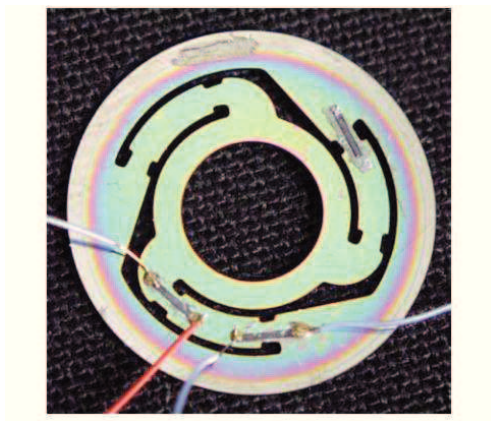


Figura 2.29 – As várias cores são devido ao calor durante projeção da camada isoladora (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no disco transdutor. Podem ser vistos dois extensómetros semicondutores

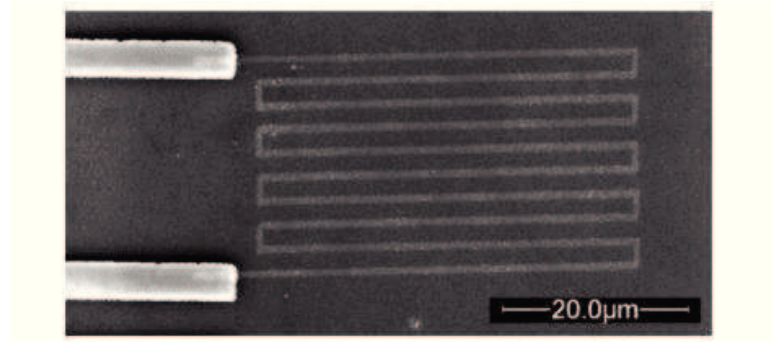


Figura 2.30 – Imagem SEM da estrutura sensível. As curvas têm uma largura de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$ . A resistência inicial é de cerca de 80  $\text{k}\Omega$

Nos últimos anos, avanços na instrumentação levaram a um progresso considerável na compreensão da mecanotransdução celular. Vários estudos estabeleceram que as células vivas respondem a estímulos mecânicos, respondendo mecanicamente e bioquimicamente. As técnicas mais comuns para o estudo da resposta mecânica de uma única célula são microscopia de força atômica (atomic force microscopy), citometria de torção magnética (magnetic twisting cytometry), aspiração por micropipeta (micropipette aspiration), captura óptica (optical trapping) e alongamento ótico (optical stretching). Estas técnicas frequentemente estudam a resposta das células a pequenas deformações (1-2  $\mu\text{m}$ ), ou têm uma gama de medição de forças reduzida (aproximadamente 1 nN). Neste artigo é concebido um micro sensor totalmente novo para permitir o estudo de maiores deformações de células. Este combina grandes resoluções de força (aproximadamente 50-500 pN) assim como uma gama larga de medição (medições de força até 1  $\mu\text{N}$ ). [11]

Os sensores de força são compostos por um sistema de vigas flexíveis idênticas, ligadas a uma sonda rígida e a uma viga fixa que serve como referência para a medição de deslocamento, Figura 2.31. O princípio de funcionamento do sensor de força baseia-se no seguinte: Quando sujeitas a uma força externa, as vigas deformam e a sua deflexão total é medida óticamente, medindo o deslocamento relativo entre a sonda e a viga de referência. A força externa é dada pela deflexão total das vigas, multiplicada pela sua rigidez combinada. A rigidez combinada das vigas é calculada pela geometria e verificada independentemente por calibração. [11]

Como pode ser visto na Figura 2.31, o elemento básico de repetição do sensor de força é a

armação, que é composta por duas vigas flexíveis ligadas na sua extremidade por uma barra rígida espessa. A estrutura da armação foi escolhida porque aumenta substancialmente a rigidez no plano de rotação do sensor de força, assegurando que a sonda se desvia apenas ao longo do eixo “x” e a integridade estrutural do sensor é mantida. A vantagem de usar uma estrutura de armação pode ser compreendida comparando o ângulo de rotação de uma única viga com a da armação, sujeitos a um momento “M”. A rotação de uma única viga é dada pela equação (16).

$$\theta_s = \frac{Ml}{EI} \quad (16)$$

A rotação correspondente na armação é dado pela equação (17).

$$\theta_f = \frac{Ml}{2E(I + I^*)} \quad (17)$$

$E = 170$  GPa sendo o módulo de Young do silício,  $I = tw^3/12$  e  $I^* = wtd^2/4$ . “t”, “w” e “l” são a profundidade, largura e comprimento das vigas onde “d” é a distância entre vigas da armação. As dimensões típicas das vigas no sensor de força são de “t”= 30-40  $\mu\text{m}$ , “w” = 2-4  $\mu\text{m}$ , “l” = 2-3 mm, enquanto o número de armações (N) é de cerca de 20. [11]

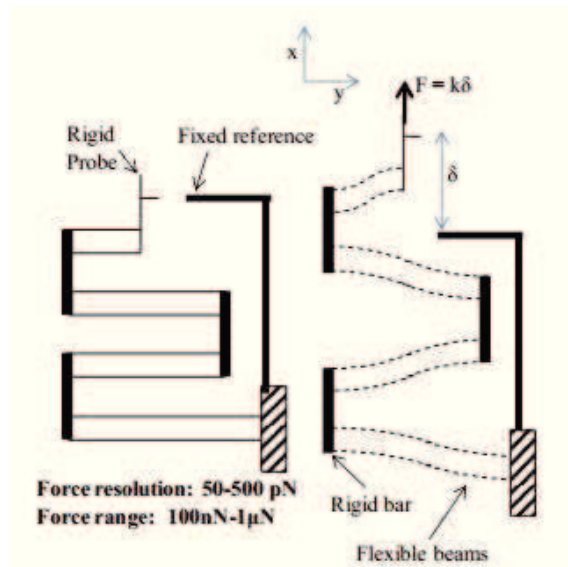


Figura 2.31 – Esquema do sensor de força. Devido à concepção em armaduras o sensor de força apenas deflete na direção “x”

Nos sensores de força, as armações são ligadas em série. Portanto, a rigidez combinada na direção “x” é de  $1/N$  vezes a rigidez de cada armação. Como resultado, o sensor de força pode ter alta sensibilidade mesmo com a rigidez de armações individuais não muito alta. Além disso, a sensibilidade e a gama dos sensores de força podem ser alteradas simplesmente variando o  $N$  sem alterar as dimensões das vigas que constituem o sensor de força. Mais importante, esta concepção conduz a uma relação altamente linear de força-deslocamento, Figura 2.32. Isto porque, quando a deflexão total é grande, a deflexão individual é pequena e, conseqüentemente, os efeitos não lineares são insignificantes. [11]

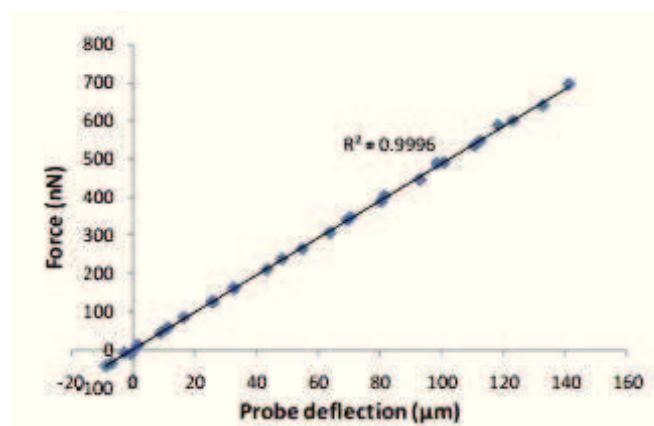


Figura 2.32 – Força-deflexão característica do sensor ( $k=4.8 \text{ nN}/\mu\text{m}$ ) mostrando uma linearidade para uma larga gama de deformação (aprox.  $150 \mu\text{m}$ ). Resolução de deslocamento de  $100 \text{ nm}$  leva a resoluções de força de aprox.  $500 \text{ pN}$ .

Um dos principais obstáculos para a utilização de sensores de força micromecânicos em aplicações biológicas é o dano causado por forças de capilaridade durante a imersão e remoção de ambientes aquosos. As forças capilares surgem porque o menisco que se forma entre a superfície da água e o sensor de força tem de ser quebrado para o sensor poder ser imerso ou removido da água. Foi estabelecido um sistema novo de modo a evitar danos nos sensores de força devido às forças de capilaridade. O artigo apresenta a seguinte solução: Em primeiro lugar, o lado inferior do sensor de força é revestido com uma película de alumínio ainda intacto sendo colada a uma placa de vidro de  $150 \mu\text{m}$  de espessura ( $5 \times 7 \text{ mm}$ ). O vidro do sensor é então imerso para um copo com uma solução diluída de AZ 327 MIF. O sensor de força deixa de estar exposto a forças de capilaridade de menisco tanto durante a imersão como na remoção da água, evitando assim danos estruturais devido às mesmas. [11]

## ***Metodologia***

---

Este capítulo consiste no desenvolvimento de um sensor de força, com todos os passos efetuados no sentido de atingir a geometria o mais sensível possível. Começou-se por experimentar algumas geometrias e conceitos que se previa originarem bons resultados. No entanto, estes não foram tão bons como os criados com figuras elementares, tais como os quadrados e círculos. Os círculos mostravam ser a forma ideal. Depois de alguns testes em que se verificou existir o problema de apresentarem um stress em  $y$  muito elevado, substituiu-se esta forma por trapézios por apresentarem uma transição mais acentuada de área e por conseguirem, em simultâneo, remover mais área à estrutura, permitindo ultrapassar aquele problema. Foi otimizada esta geometria de modo a ter a melhor sensibilidade possível. De seguida foram testadas diversas configurações de disposição de extensómetros, comparando as vantagens e desvantagens entre cada configuração. Por fim, foi analisado o número de elementos finitos necessários ao estudo através de dois testes de convergência: pelo stress de Von Mises e pela análise modal.

### **3.1 Software**

O software escolhido para o desenvolvimento foi o Ansys Multiphysics 14. O motivo desta escolha em detrimento de outras, como por exemplo o Ansys Workbench, recaiu no facto de ter um maior controlo das dimensões da malha e à possibilidade de se poder trabalhar através da programação. O número elevado de testes a efetuar com pequenas alterações é muito facilitado recorrendo à programação, pois evita a necessidade de repetir as mesmas operações diversas vezes. Tendo em conta a possibilidade de se recorrer à programação e de esta possibilitar a redução do tamanho dos ficheiros em mais de cem vezes, optou-se

pelo software Ansys Multiphysics 14.

### **3.2 Desenvolvimento do sensor de força**

Das tecnologias referidas anteriormente foi selecionada a medição de força através da piezoresistência dos materiais. Esta escolha foi ponderada tendo em conta os custos (reduzidos), a linearidade (elevada), o acesso à tecnologia para a produção dos mesmos, por ser a tecnologia atualmente mais usada e por permitir ter custos considerados acessíveis no tratamento de sinal (os sensores apresentam uma boa sensibilidade e uma ponte Wheatstone com circuito amplificador de instrumentação são suficientes para o tratamento de sinal).

O sensor tem de obedecer a algumas limitações de construção por micro-maquinação, estas regras estão presentes no Apêndice I e foram facultadas pela empresa “Sensoron Technologies AS”.

Foi despendido um tempo para a especialização no programa de simulação Ansys, inicialmente, não recorrendo à programação por ficheiros de comando, foi testada a geometria da Figura 2.28 para posterior comparação com geometrias novas. Rapidamente houve a percepção de que qualquer alteração na geometria que se pretendesse fazer necessitava de um enorme tempo dispendido quando a alteração desejada pouco diferia da feita anteriormente. Tendo em conta este aspeto, o método de efetuar os testes teve de ser alterado para a programação por ficheiros de comando, com uma linguagem própria. O manual do Software Ansys apresenta uma explicação detalhada das funções usadas neste método.

Posteriormente à aprendizagem do programa e à maneira de programar começou-se por criar um bloco de 3 x 3 x 0.4 mm, estas medidas são inerentes ao processo de micro maquinação, podendo ser escolhido entre 6 x 6 x 0.4 mm e 3 x 3 x 0.4 mm. Esta última foi a selecionada por se conseguirem melhores resultados (miniaturização) e ser mais barato (1/4 do silício). Neste foram feitos vários furos desde, quadrados, rectângulos, trapézios, círculos e semi-círculos tendo em vista a otimização das geometrias em estudo.

Segundo a equação (9) e sabendo que as constantes de piezoresistividade do processo considerado são respectivamente  $5.9 \times 10^{-10}$  e  $-5.4 \times 10^{-10}$ , a geometria é tanto melhor quando maior for, na zona do elemento sensível, o stress em x e menor o stress em y.

Das geometrias testadas a que deu melhores resultados foi a dos “círculos” (Figura 3.3 e Figura 3.4). Nas simulações realizadas adicionou-se uma base às geometrias dos sensores. Esta base é de maiores dimensões do que o sensor e elimina o momento fletor, esta base é ainda uma maior aproximação ao contexto onde o sensor se encontrará pois este será colado a uma determinada superfície com maior rigidez do que o sensor. O desempenho da geometria também aumenta quando os círculos estão mais próximos, ou seja, quando a espessura entre os furos é mínima, limitada pelos parâmetros de construção (neste caso 20  $\mu\text{m}$  com sensor).

Foram exploradas outras soluções, tais como o uso de um sistema de alavancas (Figura 3.1) tendo o intuito de aumentar ainda mais o stress em x e uma geometria em anel sugerida por Baltes et al. (2005) [12] como se mostra na Figura 3.2.

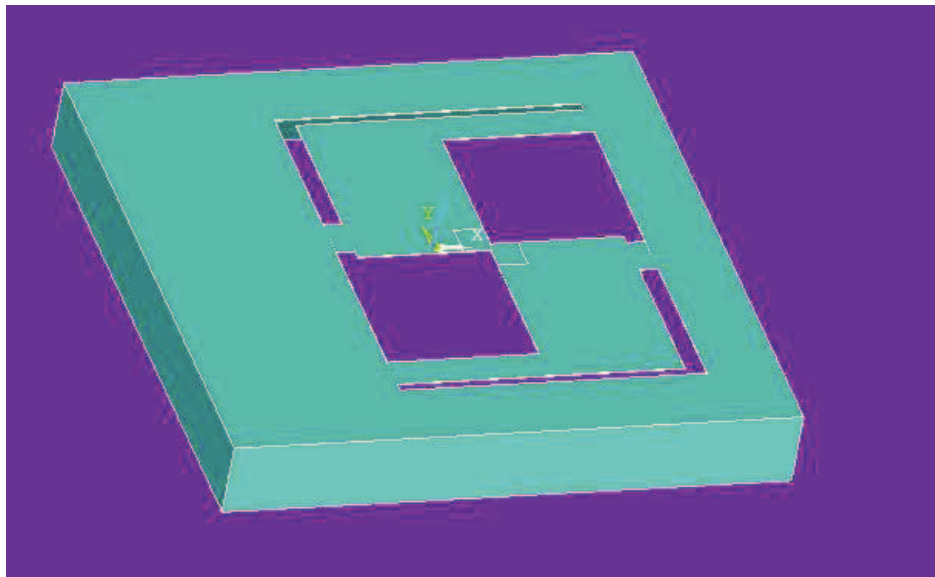


Figura 3.1 – Geometria recorrendo a alavancas

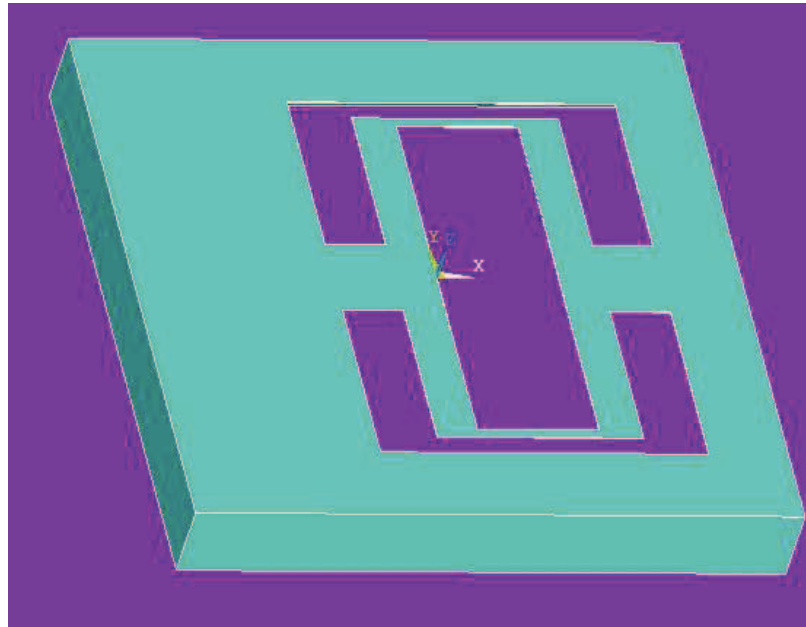


Figura 3.2 – Geometria em anel

Ambos os conceitos foram testados e otimizados parametricamente, espessuras das diferentes barras, distâncias ao centro, entre outras grandezas, de modo a obter a melhor solução para cada um dos conceitos. Ainda assim, apesar da sensibilidade aumentar em relação ao bloco simples, os “círculos” continuavam a apresentar o melhor desempenho (Figura 3.3 e Figura 3.4).

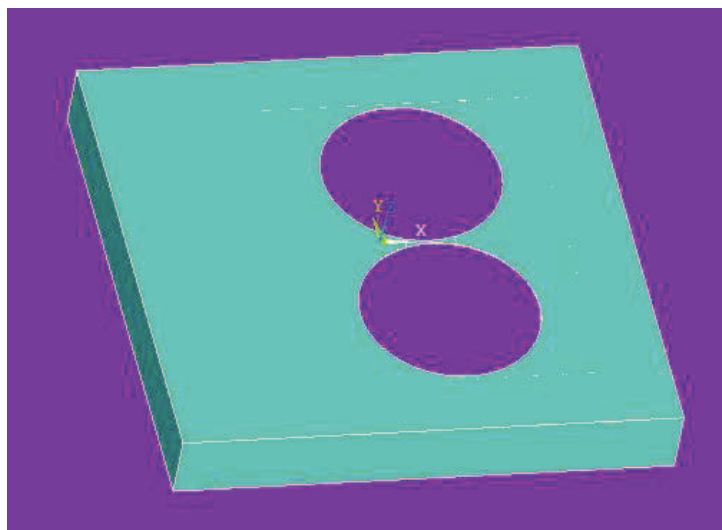


Figura 3.3 – Geometria “círculos” (vista de cima)

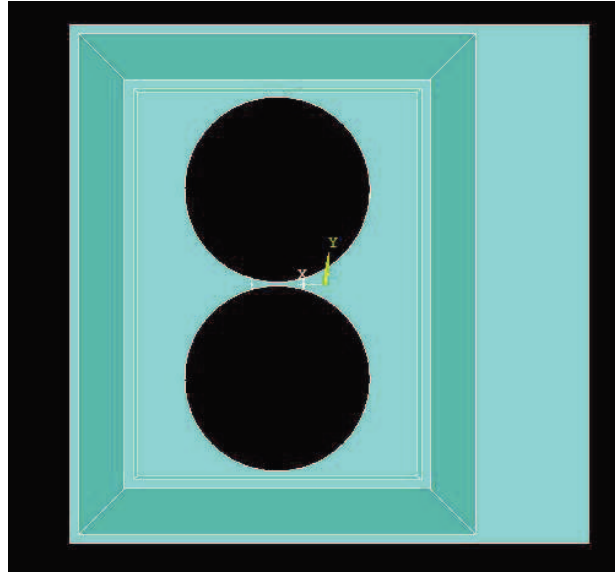


Figura 3.4 – Geometria “círculos” (vista de baixo)

Esta geometria apresentava já uma curva de stress ao longo do sensor com elevado valor de pico, como pode ser observado na Figura 3.5. Esta linha percorre o sensor no centro, longitudinalmente à força e à superfície. Pela figura é notório um grande pico de concentração de stress em x, no ponto pretendido, sendo o stress em y praticamente nulo e obtendo-se, portanto, uma grande sensibilidade no local a colocar o sensor. Nestas curvas o pretendido é ter o stress todo no ponto a alocar o elemento sensitivo e o mínimo nos restantes.

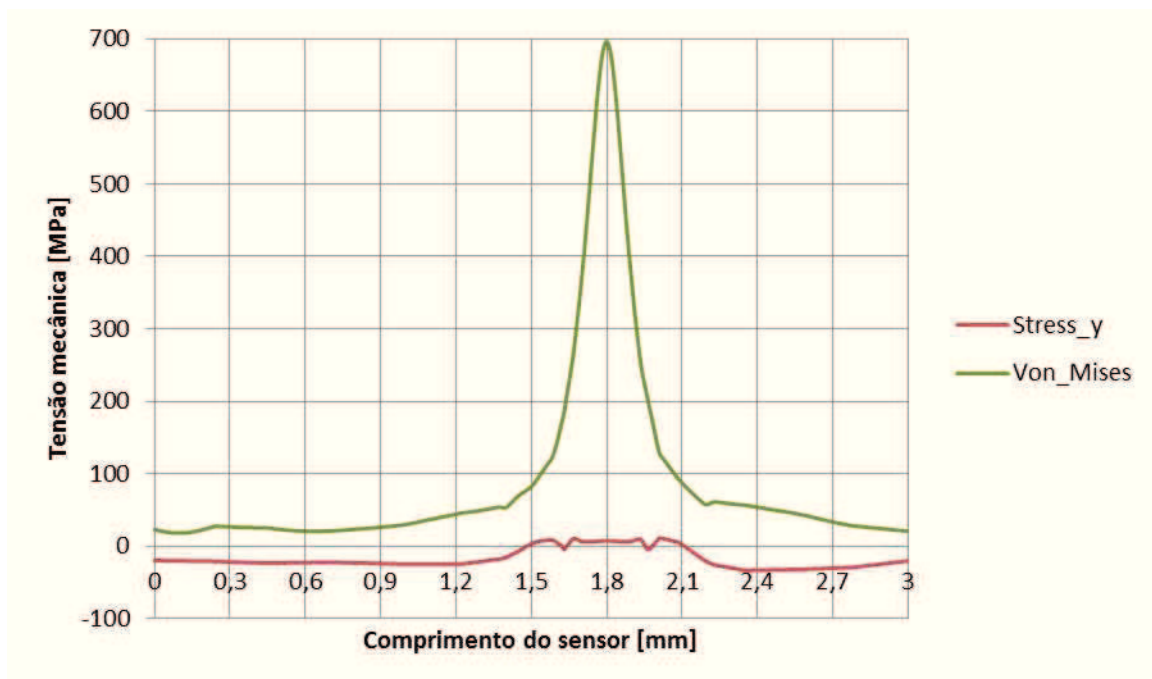


Figura 3.5 – Curva de stress ao longo do sensor para geometria “círculos”

Sempre com o intuito de aperfeiçoar, reparou-se que a variação do raio das circunferências não era linear com a melhor resposta em termos de geometria, por um lado o aumento do raio reduzia o material e desviava mais linhas de força para o centro; por outro, um raio menor fazia com que a variação de área no plano fosse mais abrupta, pelo que seria indispensável conseguir uma solução de compromisso. Foi nessa altura que surgiu a ideia de utilizar triângulos para conjugar os dois fatores acima descritos. Deste modo obtem-se uma variação mais abrupta de área no plano e maior área retirada, e conseqüentemente um aumento de desempenho da geometria.

Os resultados da simulação comprovam que os triângulos aumentaram a performance do sensor em dois aspetos: o pico aumentou muito em valor e ficou mais acentuada a curva (diminui o stress equivalente em zonas não medidas). No entanto, apareceu um problema. Conforme se pode verificar na Figura 3.6, o stress na direção  $y$  aumentou muito, ficando o desempenho desta geometria sensivelmente igual ao sensor com dois círculos.

Para diminuir este valor, que foi adicionar uma zona plana perto da zona de medição, tornando os triângulos em trapézios. Esta modificação, apesar de parecer insignificante, altera para melhor dois aspetos: consegue-se aumentar ainda mais o stress em  $x$  e reduzir o stress em  $y$ , como pode ser visualizado na Figura 3.7.

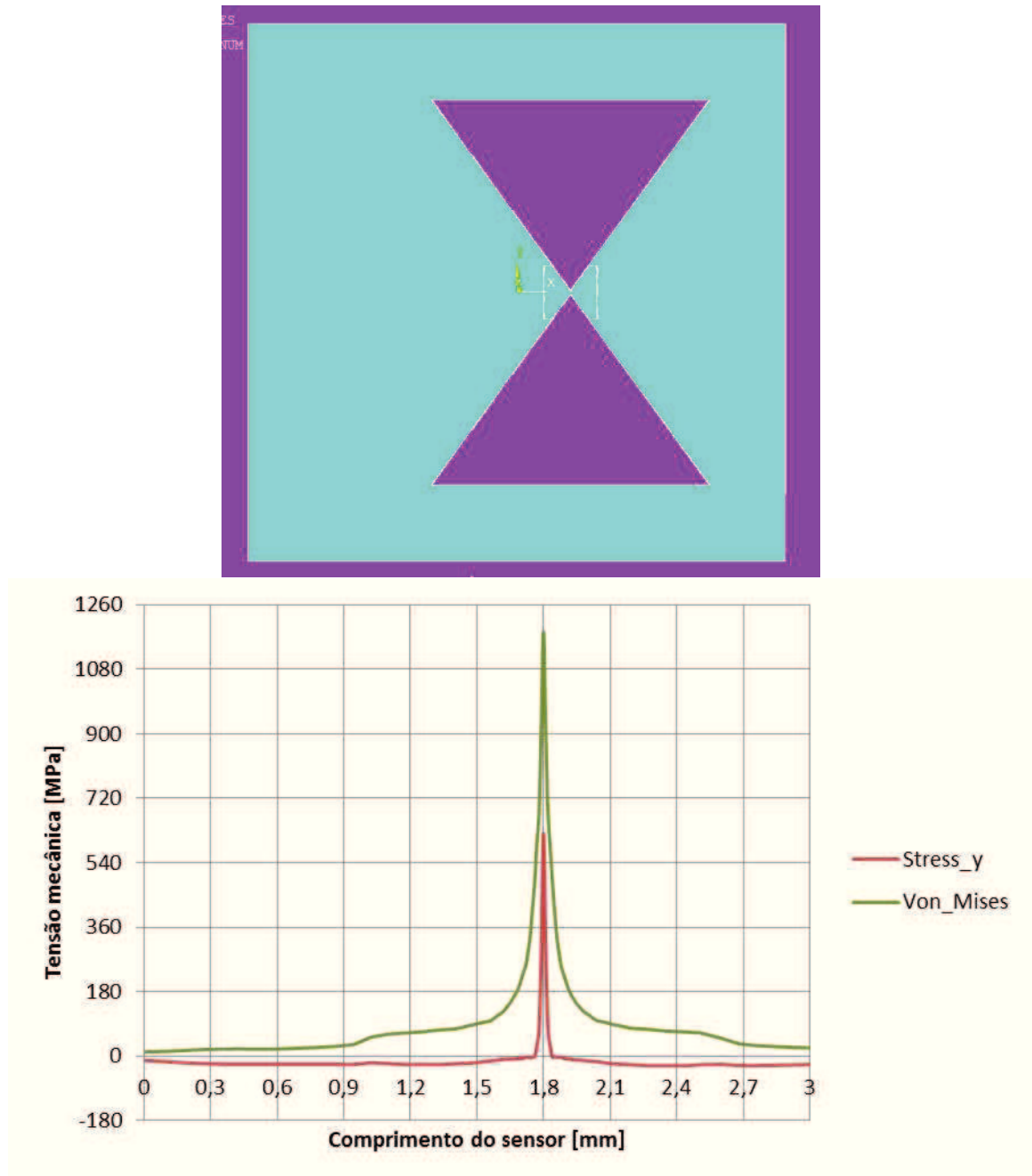


Figura 3.6 – Geometria (acima) e respetiva curva para “triângulos” (abaixo)

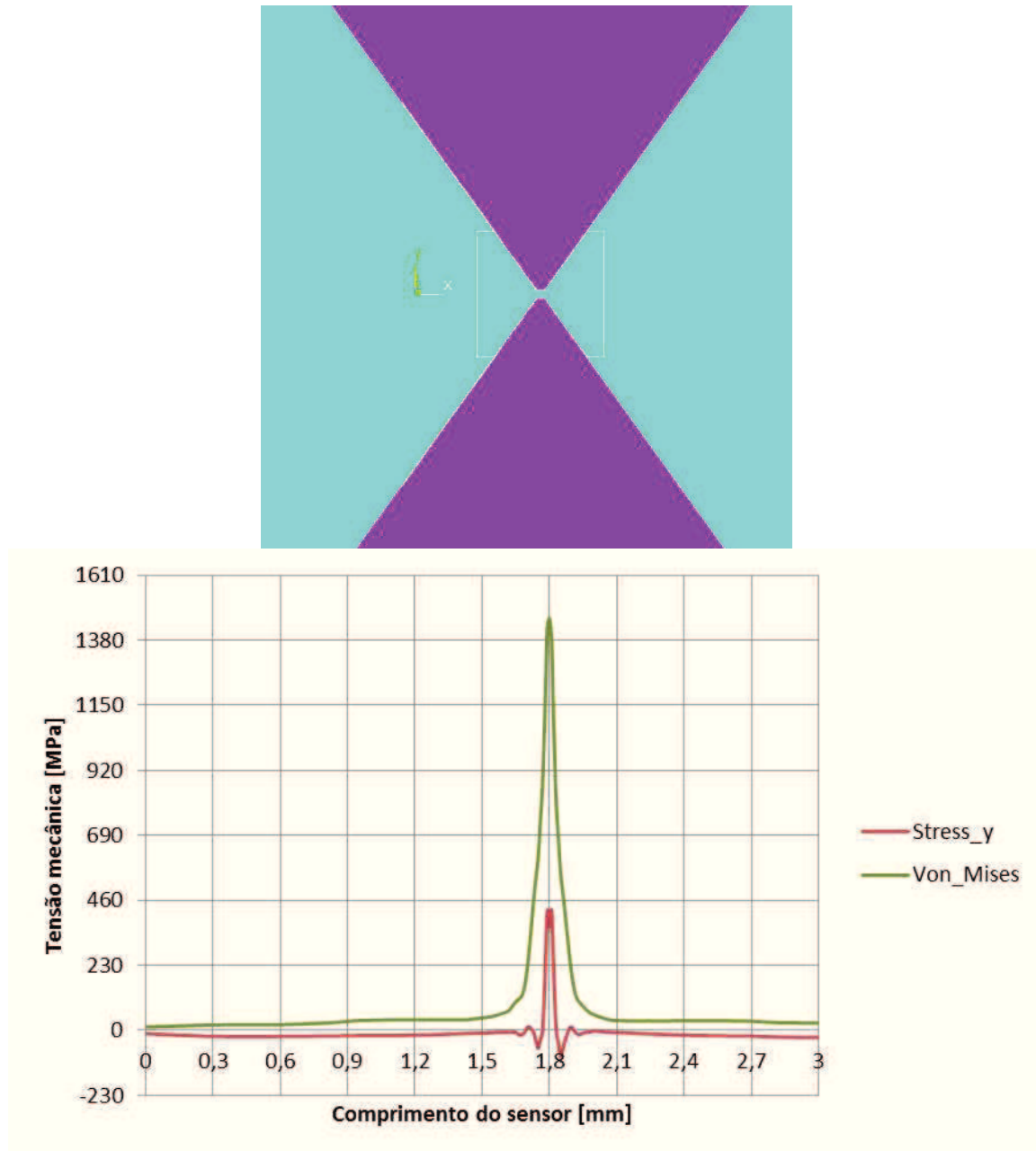


Figura 3.7 – Geometria (acima) e respetiva curva para “trapézios” (abaixo)

Por esta altura da tese levantaram-se algumas questões consideradas pertinentes que até então não tinham sido objecto de estudo: seria a posição do elemento sensor mais adequada noutra local? Seria um elemento sensor o mais adequado? Não seria melhor o uso de 4 elementos sensores?

No Apêndice II estão presentes as configurações que foram testadas para a disposição dos elementos sensores.

### 3.1.1 Configuração 1

A configuração 1 do Apêndice II é composta apenas por um elemento sensível na zona mais sensível da geometria de modo a ter uma sensibilidade máxima. Para esta configuração foram testadas as melhores geometrias até à data: os dois círculos e os trapézios. Nestas configurações foram estudadas as sensibilidades para poderem ser comparadas. A sensibilidade para o caso de um elemento sensor é dada pela equação (18).

$$Sensibilidade_1 = \frac{R_{resultante}}{R_{resultante} + R} - 0,5 \quad (18)$$

Em que R é o valor da resistência do elemento piezoresistivo em ohm e  $R_{resultante}$  é dado pela equação (19).

$$R_{resultante} = R \times [(1 + (5,9 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(x)} \times 10^6) + (-5,4 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(y)} \times 10^6))] \quad (19)$$

Tal como foi dito anteriormente, quanto melhor a tensão segundo x e menor a tensão segundo y, melhor será o desempenho da geometria, desta forma pode ser quantificada através do valor de Sensibilidade. A unidade das tensões é Mega Pascal e o  $R_{resultante}$  será dado em ohm.

O valor de Sensibilidade<sub>1</sub> representa quantos Volt por unidade de Volt aplicada variam por cada 1 Mega Pascal aplicado. Por exemplo (equação (20)), se forem aplicados 5 Volt de tensão, uma pressão de 10 MPa e a Sensibilidade<sub>1</sub> for 0.0005, teremos uma variação de:

$$\begin{aligned} \text{Variação}_{tensão} &= \text{Sensibilidade} \times \text{unidade}_{tensão} \times \text{unidade}_{pressão} \\ &=> \\ &0.0005 \times 5 \times 10 = 0.025 V \end{aligned} \quad (20)$$

Tal como o a equação (20), a unidade de tensão é Volt e a unidade de pressão é Mega Pascal.

Nesta configuração foram testadas 5 geometrias (Tabela 3.1): a melhor dos círculos desenvolvida até ao momento e quatro configurações com trapézios fazendo variar o comprimento da base menor do trapézio. Os comprimentos testados foram 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3.1 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 1

Geometria	Sensibilidade <sub>1</sub> obtida [mV/V/MPa]
“Círculos”	0.6470
“Trapézios b = 20 $\mu\text{m}$ ”	1.1307
“Trapézios b = 30 $\mu\text{m}$ ”	<b>1.2946</b>
“Trapézios b = 40 $\mu\text{m}$ ”	1.2899
“Trapézios b = 50 $\mu\text{m}$ ”	1.2289

Destes testes efetuados é notória a diferença entre as geometrias “círculos” e “trapézios”, sendo a vantagem por parte da geometria “trapézios”. Quanto ao comprimento com melhores resultados, temos o de 30  $\mu\text{m}$ . Este comprimento, ao nível de sensibilidade, apresenta um crescimento até um valor entre 30 e 40  $\mu\text{m}$ , a partir do qual começa a decrescer. Esta variação tem em conta dois aspetos:

- ✓ À medida que o comprimento aumenta, o stress em x diminui;
- ✓ À medida que o comprimento aumenta, o stress em y diminui.

Sendo aspetos com contribuição contrária para a sensibilidade, é notório que até um valor entre 30 e 40  $\mu\text{m}$  a diminuição do stress em y é maior do que a diminuição do stress em x. A partir desse valor, tal deixa de se verificar, passando a diminuição em x a ser mais significativa do que em y, originando uma diminuição da sensibilidade.

Na Figura 3.8 está representado graficamente o índice de performance, que não é mais do que a diferença entre a média do stress em x pela média do stress em y. Este índice dá-nos um termo de comparação entre as diferentes geometrias, com uma indicação da sensibilidade relativa esperada.

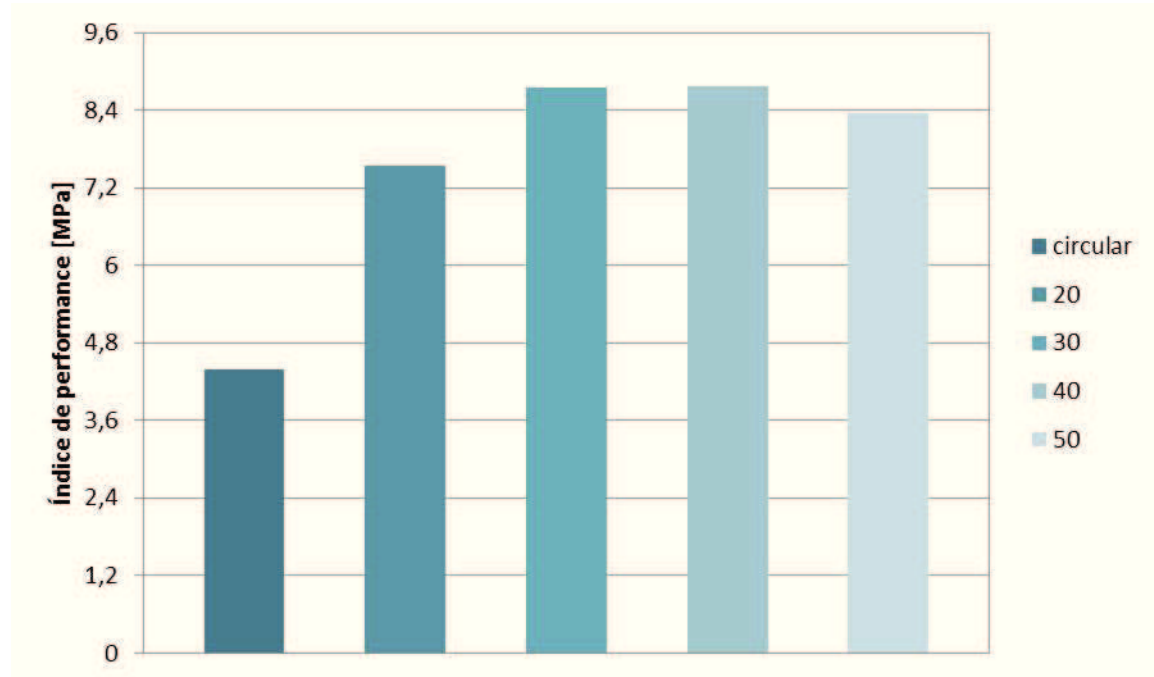


Figura 3.8 – Gráfico do índice de performance para a configuração 1

A geometria com melhor sensibilidade para a configuração 1 é a de “trapézios com a base menor de comprimento de 30  $\mu\text{m}$ ”. A geometria pode ser visualizada na Figura 3.9.

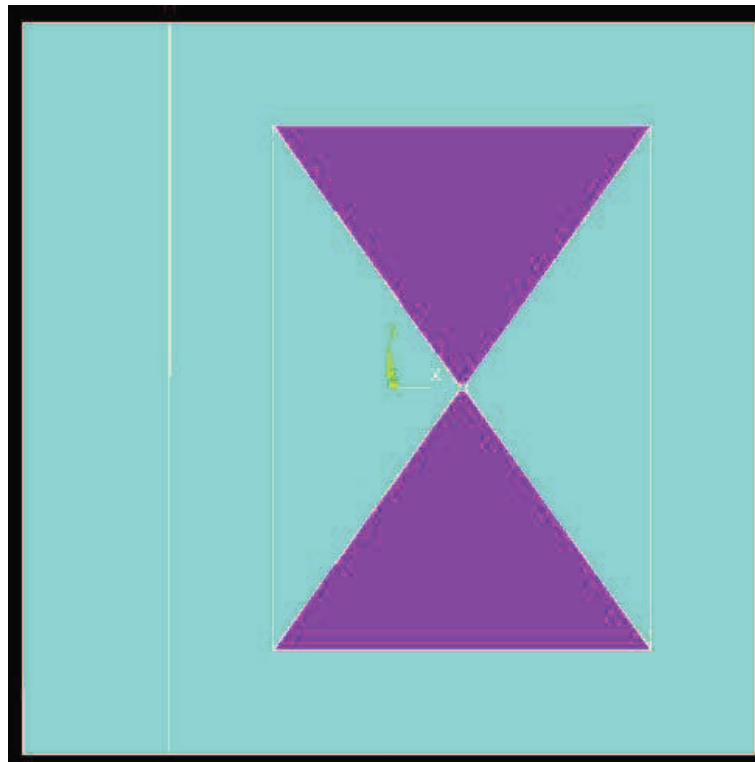


Figura 3.9 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 1

Na Figura 3.10 é notória a grande diferença entre o stress em x e o stress em y em 1.8 mm (zona a colocar o elemento sensitivo) em que temos o máximo do stress em x e o stress em y tem uma queda devido à existência do trapézio.

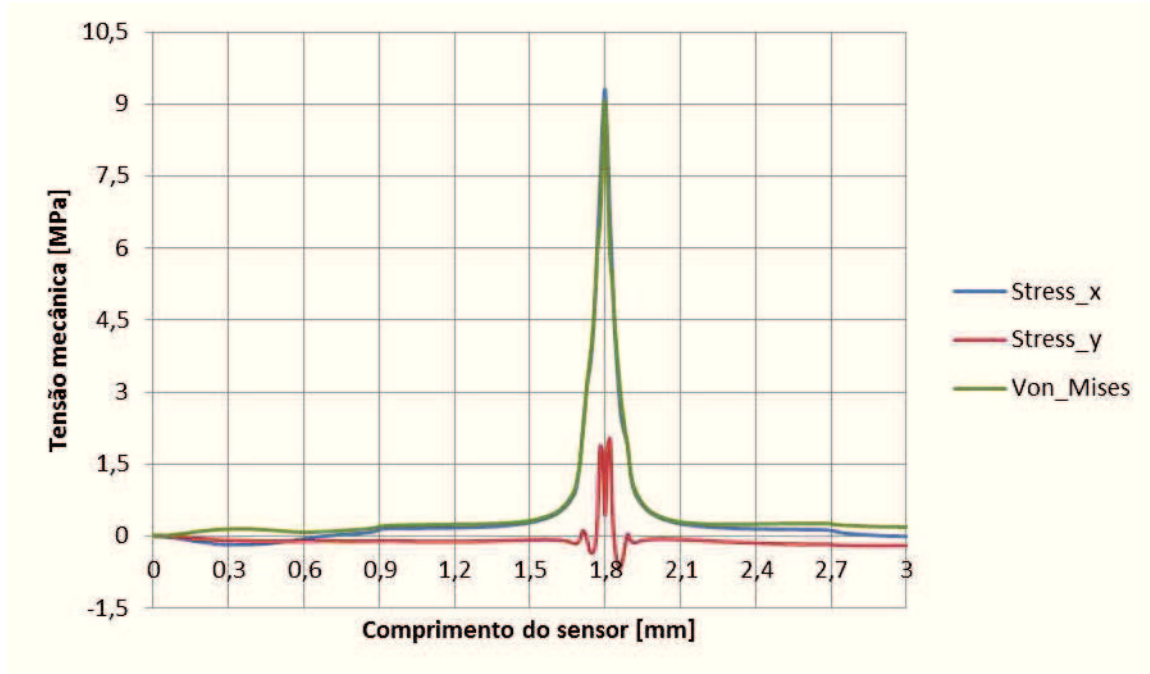


Figura 3.10 – Stress ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 1

### 3.1.2 Configuração 2

A configuração 2 do Apêndice II é composta apenas por quatro elementos sensitivos em que se tenta criar quatro zonas sensíveis dispostas no plano. Nesta geometria, apesar de se saber logo de início que não seriam atingidos valores tão elevados em cada um, por serem quatro elementos sensores, a sensibilidade é aproximadamente multiplicada por quatro (seria exatamente multiplicada por quatro se cada um sofresse rigorosamente o mesmo tipo de solicitações). Para esta configuração foram testadas três configurações: duas com triângulos com diferentes dimensões e uma com 4 círculos.

A sensibilidade agora, para o caso de quatro elementos sensores, é dada pela equação (21).

$$Sensibilidade_4 = \frac{R_{resultante(4)}}{R_{resultante(3)} + R_{resultante(4)}} - \frac{R_{resultante(2)}}{R_{resultante(1)} + R_{resultante(2)}} \quad (21)$$

Nesta fórmula da sensibilidade é notório que, nesta situação, já não existe uma resistência de referência (fixa), logo, cada elemento sensor terá um valor de resistência que tem de ser calculado individualmente. Nesta fórmula há algo muito importante a ter em conta que é o sensor 1 e o sensor 2 terem os valores mais díspares possíveis. Por outras palavras, queremos que a diferença seja a maior possível e portanto são agrupados dois a dois segundo eixos diferentes. Nota-se que se juntaram os elementos sensores 1 e 2 e os elementos sensores 3 e 4 que, tal como representado na configuração 2 do Apêndice II, estão em localizações diferentes, tomando portanto, para a mesma solicitação, comportamentos completamente diferentes acontecendo frequentemente um deles sofrer tração e o outro compressão.  $R_{resultante}$  é dado pela equação (22). A fórmula para calcular o  $R_{resultante}$  é a mesma para todos os elementos sensitivos.

$$R_{resultante(n)} = R_n \times [(1 + (5,9 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(x)_n} \times 10^6) + (-5,4 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(y)_n} \times 10^6)] \quad (22)$$

Nesta configuração foram testadas 3 geometrias (Tabela 3.2): recorrendo a quatro círculos e recorrendo a quatro triângulos com duas configurações diferentes (Figura 3.11).

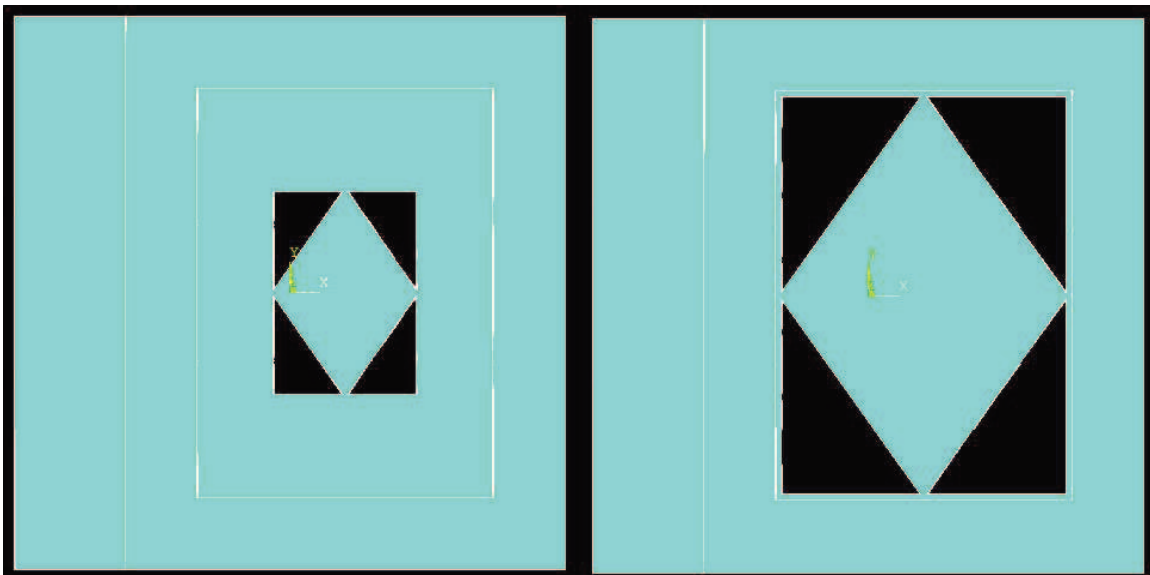


Figura 3.11 – “Triângulos geometria 1” (esquerda) e “Triângulos geometria 2” (direita)

Tabela 3.2 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 2

Geometria	Sensibilidade <sub>4</sub> obtida [mV/V/MPa]
“4 Círculos”	0.9225
“Triângulos geometria 1”	0.4604
“Triângulos geometria 2”	0.8374

Dos testes efetuados verifica-se que a geometria “4 círculos” têm melhor desempenho do que as geometrias testadas para triângulos para a configuração 2. Ainda assim, a geometria “triângulos geometria 2” tem desempenhos muito elevados em relação à geometria “triângulos geometria 1” e não muito distantes relativamente à dos “4 círculos”.

Na Figura 3.12 está representado graficamente o índice de performance.

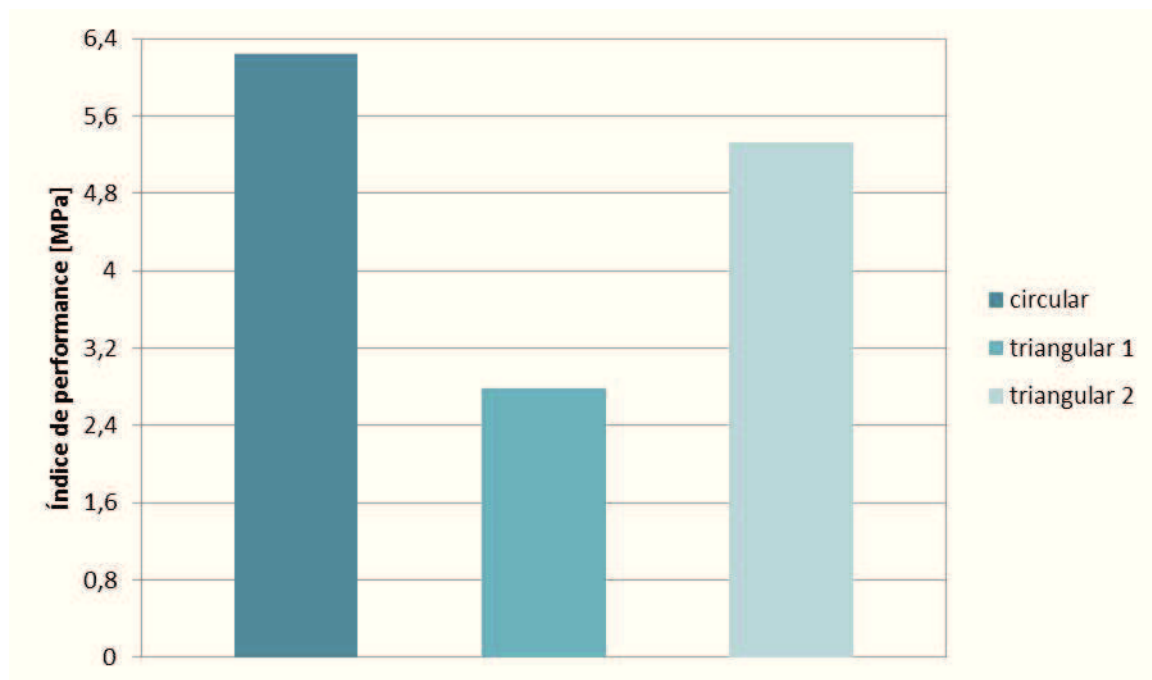


Figura 3.12 – Gráfico do índice de performance para a configuração 2

Resumindo, a geometria com melhor sensibilidade para a configuração 2 é a “4 círculos”. A geometria pode ser visualizada na Figura 3.13.

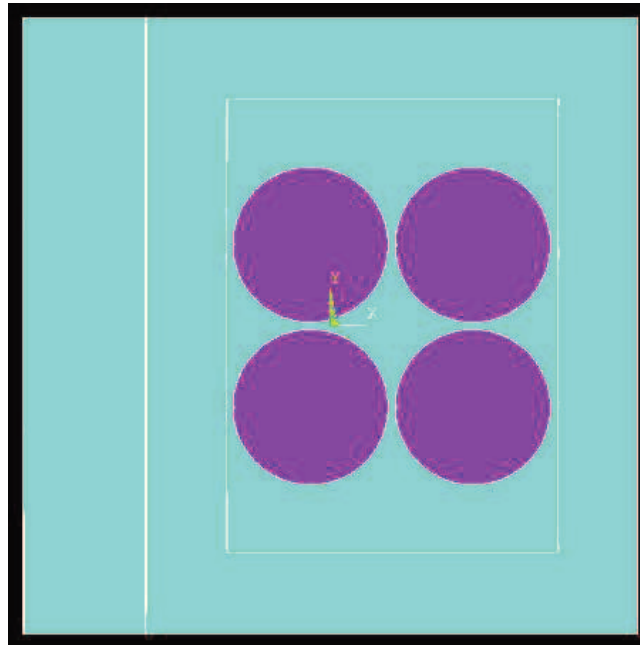


Figura 3.13 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 2

Na Figura 3.14 é evidente a grande diferença entre o stress em x e o stress em y em duas zonas distintas (locais a colocar os elementos sensitivos) em que temos o máximo do stress em x e o stress em y é praticamente nulo. Os elementos sensitivos a colocar serão os elementos 1 e 4.

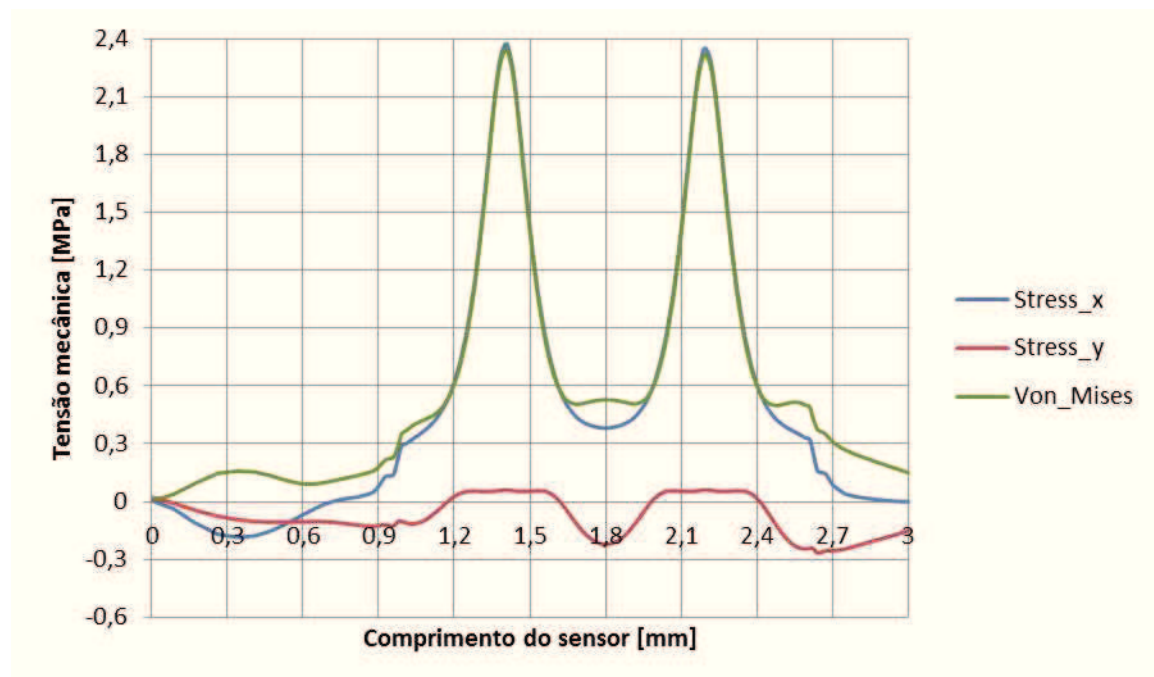


Figura 3.14 – Stress ao longo do x da melhor geometria desenvolvida para a configuração 2

Na Figura 3.15 o stress em x é praticamente nulo enquanto que o stress em y é negativo, ou seja, está a sofrer uma força contrária. Os elementos sensitivos a colocar serão os elementos 2 e 3.

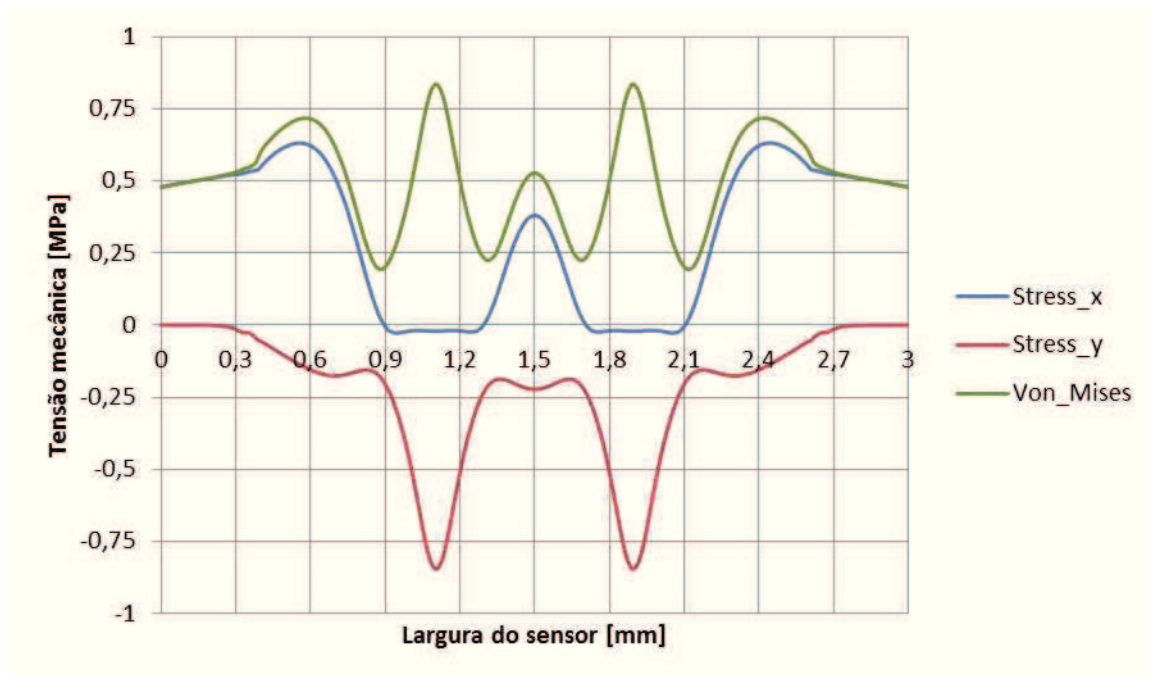


Figura 3.15 – Stress ao longo do y da melhor geometria desenvolvida para a configuração 2

Nesta configuração temos dois elementos sensitivos a sofrer a mesma solitação aplicada na estrutura e duas a sofrer a contrária. Este caso possibilita aumentar ainda mais a sensibilidade pois a diferença entre as resistências equivalentes será maior. Comparando com a configuração 1, temos uma desvantagem e duas melhorias significativas:

- ✓ Menor sensibilidade;
- ✓ Boa compatibilidade para trabalhar num plano (vantagem muito importante, dependendo do tipo de aplicação, ao invés de só num eixo);
- ✓ Maior gama de utilização. Como o stress está mais distribuído pela estrutura (concentrado em quatro pontos em vez de um), o stress em cada um é menor e portanto a estrutura aguenta uma maior gama de utilização.

### 3.1.3 Configuração 3

A configuração 3 do Apêndice II é composta, tal como a configuração anterior, por quatro elementos sensitivos, mas nesta configuração ao contrário de se tentar criar quatro zonas distintas de elevada sensibilidade, usa-se a mesma zona para colocar os quatro elementos sensitivos. O conceito desta geometria é o mesmo do desenvolvido na configuração 1, tentando ter uma zona central e muito sensível, e a restante estrutura ter a sensibilidade mínima. Nesta geometria não se conseguiram obter valores tão elevados como na configuração 1, pois as regras do Apêndice I têm de se verificar e portanto os trapézios e os círculos testados têm de estar mais afastados, no intuito de existir espaço para os quatro elementos sensitivos. Para esta configuração foram testadas treze configurações: uma com círculos e doze com trapézios com diferentes comprimentos da base menor: 20, 30, 40, 50, 52, 53, 54, 56, 58, 60, 70 e 80  $\mu\text{m}$ .

A sensibilidade é quantificada de maneira igual à configuração anterior, existindo apenas a alteração da posição do sensor 3 e 4 para que fique positivo e portanto é dada pela equação (23).

$$Sensibilidade_4 = \frac{R_{resultante(4)}}{R_{resultante(3)} + R_{resultante(4)}} - \frac{R_{resultante(2)}}{R_{resultante(1)} + R_{resultante(2)}} \quad (23)$$

Tal como na configuração anterior é importante que os sensores 1 e 2 tenham o valor de resistência o mais diferente possíveis assim como os 3 e 4. Esta configuração permite isto de uma forma muito subtil. Como dois elementos sensitivos estão na vertical e outros dois na horizontal, temos que o stress x de um é sensivelmente o stress y do outro. Na prática isto traduz-se como tendo quatro vezes a sensibilidade de um elemento sensitivo. Tal como no caso anterior o  $R_{resultante}$  é dado pela equação (24). A fórmula para calcular o  $R_{resultante}$  é a mesma para todos os elementos sensitivos.

$$R_{resultante(n)} = R_n \times [(1 + (5,9 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(x)_n} \times 10^6) + (-5,4 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(y)_n} \times 10^6))] \quad (24)$$

Nesta configuração foram testadas 13 geometrias (Tabela 3.3), estas geometrias têm muito em comum com as geometrias efetuadas para a configuração 1, pois o princípio é o mesmo (concentrar os esforços num único local).

Tabela 3.3 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 3 (parte 1)

Geometria	Sensibilidade <sub>4</sub> obtida [mV/V/MPa]
“Círculos”	1.9722
“Trapézios b = 20 µm”	2.4173
“Trapézios b = 30 µm”	3.0592
“Trapézios b = 40 µm”	3.4004
“Trapézios b = 50 µm”	<b>3.5194</b>
“Trapézios b = 60 µm”	3.5128
“Trapézios b = 70 µm”	3.4321
“Trapézios b = 80 µm”	3.3222

Dos testes efetuados, duas coisas sobressaem: a primeira é que esta configuração apresenta sensibilidades muito mais elevadas do que as configurações 1 e 2; a segunda é que, tal como acontece na configuração 1, existe um momento em que a diminuição do stress em y deixa de compensar a perda do stress em x, e logo, a sensibilidade começa a diminuir com o aumento do comprimento da base menor. Desta primeira iteração tem-se como melhor geometria a que recorre a trapézios com 50 µm de comprimento de base menor.

Foram testados mais comprimentos para encontrar o ponto de inversão (ponto a partir do qual, com o aumento de comprimento da base menor do trapézio, a sensibilidade que era crescente passava a decrescer). Da Figura 3.16, sabe-se que o intervalo estaria entre os 40 e 50 µm ou entre os 50 e 60 µm. Após alguns testes, concluiu-se que este intervalo era o segundo mencionado (50 e 60 µm), e foram feitos testes de 2 em 2 µm. Quando se detetaram dois valores mais próximos (para 52 e 54 µm) foi efetuado um teste entre eles para apurar o máximo para a precisão de 1 µm.

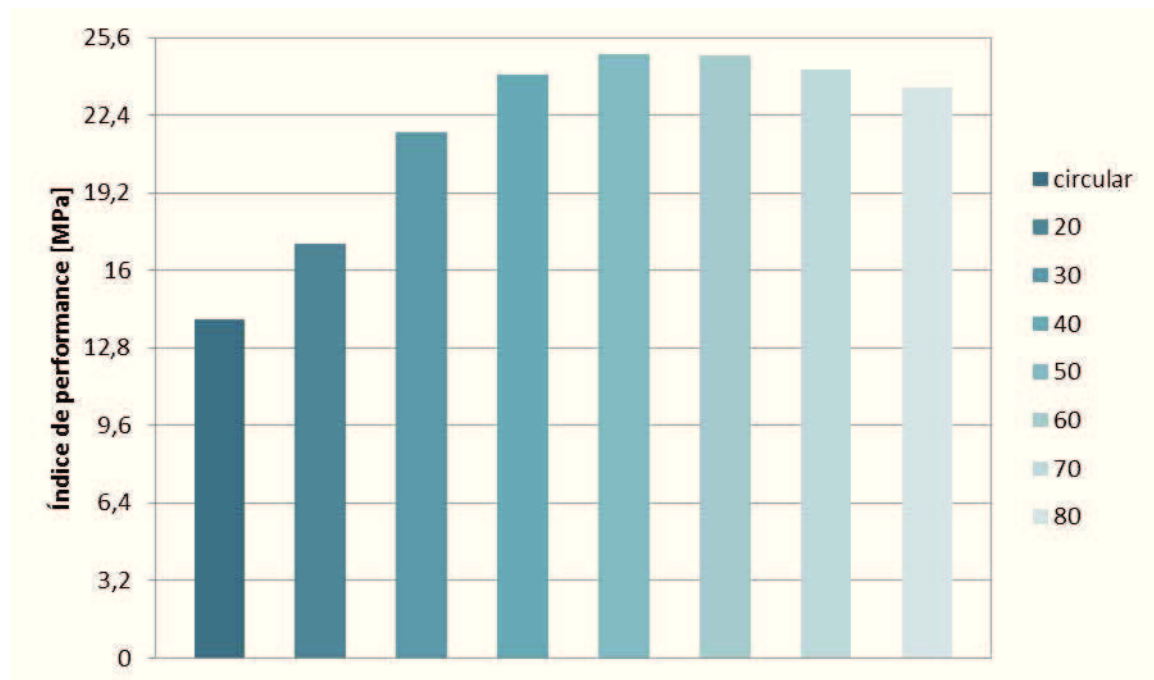


Figura 3.16 – Gráfico do índice de performance para a configuração 3 (parte 1)

Como se tinha obtido uma elevada sensibilidade para esta configuração, fizeram-se mais 5 geometrias (Tabela 3.4) com o intuito de ir ao encontro do melhor comprimento da base, agora com precisão de 1  $\mu\text{m}$  em vez dos 10  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3.4 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 3 (parte 2)

Geometria	Sensibilidade <sub>4</sub> obtida [mV/V/MPa]
“Trapézios b = 50 $\mu\text{m}$ ” (já efetuado)	3.5194
“Trapézios b = 52 $\mu\text{m}$ ”	3.5281
“Trapézios b = 53 $\mu\text{m}$ ”	<b>3.5347</b>
“Trapézios b = 54 $\mu\text{m}$ ”	3.5283
“Trapézios b = 56 $\mu\text{m}$ ”	3.5242
“Trapézios b = 58 $\mu\text{m}$ ”	3.5206
“Trapézios b = 60 $\mu\text{m}$ ” (já efetuado)	3.5128

Na Figura 3.17 está representado graficamente o índice de performance.

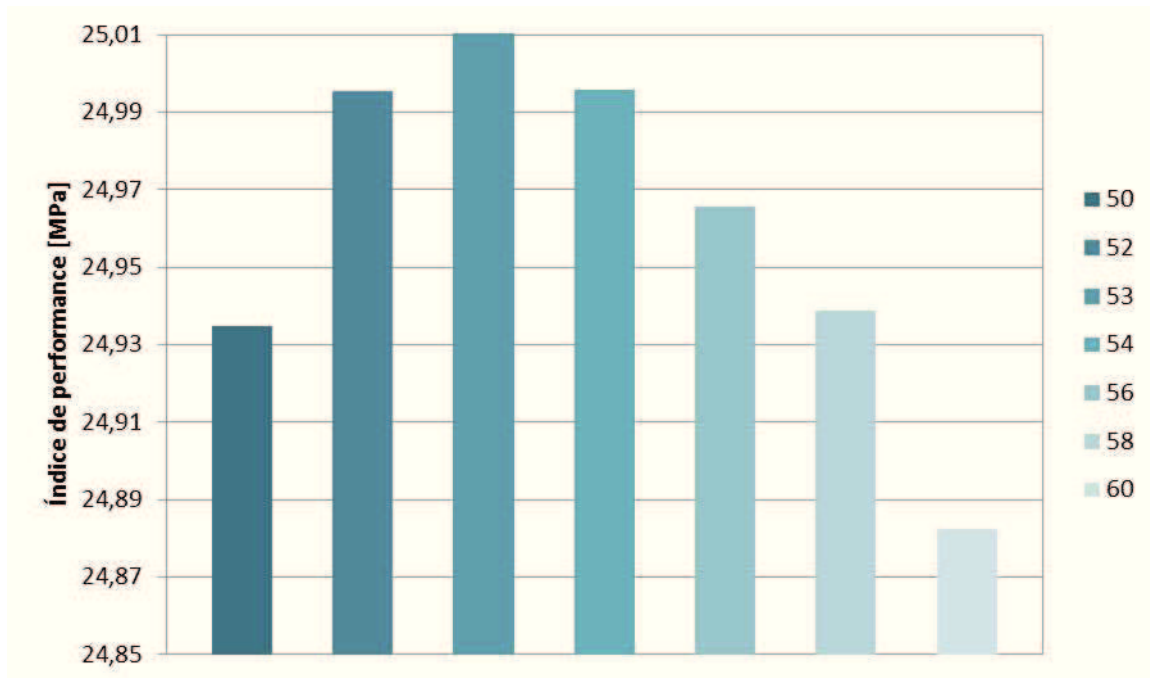


Figura 3.17 – Gráfico do índice de performance para a configuração 3 (parte 2)

A geometria com melhor sensibilidade para a configuração 3 é a que recorre a trapézios com a base menor de comprimento 53  $\mu\text{m}$ . A geometria pode ser visualizada na Figura 3.18.

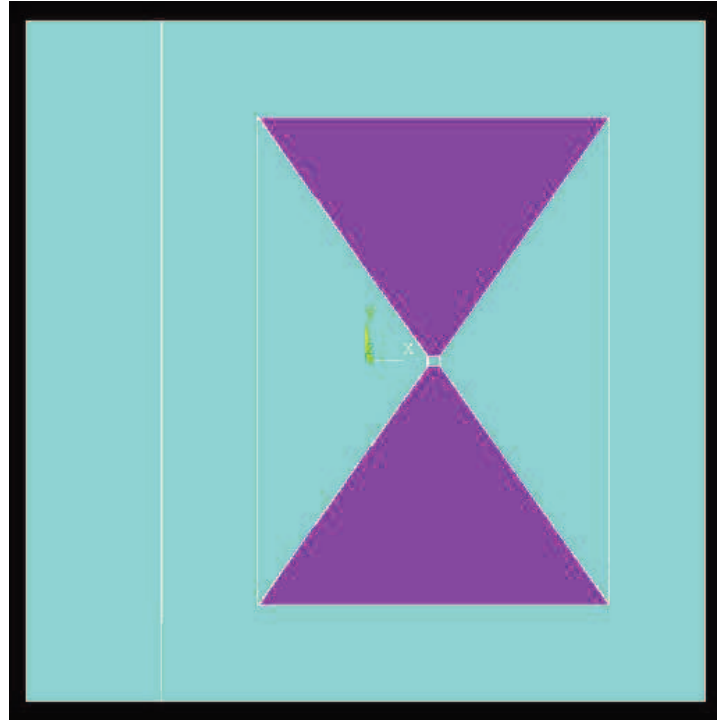


Figura 3.18 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 3

Esta geometria é muito semelhante à melhor geometria desenvolvida para a configuração 1. Como diferenças temos a distância entre trapézios que na configuração 1 era 24  $\mu\text{m}$  e nesta é restringida a um mínimo de 38  $\mu\text{m}$  e o comprimento da base menor do trapézio passa a ser ideal a 53  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 3.19, tal como no caso da configuração 1, existe uma grande diferença entre o stress em x e o stress em y na zona medida. Esta configuração, apesar de não atingir valores tão elevados como acontece na configuração 1, tem um fator multiplicativo de 4 por recorrer a quatro elementos sensitivos. Nesta configuração, não obstante o facto de não se aproveitar o local exato de melhor concentração de tensões, em virtude dos elementos sensitivos serem de reduzidas dimensões, consegue-se uma sensibilidade muito elevada.

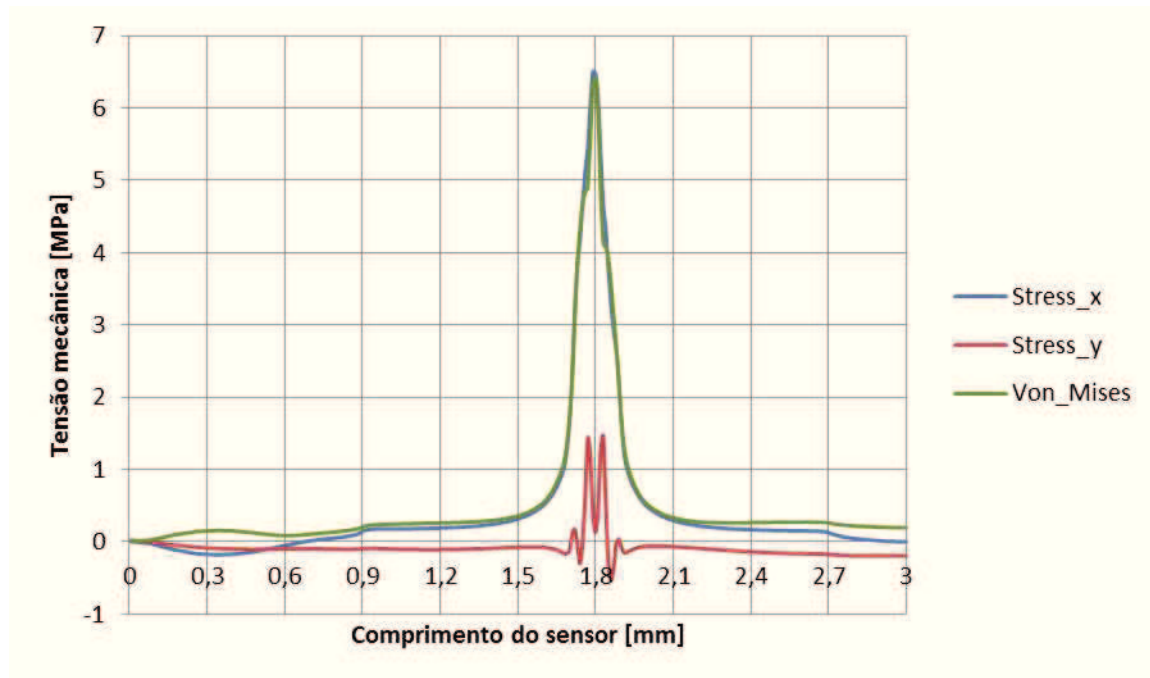


Figura 3.19 – Stress ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 3

Comparando com as configurações anteriores, temos três características significativas:

- ✓ Muito maior sensibilidade;
- ✓ Não otimizado para trabalhar num plano;
- ✓ Maior gama de utilização do que a configuração 1 e menor do que a configuração 2.

### 3.1.4 Configuração 4

A configuração 4 do Apêndice II é composta, tal como as configurações anteriores, por quatro elementos sensitivos. Nesta configuração, em vez de se tentarem criar quatro zonas distintas recorre-se a apenas uma zona de alta sensibilidade, como no caso anterior, mas desta vez o que interessa é que a concentração de tensões não esteja totalmente no centro mas na zona próxima, onde serão colocados os elementos sensitivos. O intuito desta configuração é tentar reduzir a distância entre os círculos ou trapézios usados e ao mesmo tempo ter quatro elementos sensitivos. Nesta geometria não se conseguiram obter valores

tão elevados como na configuração 1, pois as regras do Apêndice I têm de se verificar e portanto os trapézios, triângulos e os círculos testados têm de estar mais afastados. Nesta configuração são necessários 30  $\mu\text{m}$  de distância, na configuração 3 foram necessários 38  $\mu\text{m}$ , restando saber se o ganho obtido pela redução da distância em 8  $\mu\text{m}$  compensa a perda por existir uma distância entre os pares de elementos sensitivos. Para esta configuração foram testadas seis configurações: uma com círculos, uma com triângulos e quatro com trapézios com diferentes comprimentos da base menor: 10, 20, 30 e 40  $\mu\text{m}$ .

A sensibilidade é quantificada de maneira exatamente igual à configuração 3 e, portanto, é dada pela equação (25).

$$Sensibilidade_4 = \frac{R_{resultante(4)}}{R_{resultante(3)} + R_{resultante(4)}} - \frac{R_{resultante(2)}}{R_{resultante(1)} + R_{resultante(2)}} \quad (25)$$

Esta configuração assemelha-se muito à configuração 3. Tal como na configuração 3 temos dois elementos sensitivos na posição vertical e dois na horizontal, partilhando assim a mesma vantagem do que a configuração anterior. Tal como no caso anterior o  $R_{resultante}$  é dado pela equação (26). A fórmula para calcular o  $R_{resultante}$  é a mesma para todos os elementos sensitivos.

$$R_{resultante(n)} = R_n \times [(1 + (5,9 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(x)_n} \times 10^6) + (-5,4 \times 10^{-10} \times \sigma_{avg(y)_n} \times 10^6))] \quad (26)$$

Nesta configuração foram testadas 6 geometrias (Tabela 3.5). Estas geometrias têm muito em comum com as geometrias efetuadas para as configurações 1 e 3 pois o princípio é o mesmo (concentrar os esforços num único local).

Tabela 3.5 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 4

Geometria	Sensibilidade <sub>4</sub> obtida [mV/V/MPa]
“Círculos”	1.6907
“Triângulos”	2.7650
“Trapézios b = 10 $\mu\text{m}$ ”	<b>2.9631</b>
“Trapézios b = 20 $\mu\text{m}$ ”	2.8864
“Trapézios b = 30 $\mu\text{m}$ ”	2.7610
“Trapézios b = 40 $\mu\text{m}$ ”	2.6699

É notório a partir dos resultados obtidos que esta configuração não tem tanta sensibilidade como a configuração 3. Ainda assim, apresenta sensibilidades muito superiores às configurações 1 e 2.

Tal como acontece nas configurações 1 e 3, existe um momento em que a diminuição do stress em y deixa de compensar a perda do stress em x começando a sensibilidade a diminuir com o aumento do comprimento da base menor. Desta primeira iteração tem-se como melhor geometria a que recorre a trapézios com 10  $\mu\text{m}$  de comprimento de base menor. Este valor é muito menor do que os 53  $\mu\text{m}$  da configuração anterior. Isto deve-se ao facto de nesta configuração a distância entre pares de elementos sensitivos depender da geometria (asterisco 3 da configuração 4 do Apêndice II). Esta distância deve ser a mínima possível, mas está limitada pela necessidade de existência de 8  $\mu\text{m}$  entre os elementos sensitivos e os furos efetuados. Por esta mesma razão existe uma diferença tão díspar dos círculos para os trapézios. Os círculos necessitam de maior distância dado que o declive é menos acentuado, por esta mesma razão foram testados novamente os triângulos pois é uma geometria que, ao ter um declive muito acentuado, permite ter os pares de elementos sensitivos mais próximos.

Na Figura 3.20 está representado graficamente o índice de performance.

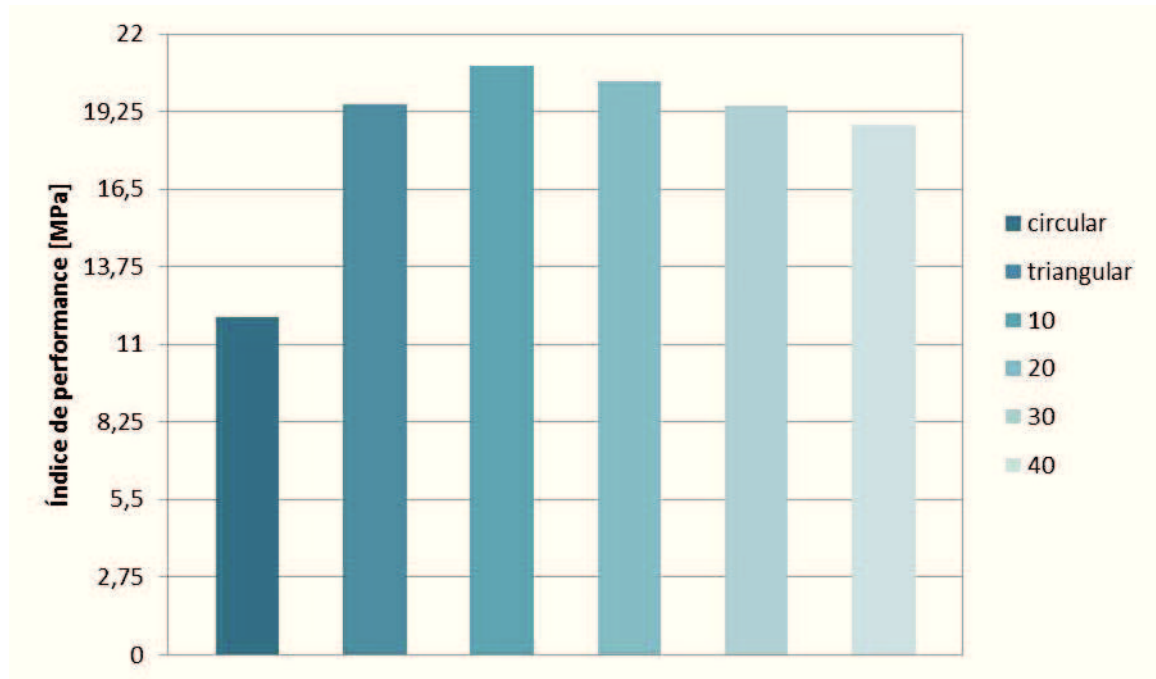


Figura 3.20 – Gráfico do índice de performance para a configuração 4

A geometria desenvolvida com melhor sensibilidade para a configuração 4 é a que recorre a trapézios com a base menor de comprimento 10  $\mu\text{m}$ . A geometria pode ser visualizada na Figura 3.21.

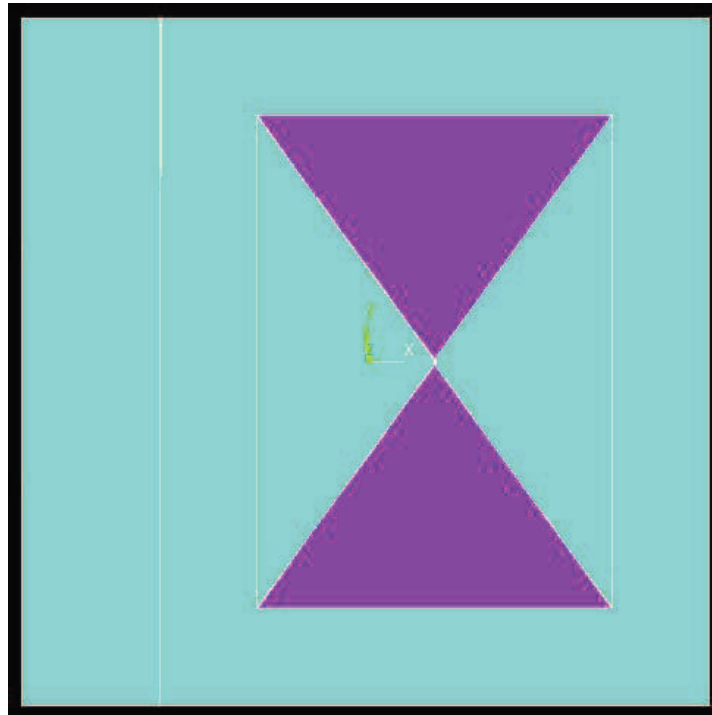


Figura 3.21 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 4

Esta geometria é muito semelhante à melhor geometria desenvolvida para as configurações 1 e 3. Como diferenças temos a distância entre trapézios, que na configuração 1 era de  $24\ \mu\text{m}$ , na configuração 3 era de  $38\ \mu\text{m}$  e, nesta configuração é de  $30\ \mu\text{m}$  e o comprimento da base menor do trapézio passa a ser ideal a  $10\ \mu\text{m}$ .

Na Figura 3.22, apesar da aparência da curva de stress ser bastante semelhante à das configurações 1 e 3, existe uma grande diferença, pois o stress em  $y$  é muito elevado imediatamente no centro. Este problema seria muito acentuado se a zona a colocar fosse imediatamente o centro, o que não se verifica. Os elementos sensitivos 1 e 4 ainda têm uma média de stress em  $y$  de aproximadamente  $1\ \text{MPa}$ , muito inferior aos  $3.8\ \text{MPa}$  atingidos na zona central. Os elementos sensitivos 2 e 3, por estarem ligeiramente mais afastados, têm uma média de stress em  $y$  de aproximadamente  $0.25\ \text{MPa}$ . Temos então uma geometria que, segundo este gráfico, aparenta estar muito longe de otimizada mas, no entanto, esta geometria não está otimizada para a zona central mas para a zona a colocar os elementos sensitivos e, para esta zona, o stress em  $y$  já está mais controlado.

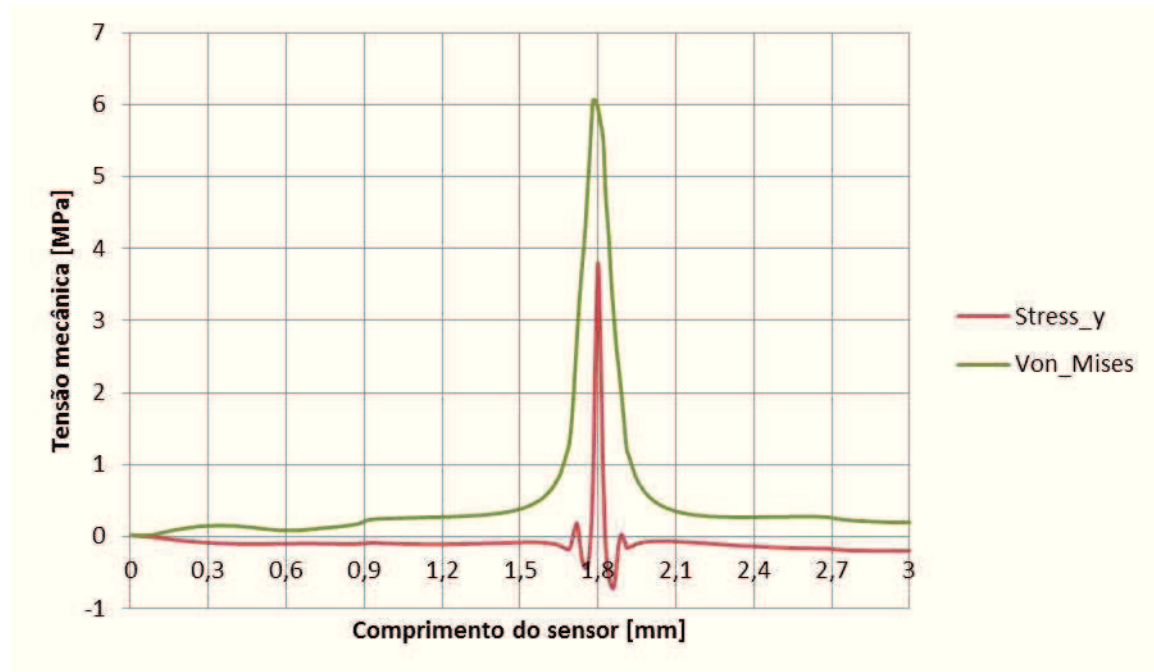


Figura 3.22 – Stress ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 4

Comparando com as configurações anteriores, temos três características significativas:

- ✓ Sensibilidade muito superior às configurações 1 e 2, mas menor do que a configuração 3;
- ✓ Não otimizado para trabalhar num plano;
- ✓ Maior gama de utilização do que a configuração 1 e menor do que as configurações 2 e 3.

### 3.1.5 Configuração 5

A configuração 5 é a última do Apêndice II, é composta, tal como as configurações anteriores, por quatro elementos sensitivos. Esta configuração é em tudo semelhante à configuração 4, com a diferença de não ter condutores na zona central, conseguindo-se aproximar mais os furos. No entanto, tem a desvantagem de ter os dois pares de elementos sensores mais afastados. Resta saber se este afastamento em  $x$  é compensado pela aproximação dos furos. Nesta configuração são necessários apenas  $15\ \mu\text{m}$  de distância, enquanto na configuração 3 foram necessários  $38\ \mu\text{m}$  e na configuração 4 foram

necessários 30  $\mu\text{m}$ . Para esta configuração foram testadas seis configurações: uma com círculos, uma com triângulos e quatro com trapézios com diferentes comprimentos da base menor: 10, 20, 30 e 40  $\mu\text{m}$ . A sensibilidade é quantificada de maneira exatamente igual à configuração anterior e, portanto, é dada pela equação (27).

$$\text{Sensibilidade}_4 = \frac{R_{\text{resultante}(4)}}{R_{\text{resultante}(3)} + R_{\text{resultante}(4)}} - \frac{R_{\text{resultante}(2)}}{R_{\text{resultante}(1)} + R_{\text{resultante}(2)}} \quad (27)$$

Esta configuração é igual à configuração 4 e portanto beneficia das mesmas vantagens. Tal como no caso anterior o  $R_{\text{resultante}}$  é dado pela equação (28). A fórmula para calcular o  $R_{\text{resultante}}$  é a mesma para todos os elementos sensitivos.

$$R_{\text{resultante}(n)} = R_n \times [(1 + (5,9 \times 10^{-10} \times \sigma_{\text{avg}(x)_n} \times 10^6) + (-5,4 \times 10^{-10} \times \sigma_{\text{avg}(y)_n} \times 10^6))] \quad (28)$$

Nesta configuração foram testadas 6 geometrias (Tabela 3.6). Estas geometrias têm muito em comum com as geometrias já efetuadas, sendo de realçar que estas geometrias são quase iguais às da configuração anterior com as diferenças de a distância entre furos ser de 15  $\mu\text{m}$  em vez dos 30  $\mu\text{m}$  e a localização dos elementos sensitivos ser diferente.

Tabela 3.6 – Sensibilidade para diferentes geometrias da configuração 5

Geometria	Sensibilidade <sub>4</sub> obtida [mV/V/MPa]
“Círculos”	1.0007
“Triângulos”	<b>3.2826</b>
“Trapézios b = 10 $\mu\text{m}$ ”	3.0570
“Trapézios b = 20 $\mu\text{m}$ ”	2.8677
“Trapézios b = 30 $\mu\text{m}$ ”	2.6198
“Trapézios b = 40 $\mu\text{m}$ ”	2.5007

Perante os resultados obtidos, esta configuração continua a não ter a sensibilidade obtida pela configuração 3 mas, ainda assim, tem a segunda melhor sensibilidade obtida.

Tal como acontece nas configurações 1, 3 e 4, existe um momento em que a diminuição do stress em y deixa de compensar a perda do stress em x e, portanto, a sensibilidade começa a diminuir com o aumento do comprimento da base menor. Desta iteração tem-se como melhor geometria a que recorre a triângulos. Nesta configuração, tal como na anterior, a distância entre os pares de elementos sensitivos depende da geometria mas, nesta configuração, esta distância é muito mais afetada pela geometria do que no caso antecedente, obtendo-se assim os melhores resultados no uso de triângulos, onde o declive é mais acentuado. Por esta mesmo motivo existe uma diferença tão díspar dos círculos para os trapézios. Os círculos necessitam de maior distância dado que o declive é menos acentuado. Note-se ainda que no caso dos círculos, apesar de os furos estarem muito mais próximos, os pares de elementos sensitivos estão tão afastados que originam que a sensibilidade destes decresça tão significativamente.

Na Figura 3.23 está representado graficamente o índice de performance.

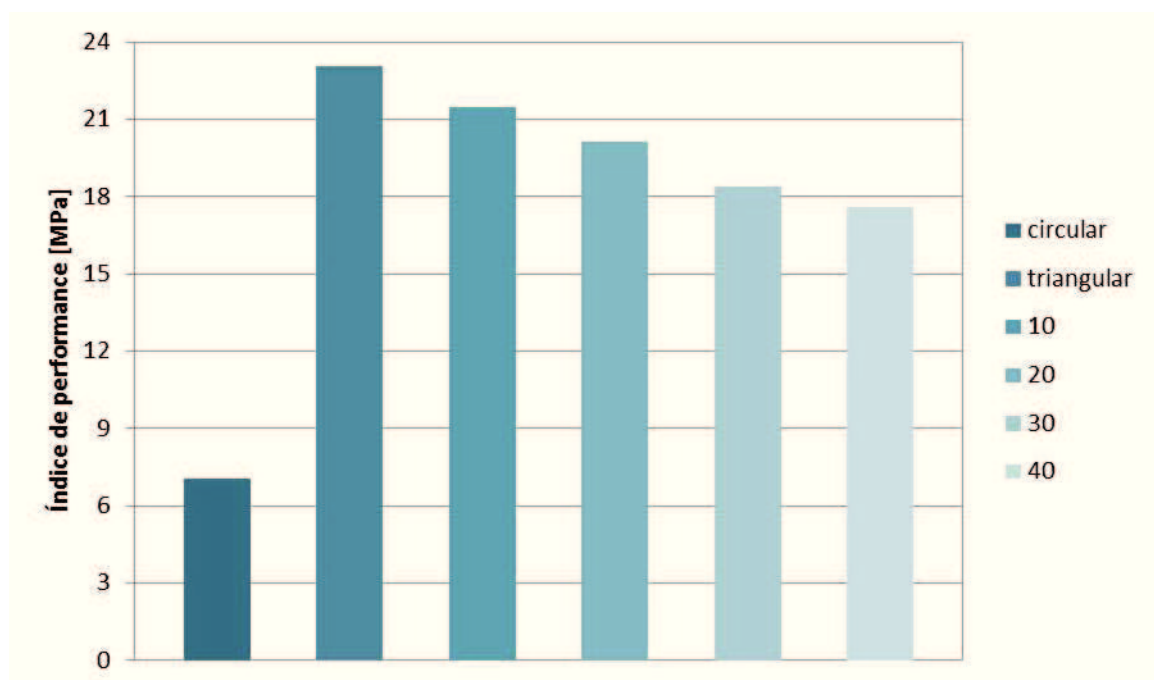


Figura 3.23 – Gráfico do índice de performance para a configuração 5

A geometria desenvolvida com melhor sensibilidade para a configuração 5 é a que recorre a triângulos. A geometria pode ser visualizada na Figura 3.24.

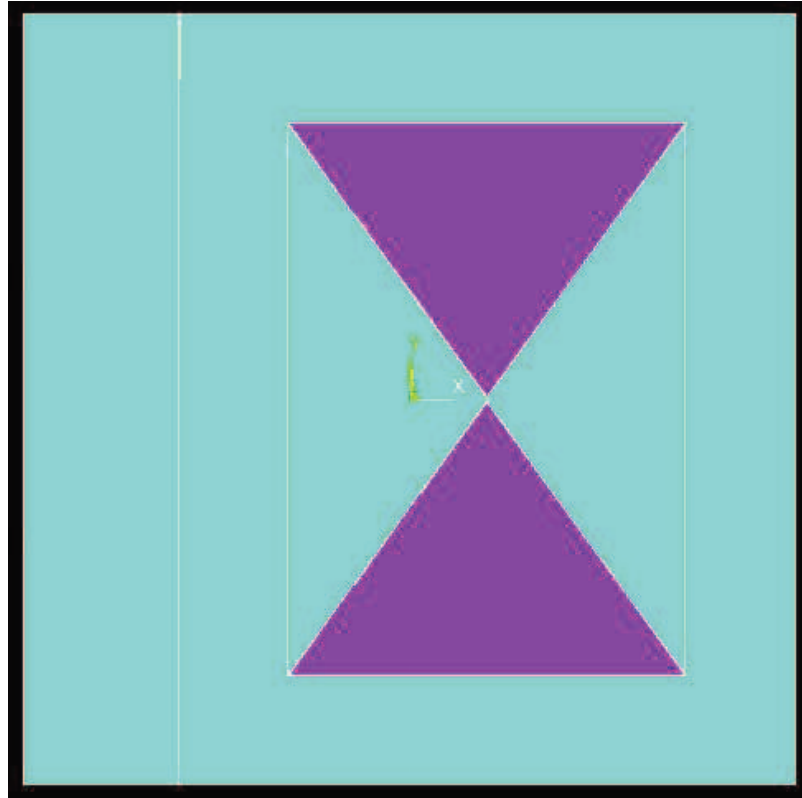


Figura 3.24 – Melhor geometria desenvolvida para a configuração 5

Esta geometria é muito semelhante à melhor geometria desenvolvida para as configurações 1, 3 e 4. Como diferenças temos a distância entre triângulos que na configuração 1 era de  $24\ \mu\text{m}$ , na configuração 3 era de  $38\ \mu\text{m}$ , na configuração 4 era de  $30\ \mu\text{m}$  e, nesta configuração é de  $15\ \mu\text{m}$ .

Na Figura 3.25, a aparência da curva de stress é parecida com a da configuração 4, observando-se como diferença mais significativa, que o stress em x tem agora um pico muito mais elevado. Continuamos a ter o stress em y elevado no centro. Os elementos sensitivos 1 e 4 têm uma média de stress em y de aproximadamente  $0.02\ \text{MPa}$ , muito inferior aos  $6.8\ \text{MPa}$  atingidos na zona central. Os elementos sensitivos 2 e 3, por estarem ligeiramente mais afastados, têm uma média de stress em y de aproximadamente -

0.10 MPa, ajudando no aumento da sensibilidade. Temos então uma geometria que, segundo este gráfico aparenta estar muito bem otimizada mas, como não conseguimos aceder ao centro, não tiramos proveito de termos uma zona tão sensível.

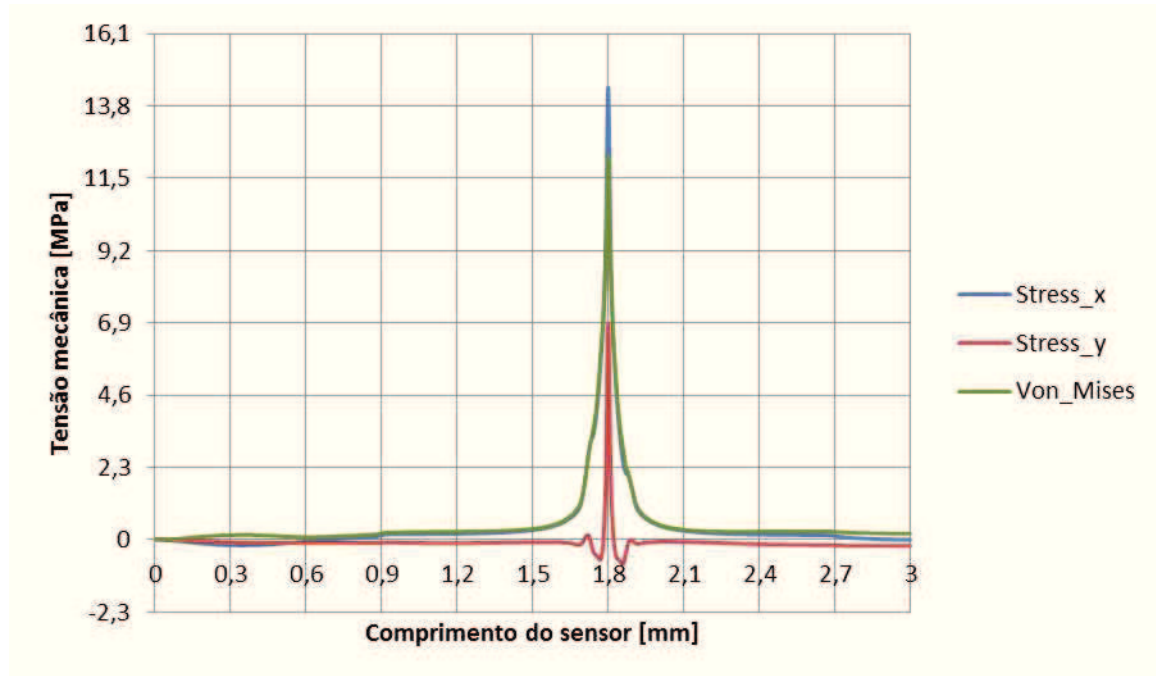


Figura 3.25 – Stress ao longo da melhor geometria desenvolvida para a configuração 5

Comparando com as configurações anteriores, temos três características significativas:

- ✓ Sensibilidade muito superior às configurações 1 e 2, maior do que a 4 e menor do que a configuração 3;
- ✓ Não otimizado para trabalhar num plano;
- ✓ Menor gama de utilização das configurações testadas.

### 3.1.6 Análise dos elementos finitos a usar

Para garantir uma consistência de resultados e para estes serem credíveis é necessário um número de elementos finitos suficiente para garantir que a estrutura tem o comportamento no software que teria numa análise experimental.

Começou-se por testar com apenas um volume. Toda a estrutura constituía apenas um volume e testaram-se vários tamanhos de elementos: 80  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ . Apesar de o stress equivalente ao longo da estrutura parecer começar a variar menos, era perfeitamente notório que ainda se estava longe da convergência. Os testes para 40  $\mu\text{m}$  já foram muito demorados e o computador não permitia continuar a decrescer o tamanho dos elementos finitos.

Percebeu-se que a solução passava por dividir a estrutura em várias partes para poder escolher individualmente o tamanho do elemento finito para cada parte da estrutura.

A primeira iteração foi criar uma zona retangular em torno do centro (no caso dos trapézios: retângulo que liga as duas bases menores dos triângulos) e usar os tamanhos dos elementos finitos iguais em ambos. Por exemplo, os dois com tamanhos de 50  $\mu\text{m}$ , para comparar com os testes efetuados anteriormente. Ficou comprovado que os resultados eram iguais quando usados dois volumes e colados com o comando “VGLUE”, e recorrendo apenas a um volume. Esta conclusão foi muito importante para os passos seguintes.

O passo seguinte passou por ser a alteração do tamanho dos elementos finitos para o volume mais pequeno e para o maior individualmente. Foram testadas várias configurações: 25/250; 20/200; 15/150; 10/100; 5/50; 4/40; 3/40; 2/40. Estas configurações são os tamanhos dos elementos finitos respetivamente, do volume mais pequeno e do volume maior. Com esta nova forma de analisar a estrutura já se passou a notar uma convergência; testou-se ainda recorrer a uma mesh (criação da malha) automática, o mais refinada possível, e depois ainda refinada automaticamente. Os resultados foram satisfatórios, pois a convergência tinha sido encontrada. Existiam contudo alguns problemas, cada teste demorava mais de 8 horas a ser feito e não era nada prático, dado o número de testes que havia a executar. Surgiu ainda um problema maior quando foi

adicionada à estrutura a sua base. Os testes deviam ser feitos com a base no software para simular a situação o mais idêntica possível à que se irá encontrar.

A solução encontrada para resolver o problema do elevado número de elementos finitos, e da consequente memória RAM necessária, passou por dividir a estrutura em 5 partes.

Na Figura 3.26 é possível visualizar a divisão efetuada. Na zona central, a azul escuro, temos o volume 1, volume onde estarão concentradas as maiores forças. O denominado volume 2, na verdade são dois volumes, o rosa e o verde. O volume 3 está representado, na figura, a azul. O volume 4, a vermelho e, por fim, o volume 5 a lilás que representa o volume da base. Apesar desta base não fazer parte da estrutura, revela-se importante criar um cenário o mais idêntico possível à realidade, razão pela qual este volume está presente.

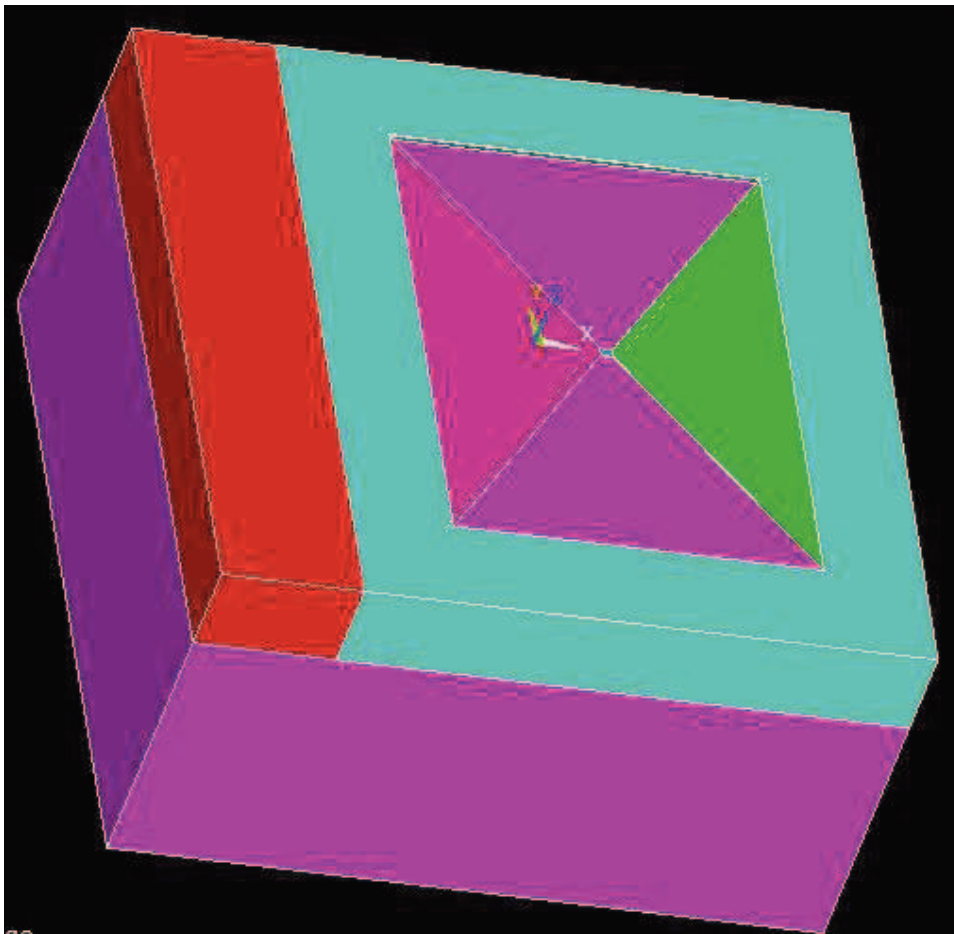


Figura 3.26 – Geometria dividida em diferentes volumes para se obter a convergência

Principiou-se por colocar os elementos finitos de tamanho 25/100/100/100/500 respetivamente para volume 1, volume 2, volume 3, volume 4 e volume 5. Estes valores foram apenas arbitrados aleatoriamente com a única condição de ter poucos elementos finitos, o que se verificava. A partir destas dimensões começou-se a refinar cada um dos volumes até se detetar o valor a partir do qual um aumento do número de elementos finitos não fazia diferença nos resultados obtidos, originando apenas mais tempo de cálculo.

Para o primeiro volume foram testadas as dimensões de 25, 20, 10 e 5  $\mu\text{m}$ . Foi verificado que os valores para 5  $\mu\text{m}$  traziam ainda algumas diferenças relativamente ao de 10  $\mu\text{m}$ , no entanto, os 5  $\mu\text{m}$  são fixos, requerendo um refinamento. Passou-se a analisar o segundo volume.

Na Figura 3.27 são visíveis as grandes diferenças provocadas pela alteração no número de elementos no volume 1 pois, apesar de existir a tendência para uma convergência, ainda existem algumas diferenças entre os últimos dois testes, carecendo de um refinamento no final.

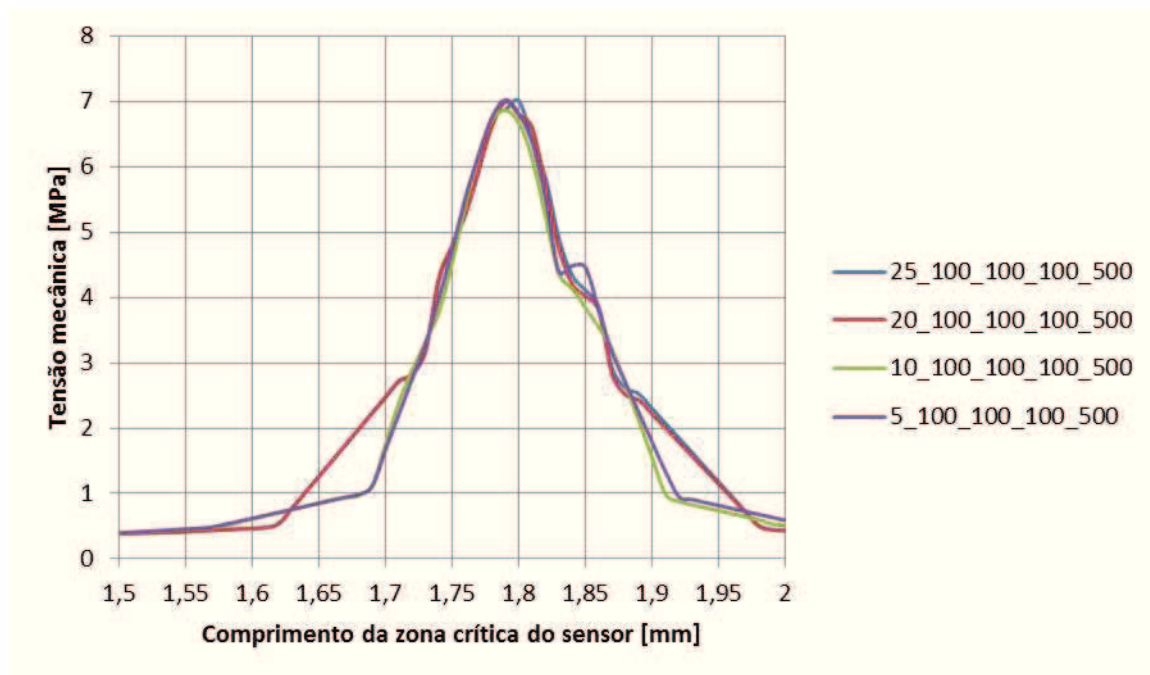


Figura 3.27 – Linhas de stress alterando o número de elementos do volume 1

Para o segundo volume foram testadas as dimensões de 100, 70, 30, 20 e 15  $\mu\text{m}$ . Foi verificado que os valores para 20 e 15  $\mu\text{m}$  já não traziam diferenças significativas e, portanto, o valor foi fixado e passou a analisar-se o terceiro volume.

Na Figura 3.28 os últimos dois testes estão praticamente sobrepostos o que significa que o volume 2 está bem definido para 15  $\mu\text{m}$ .

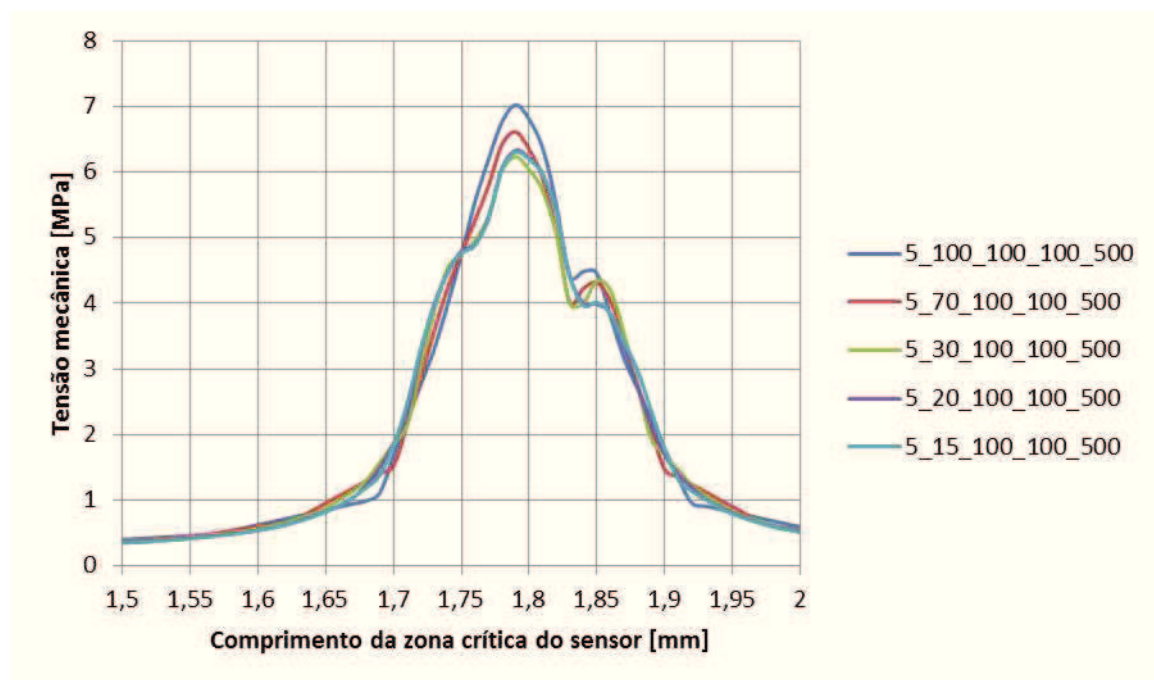


Figura 3.28 – Linhas de stress alterando o número de elementos do volume 2

Para o terceiro volume foram testadas as dimensões de 100, 80 e 70  $\mu\text{m}$ . Foi verificado que os valores de 80 e 70  $\mu\text{m}$  já não traziam diferenças significativas e, portanto, o valor foi fixado e passou-se à análise do quarto volume.

Na Figura 3.29 é notória a sobreposição das curvas para elementos de 80 e 70  $\mu\text{m}$ , estando portanto perto da convergência.

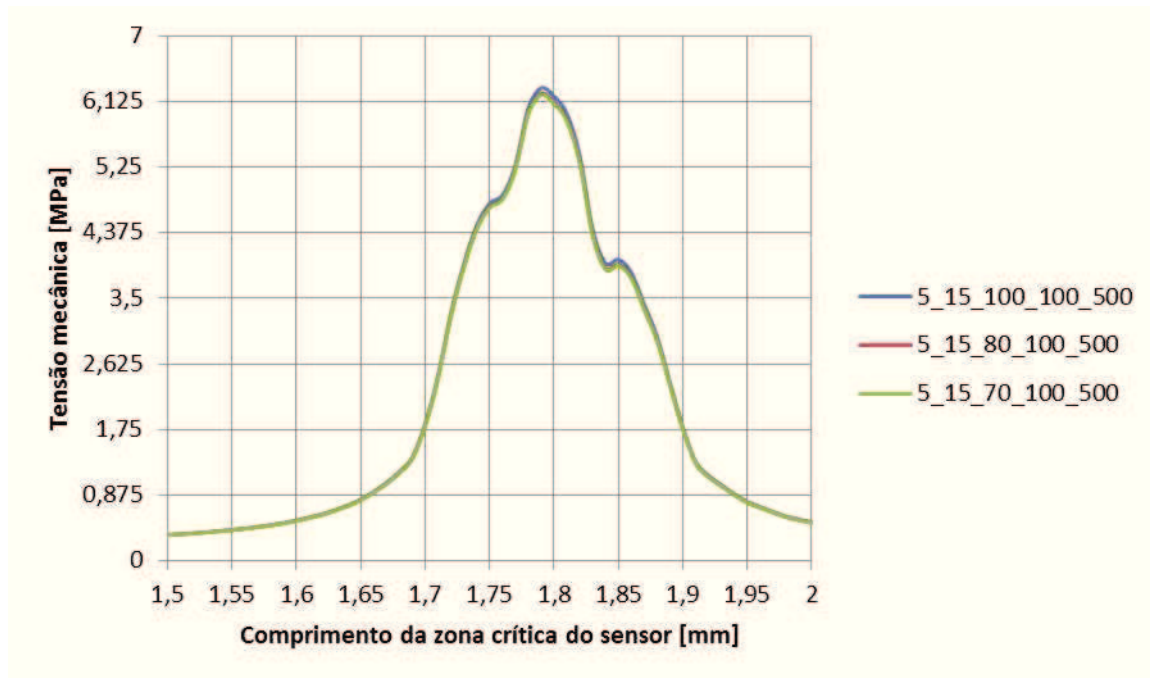


Figura 3.29 – Linhas de stress alterando o número de elementos do volume 3

Para o quarto volume foram apenas testadas as dimensões de 100 e 80  $\mu\text{m}$ , pois este segundo deu um valor tão próximo do de 100  $\mu\text{m}$  que não faria qualquer sentido refinar mais.

Na Figura 3.30 estão presentes duas curvas tão sobrepostas que foi necessário verificar se tinham sido selecionados corretamente os dados, este volume não ficou a criar quaisquer problemas para a simulação.

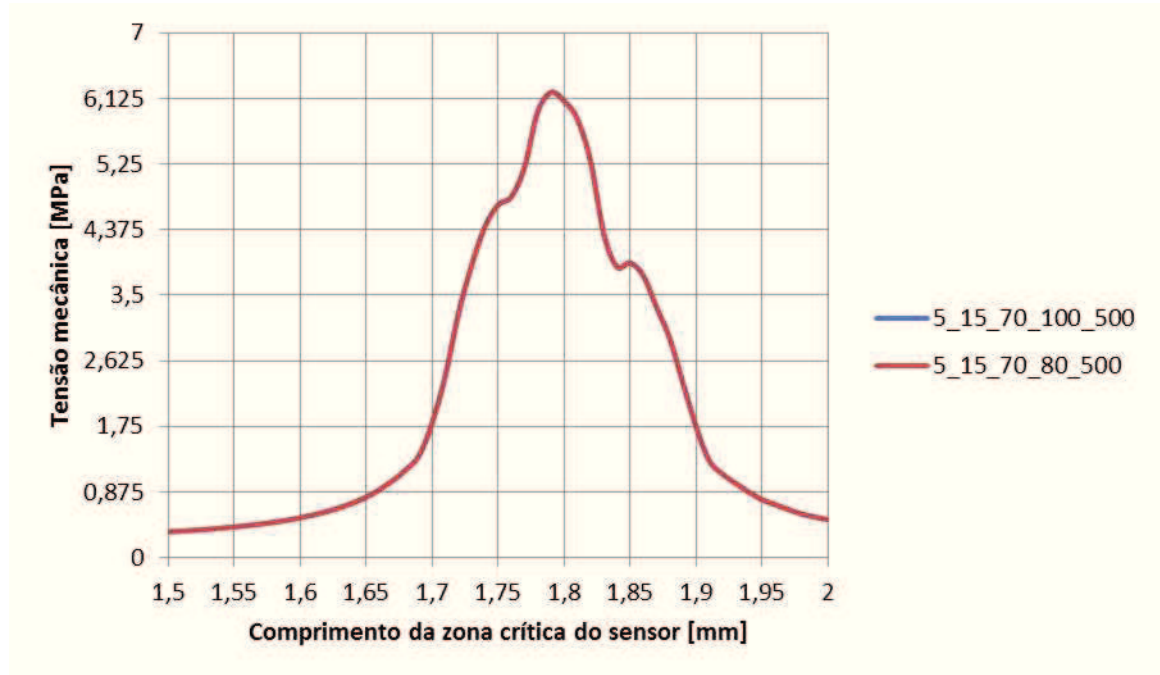


Figura 3.30 – Linhas de *stress* alterando o número de elementos do volume 4

Passou-se então para a análise do quinto e último volume, testando-se apenas 500 e 300  $\mu\text{m}$ . Os valores foram muito idênticos e esta alteração fez com que o número de elementos finitos aumentasse de uma forma desnecessária, pelo que se continuou com o valor de 500  $\mu\text{m}$  para este quinto volume.

Na Figura 3.31 a diferença dos dados é insignificante para a quantidade de elementos finitos a acrescentar por esta alteração e, portanto, a alteração é revertida sendo mantidos os 500  $\mu\text{m}$ .

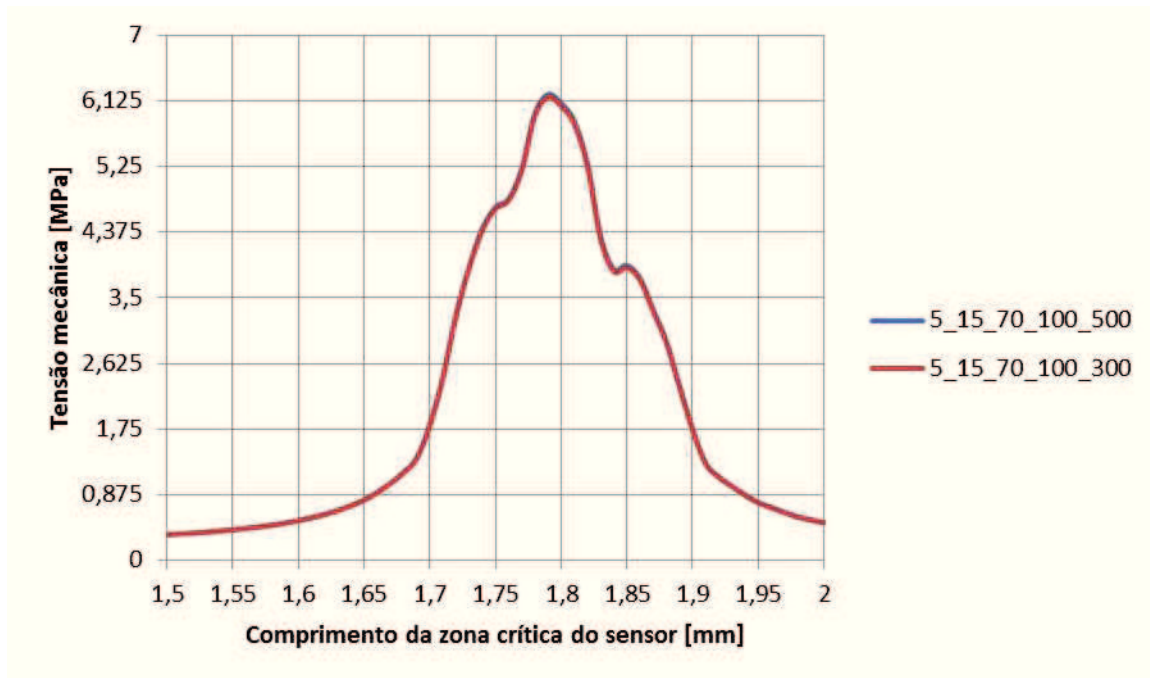


Figura 3.31 – Linhas de stress alterando o número de elementos do volume 5

No final dos testes, para se afastar quaisquer dúvidas foi pensado refinar cada um dos volumes para apurar se a variação era notória. Foi apenas refinado o primeiro volume para 2  $\mu\text{m}$  (anteriores 5  $\mu\text{m}$ ), pois esta alteração, além de já não fazer variar quase nada também não adicionava muitos elementos, sendo portanto mantida.

Na Figura 3.32 está representado o refinamento alterado e a diferença do mesmo face à anterior configuração.

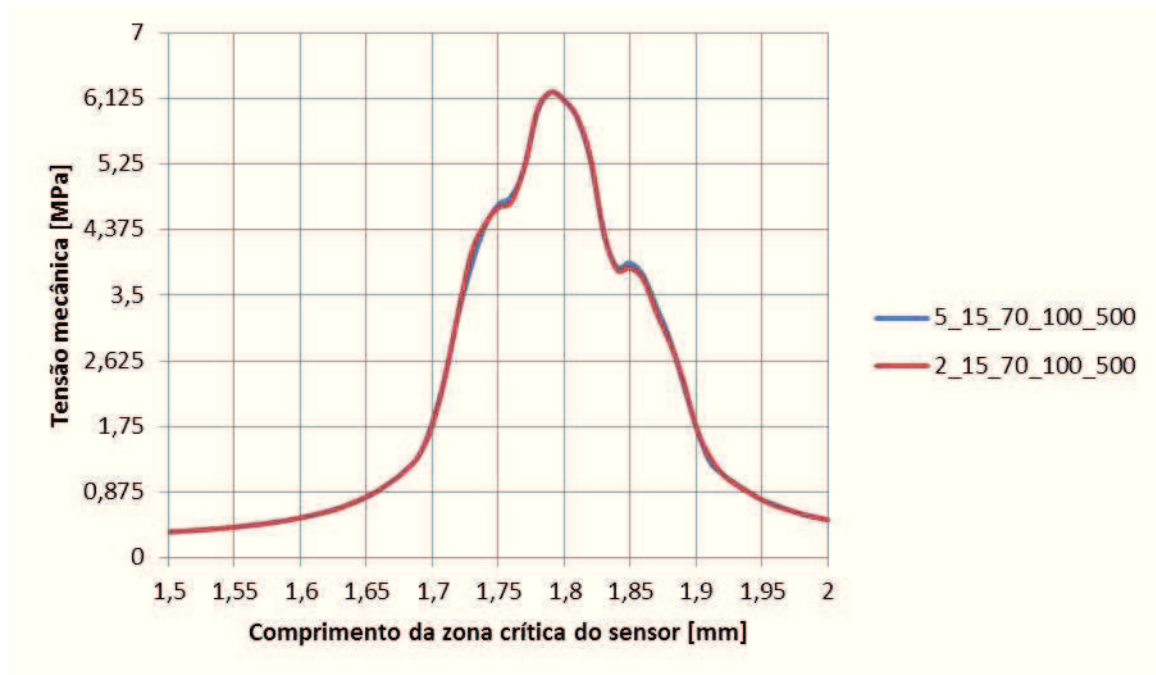


Figura 3.32 – Linhas de stress alterando o número de elementos do volume 1 (refinar)

A configuração atual é 2/15/70/100/500. Desta configuração foram testadas mais melhorias mas, em virtude de nenhuma trazer diferenças significativas, optou-se por manter esta configuração.

A qualidade da malha de elementos finitos foi analisada por dois métodos:

- ✓ Comparando uma linha de stress e verificar a convergência (já efetuado);
- ✓ Análise modal.

A análise modal consiste numa análise do comportamento dinâmico de uma estrutura. Esta análise visa dar-nos os modos de vibração de uma estrutura (frequências). Estas frequências não dependem da solicitação fornecida à estrutura, dependendo apenas da geometria. Tal análise é apropriada para o estudo do número de elementos finitos a usar pois, com o aumento do número de elementos finitos, as frequências obtidas tendem para um valor, dependendo de quão bem está a estrutura definida pelos elementos finitos.

Na análise modal foram analisados os dois primeiros modos de vibração, tendo-se obtido os gráficos das Figura 3.33 e Figura 3.34.

Da Figura 3.33 é perfeitamente notória a tendência de convergência com o aumento do número de elementos finitos usados, tendo a primeira frequência ficado em 84,6822 kHz.

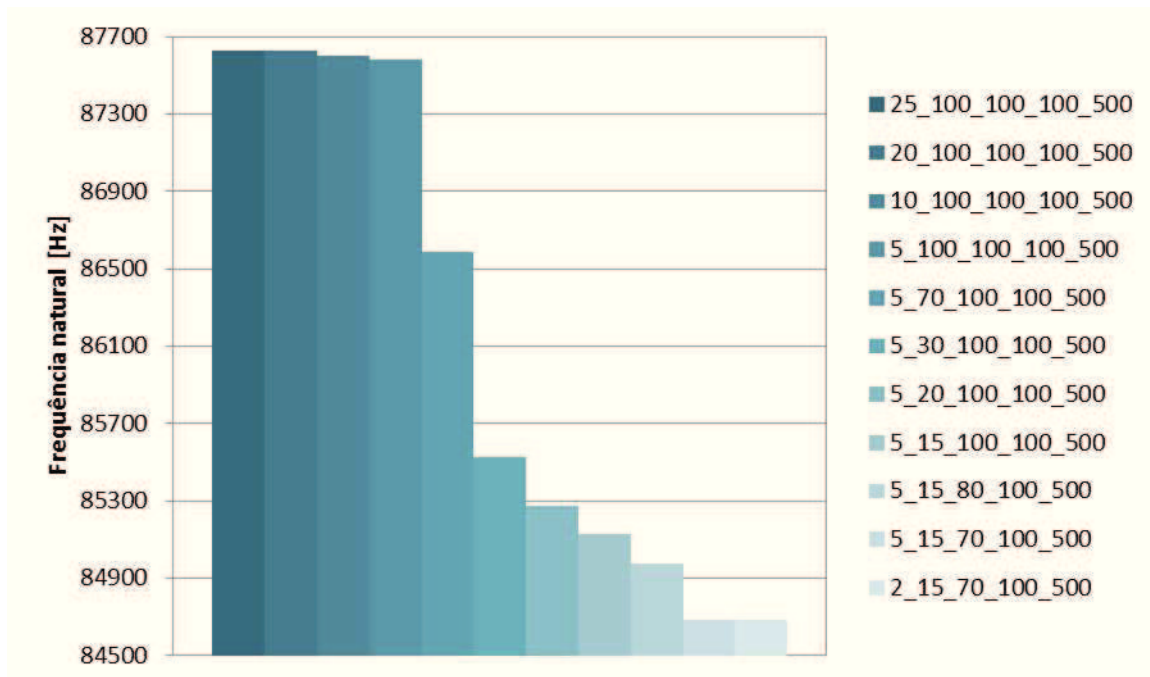


Figura 3.33 – Frequência 1 da análise modal para diferentes números de elementos finitos

Da Figura 3.34 não temos grande alteração na frequência. Ainda assim é notória uma convergência. Nos testes 10\_100\_100\_100\_500, 5\_100\_100\_100\_500 e 5\_70\_100\_100\_500 existe uma divergência porque para este número de elementos finitos o segundo modo de vibração altera ligeiramente dando origem a frequências divergentes. Aumentando mais ainda os elementos finitos é retomada a vibração inicialmente simulada e, portanto, esta divergência é ultrapassada. A frequência do segundo modo de vibração fica então em 89,9289 kHz.

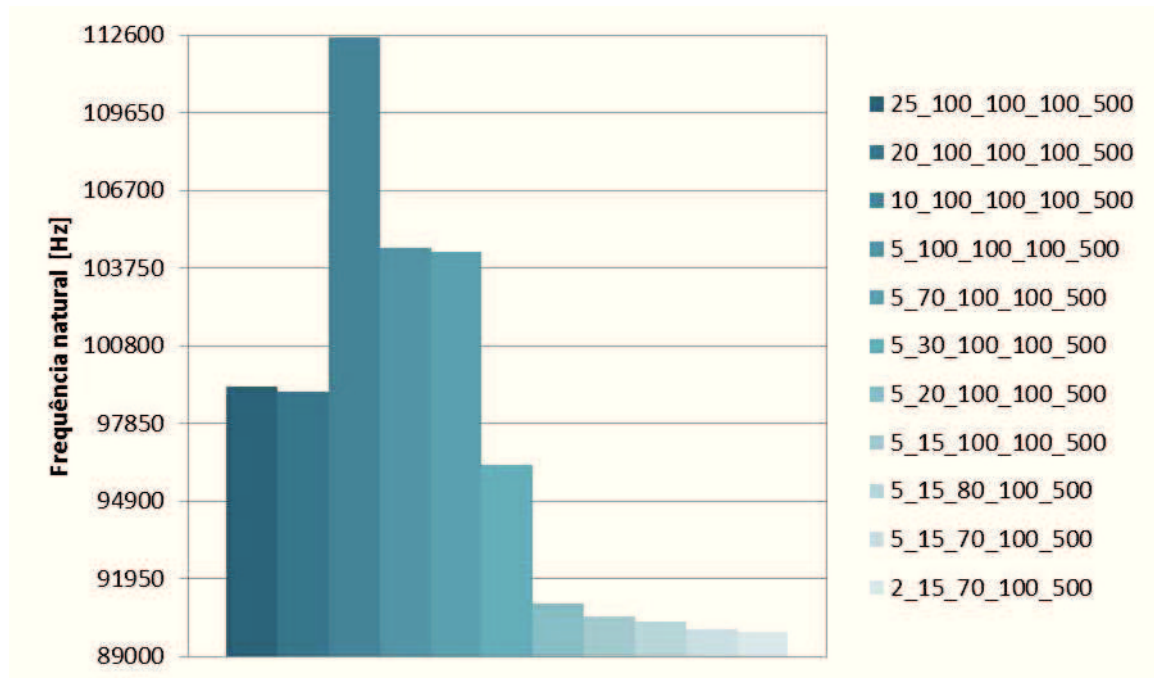


Figura 3.34 – Frequência 2 da análise modal para diferentes números de elementos finitos

É importante conhecer os valores das frequências naturais para averiguar se o meio em que a estrutura está inserida atinge ou não frequências desta ordem. Para este caso, como as frequências são elevadas, esse problema não se coloca.

O estudo da convergência fez com que existam garantias quanto aos resultados obtidos por este método numérico.

Todas as geometrias foram testadas com a configuração final obtida: 2/15/70/100/500. Foi verificada a convergência para a geometria considerada mais complexa e, não havendo alteração de forças, constrangimentos e material, foi usada a mesma densidade de malha para as outras geometrias.

Como conclusão final desta secção:

A geometria escolhida para o sensor de força, como parâmetro principal de elevada sensibilidade, é a geometria da configuração 3 com trapézios de base menor com 53  $\mu\text{m}$ . Para esta geometria o número de elementos finitos é de 122.349 elementos. Esta geometria consegue uma sensibilidade de 3.5347 mV/V/MPa. No Apêndice III encontra-se o código executado para obter esta geometria assim como a execução do teste e respetivo tratamento dos dados.

### 3.3 Desenvolvimento do amplificador mecânico

Um amplificador consiste num dispositivo que obtém um sinal de saída em função do seu sinal de entrada. A relação entre o sinal de entrada e de saída denomina-se de função de transferência. Nesta secção é desenvolvido um amplificador mecânico, este amplia uma extensão noutra extensão com uma função de transferência constante e dependente da geometria do amplificador.

Para desenvolver uma nova geometria recorreu-se novamente ao software “Ansys Multiphysics 14”. Para que o estudo não fosse feito novamente a partir do zero, recorreu-se à geometria da configuração 3 com trapézios, desenvolvida anteriormente, e fizeram-se algumas alterações:

- ✓ Reformulou-se a geometria, retirando algumas limitações que neste caso já não existiam devido às regras da micro maquinagem já não se aplicarem;
- ✓ Existe a limitação de que a zona central deve ter apenas um extensómetro com dimensões de 3 mm x 3 mm e, portanto, deve ter esta área para este ser colado. Devido a limitações de construção, a zona central deve ainda ter 0.5 mm de espessura.

A primeira alteração melhora significativamente a sensibilidade, pois permite mais geometrias; a segunda alteração piora em muito a sensibilidade, pois alterar uma dimensão

de  $53\ \mu\text{m}$  para  $3\ \text{mm}$  ( $3.000\ \mu\text{m}$ ) é muito acentuada, assim como a distância entre trapézios, passando de cerca dos  $20\ \mu\text{m}$  para  $3\ \text{mm}$ . O aumento de espessura é também muito desfavorável mas é uma limitação de construção e, como tal, a ser seguida.

Tiveram de ser efetuadas algumas alterações pois na conceção e nos testes práticos foram notados alguns aspetos a serem melhorados.

Os testes efetuados anteriormente para o sensor de força eram para um paralelepípedo de  $3 \times 3 \times 0.4\ \text{mm}$ . Uma vez que os provetes têm de largura  $60\ \text{mm}$ , pensou-se que seria uma boa aposta efetuar uma multiplicação de 20 nas dimensões ficando:  $60 \times 60 \times 8\ \text{mm}$ . No entanto, a espessura que era de  $3.1\ \mu\text{m}$  na zona central do sensor de força não se mantinha proporcional. Para conseguir arranjar alguma semelhança, realizou-se uma multiplicação de 75 vezes em vez das 20 vezes previstas, na direção z (profundidade), ficando um paralelepípedo de  $60 \times 60 \times 30\ \text{mm}$ , como é visível na Figura 3.35. Esta alteração teve de ser revertida pois no processo de fabrico mostrou-se uma desvantagem que será descrita posteriormente com mais detalhe.

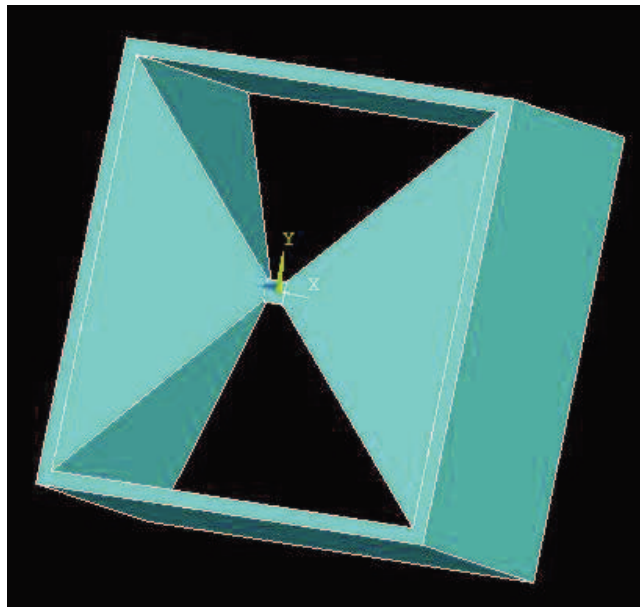


Figura 3.35 – Geometria  $60 \times 60 \times 30\ \text{mm}$  como amplificador

Outra alteração que teve de ser efetuada foi a adição de umas abas laterais, que para além de ajudarem a fixar o amplificador, que era o principal problema, aumentam o fator de ampliação do amplificador.

Na Figura 3.36 é visível o amplificador com a geometria 60 x 60 x 8 mm já com as abas. Foram ainda concebidas mais duas geometrias para testes, uma muito semelhante a esta, mas com dimensões de 40 x 40 x 8 mm e outra mais semelhante à geometria do sensor (não simétrica devido ao espaço limitado pelo processo da micro maquinagem).

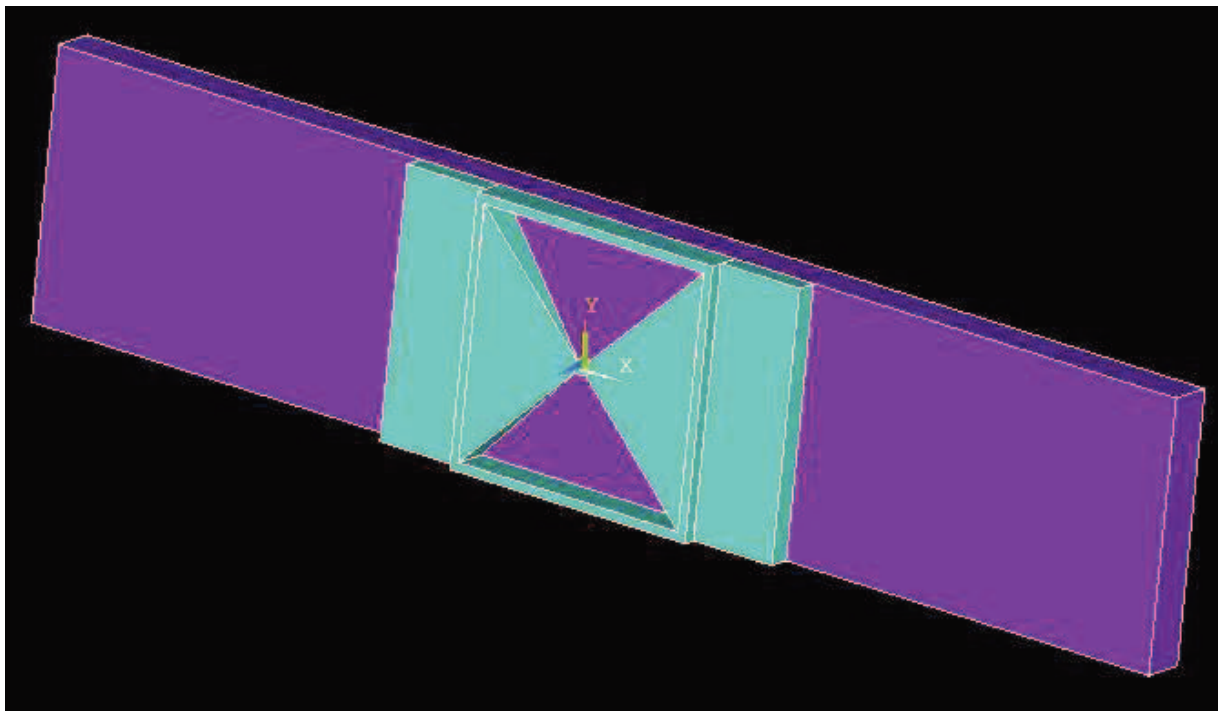


Figura 3.36 – Geometria 60 x 60 x 8 como amplificador

Na Figura 3.37 são testadas outras dimensões, agora 40 x 40 mm. É importante notar que não se está a testar o fator escala por as restrições da zona central se manterem (como 3 x 3 x 0.5 mm), assim como a espessura do amplificador que é mantida nos 8 mm.

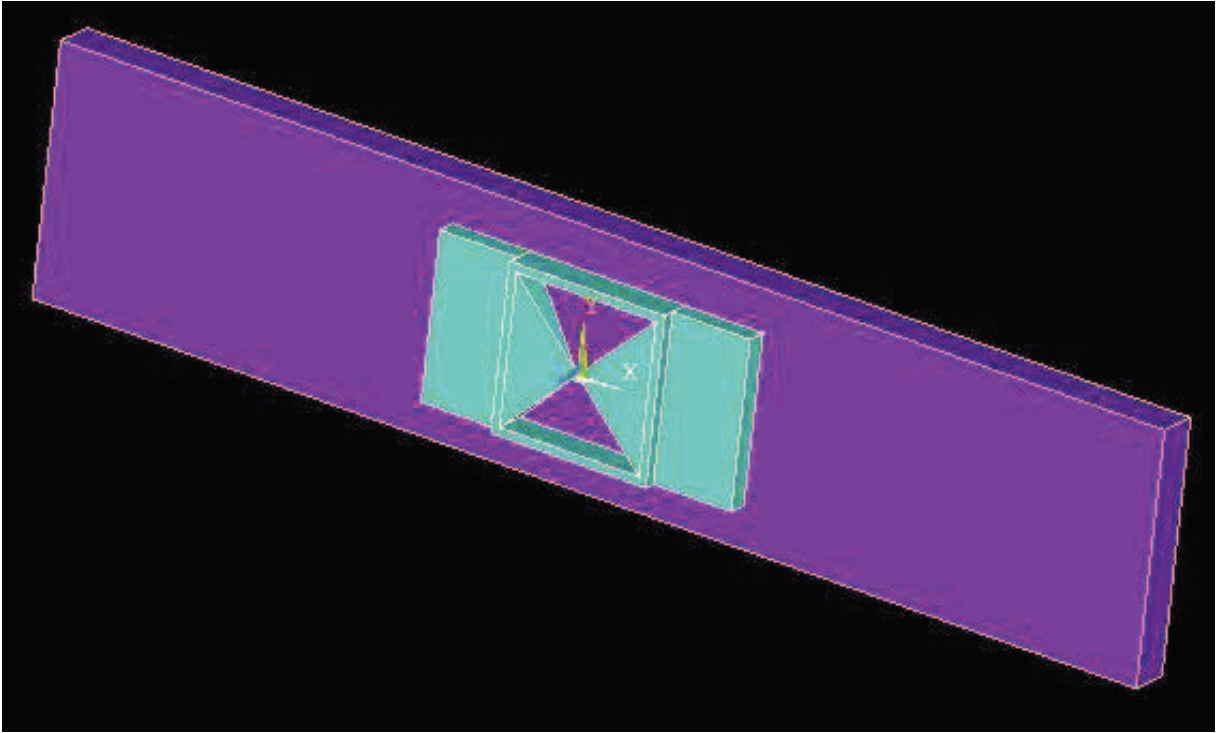


Figura 3.37 – Geometria 40 x 40 x 8 como amplificador

Na Figura 3.38 está representada a geometria mais idêntica à do sensor, mas com as alterações acima referidas, à zona central, e com as abas.

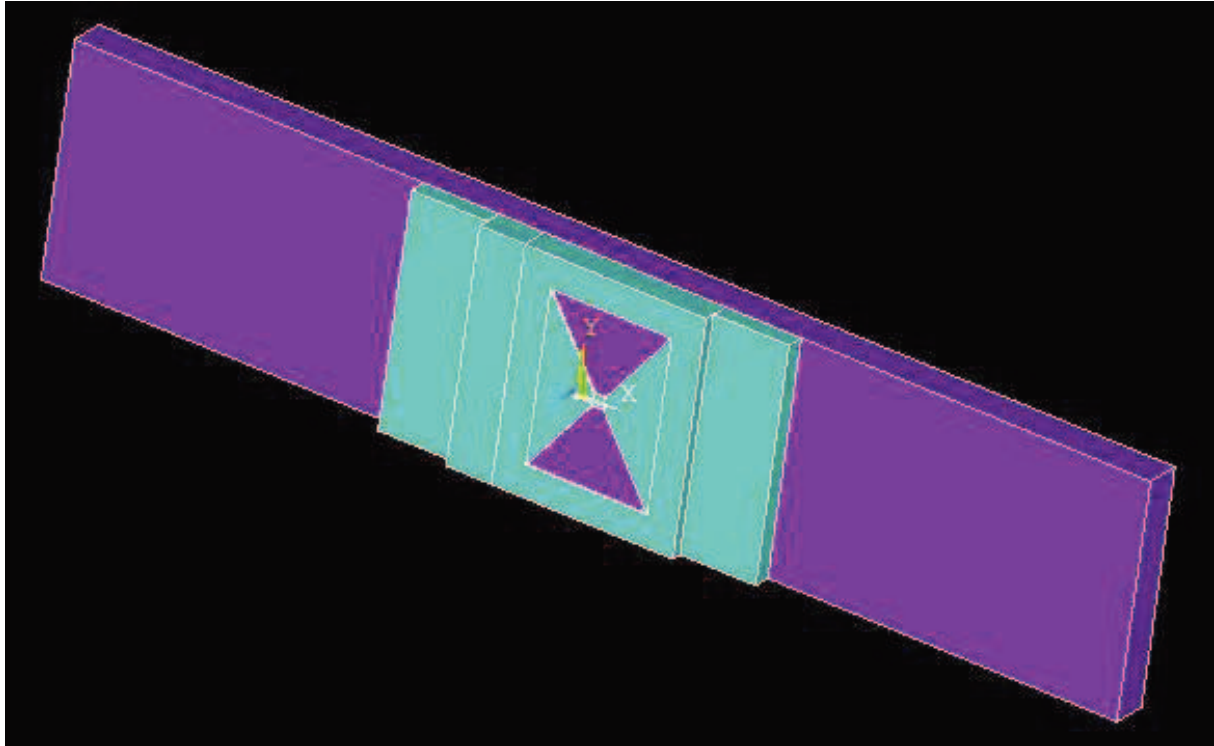


Figura 3.38 – Geometria do sensor alterada

Nestes testes, o que importa estudar é a relação entre a extensão na zona central do amplificador e a extensão no provete (a roxo). Para a geometria 60 x 60 x 8 mm as curvas obtidas (para extensómetros de 3 mm) foram as da Figura 3.39.

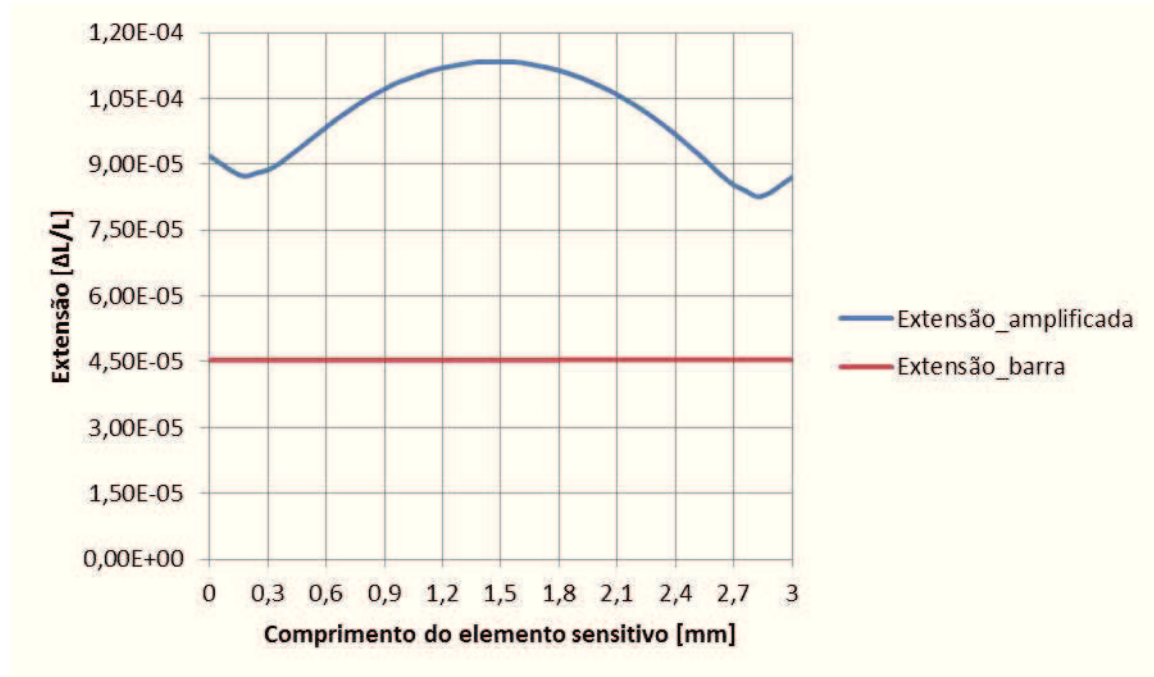


Figura 3.39 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria 60 x 60 x 8

Como é visível na Figura 3.39, a extensão na zona central do amplificador é bastante superior à extensão no provete, na verdade, deu uma ampliação de 2.2109.

Para a geometria 40 x 40 x 8 mm as curvas obtidas (para extensómetros de 3 mm) foram as da Figura 3.40.

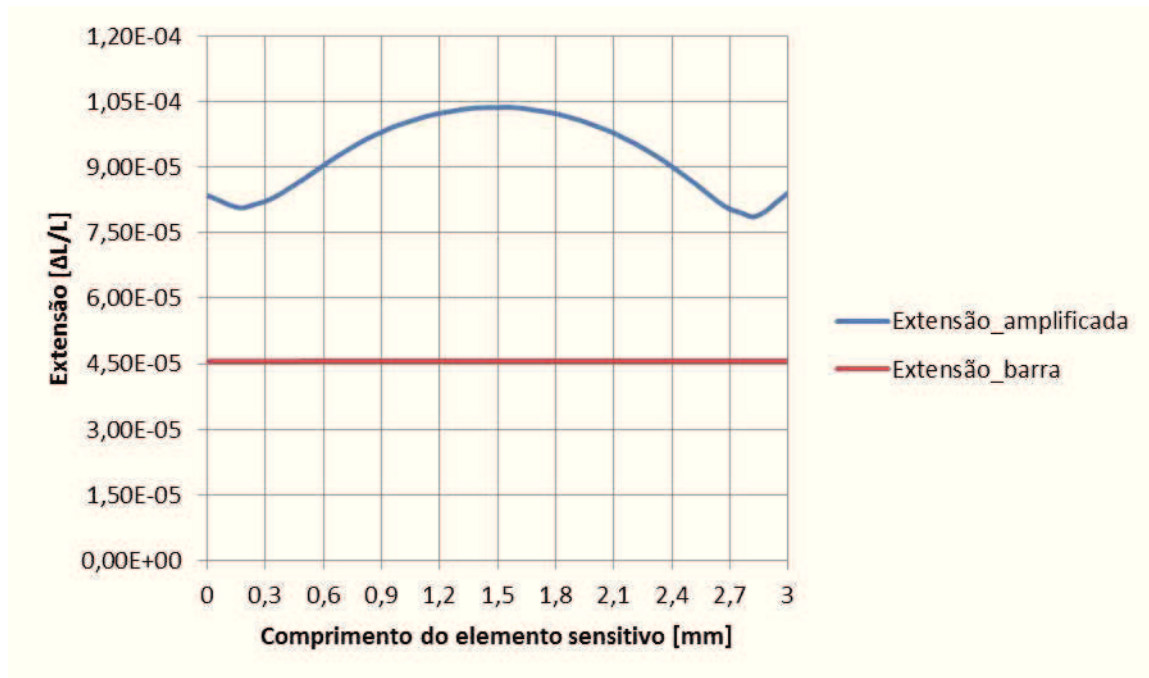


Figura 3.40 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria 40 x 40 x 8

Como é visível na Figura 3.40, a extensão na zona central do amplificador é bastante superior à extensão no provete, na verdade, deu uma ampliação de 2.0325.

Para a geometria com maiores semelhanças com o sensor de força as curvas obtidas (para extensómetros de 3 mm) foram as da Figura 3.41.

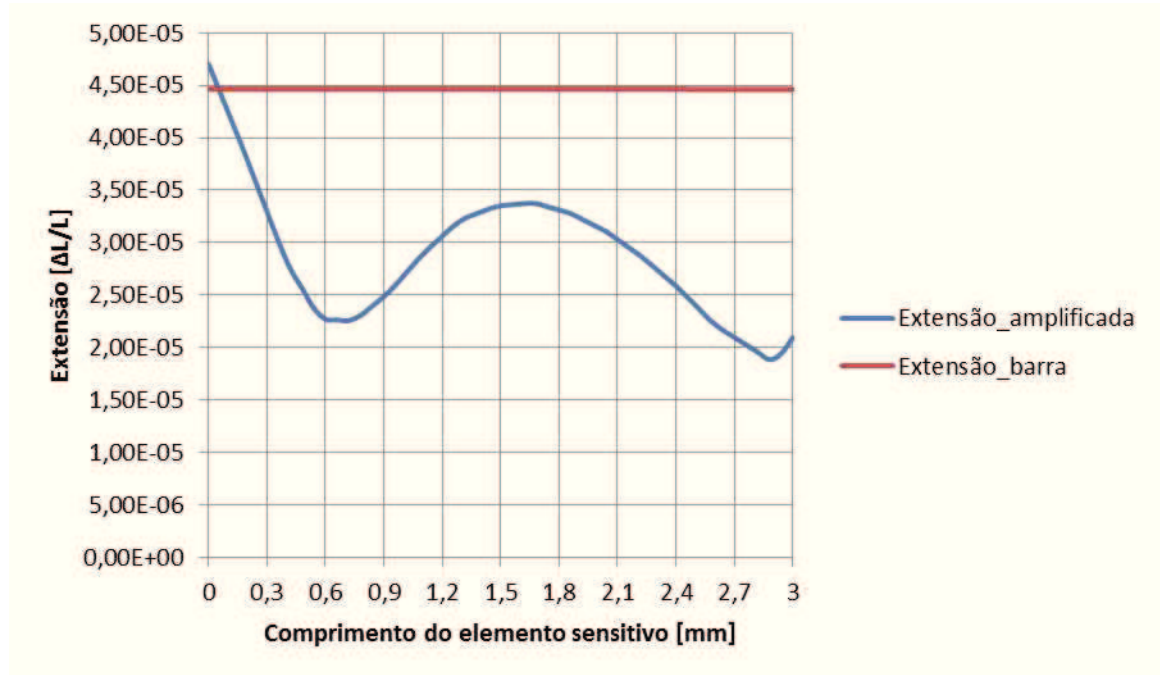


Figura 3.41 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria semelhante à do sensor de força

Como é visível na Figura 3.41, a extensão na zona central do amplificador é inferior à extensão no provete. Na verdade, deu uma ampliação de 0.6459. Assim, esta geometria não está a amplificar mas está a reduzir a sensibilidade, atenuando.

As propriedades dos materiais inseridas no Ansys para o aço e para o alumínio, por não se dispor de acesso à referência dos materiais, recorreu-se a valores típicos atribuídos a estes materiais [13]:

- ✓ Aço: densidade: 7.75 kg /dm<sup>3</sup>, módulo de elasticidade: 200 GPa e coeficiente de Poisson: 0.3;
- ✓ Alumínio: densidade: 2.70 kg /dm<sup>3</sup>, módulo de elasticidade: 74.5 GPa e coeficiente de Poisson: 0.35.

Numa fase posterior aos testes efetuados resolveu-se ainda testar mais algumas geometrias em ambiente de análise numérica, pois a ampliação ainda era considerada insuficiente. Foram testadas diversas geometrias fazendo variar espessuras do corpo e das abas,

comprimentos das abas, inserindo cortes, entre outras. Uma geometria já com grandes melhorias foi a obtida com a geometria da Figura 3.42.

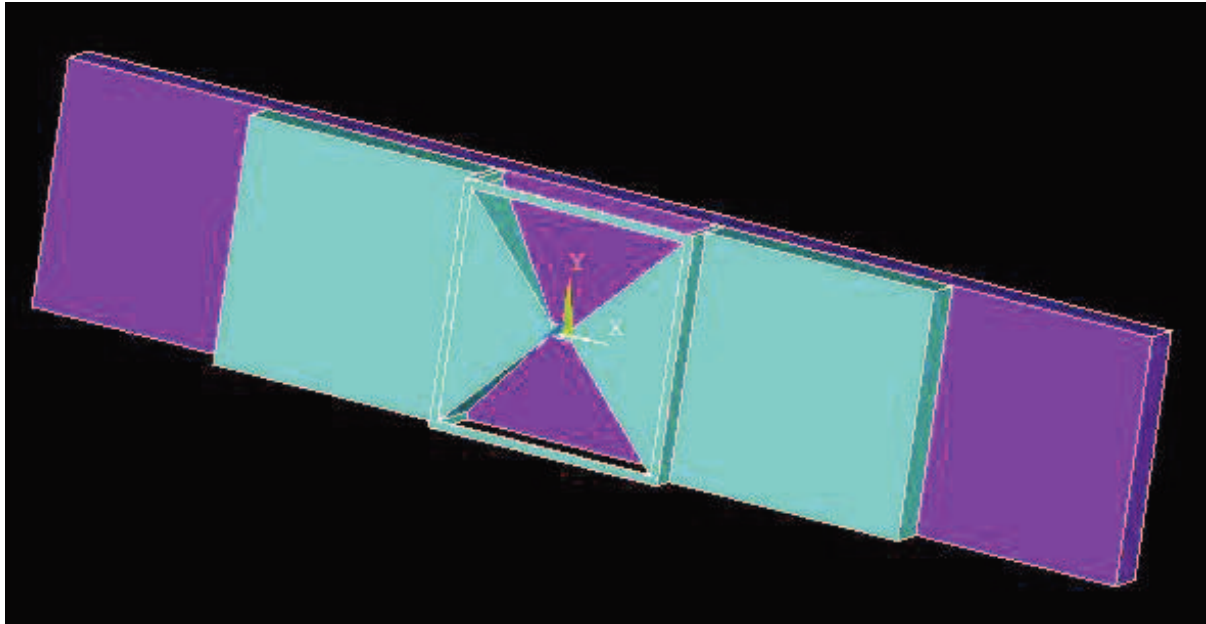


Figura 3.42 – Geometria melhorada para ter mais amplificação

Como é visível na Figura 3.43 a extensão na zona central do amplificador é bastante superior à extensão no provete. Na verdade, deu uma ampliação de 5.9367. Esta geometria serve apenas como exemplo de que a ampliação pode ser verificada, e realmente podemos ter ampliações muito elevadas.

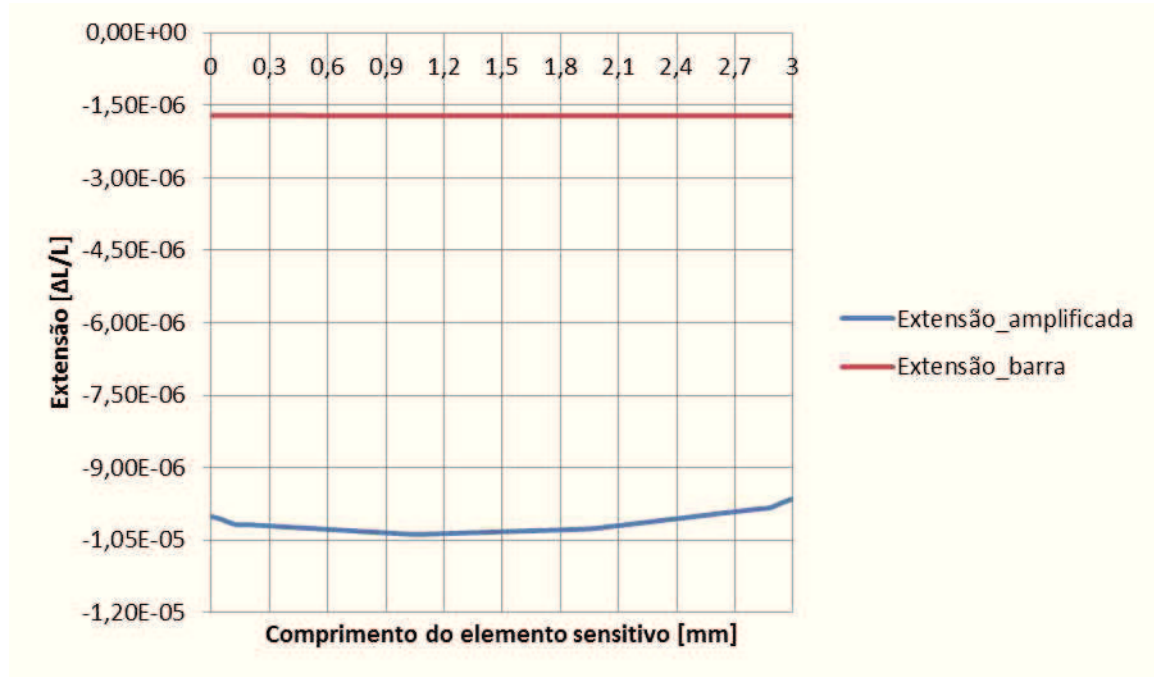


Figura 3.43 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria melhorada

Há ainda outras variáveis que tinham grande influência no fator de ampliação: as características do sítio a aplicar.

Na Figura 3.44 está representada a influência de algumas características da superfície onde o amplificador estará colocado. O ponto inicial é o provete de dimensões 285 x 60 x 10 mm (dimensões x, y e z, respetivamente). Estes testes foram efetuados com a geometria 60 x 60 x 8 mm, onde foram considerados diversos parâmetros, fixando os outros para ver a influência de cada um. Desta figura é possível retirar que o fator de ampliação depende fortemente do material da superfície e moderadamente das dimensões y e z da superfície a colocar. Esta influência deve-se à perturbação que o amplificador tem no teste. Idealmente o que se pretende é que esta perturbação seja nula, não devendo o material sensorial adicionado alterar os resultados. O que se verifica na Figura 3.44 é que o amplificador é muito perturbador no teste e portanto a amplificação obtida é muito reduzida.

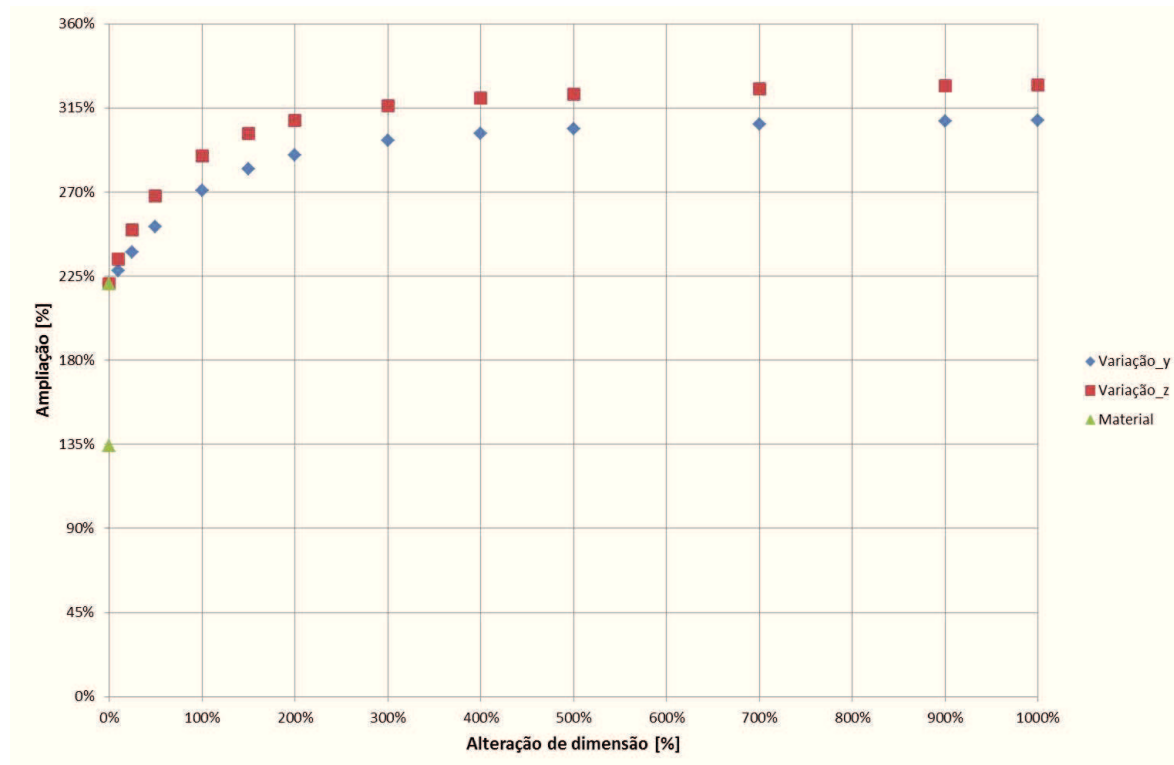


Figura 3.44 – Gráfico representativo da ampliação com as alterações das características da superfície a colocar

A alteração do material da superfície de aço para alumínio altera muito a amplificação porque, sendo o material menos resistente aos esforços, o amplificador tem percentualmente um papel maior na rigidez do conjunto. Pela Figura 3.44 verifica-se ainda que existe convergência com o aumento das dimensões y e z. Esta convergência ocorre devido ao amplificador deixar de ter um papel importante na resistência aos esforços, sendo este mesmo, o objetivo. A partir de um aumento de 400 % nas dimensões y e z as variações na amplificação são pouco significativas.

Este teste mostra que a influência do amplificador tem de ser minimizada na estrutura, reduzindo as dimensões do amplificador ou limitando as dimensões mínimas da estrutura onde pode ser aplicado. O importante é manter as relações de escala o mais distanciadas possível para que a influência seja mínima. Para as dimensões do amplificador 60 x 60 x 8 mm de alumínio, é aconselhável que a estrutura em aço tenha pelo menos 285 x 300 x 50 mm (o comprimento longitudinal à força não altera em nada os resultados).

### 3.2.1 Conceção

Tendo as geometrias definidas, o passo seguinte foi concebê-las. Para este efeito recorreu-se a uma máquina CNC que necessitou das geometrias em “CAD”, mais especificamente no formato “.igs”. Para a produção destas geometrias recorreu-se ao software “Autodesk Inventor” – Figura 3.45.

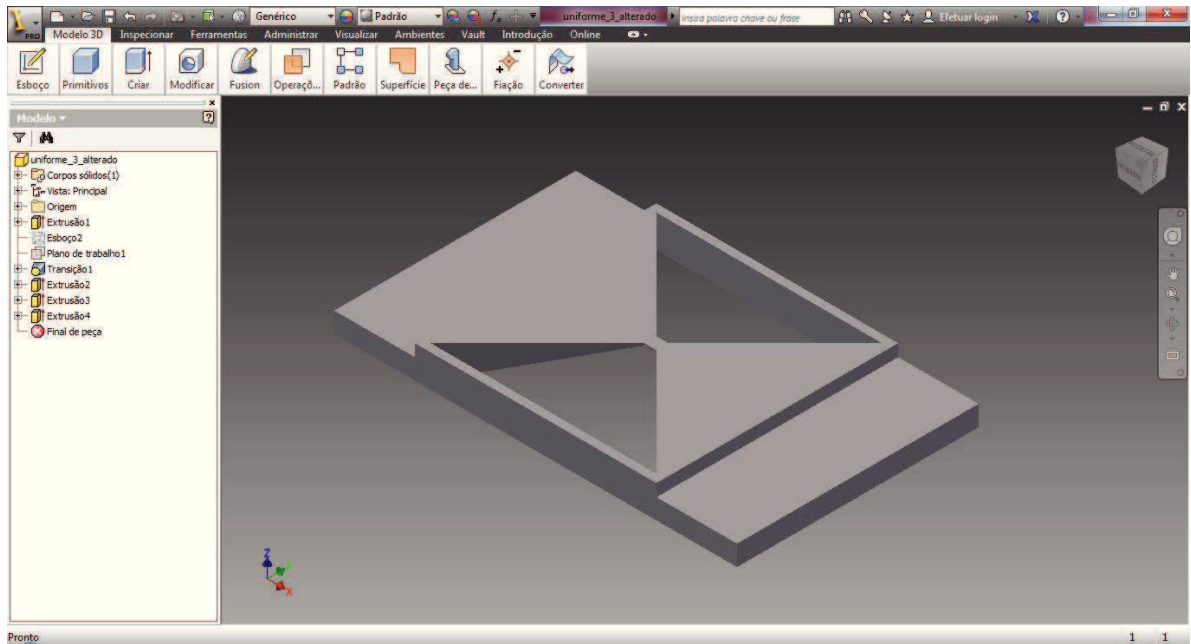


Figura 3.45 – Ambiente do software "Autodesk Inventor"

Foram produzidos 4 ficheiros “CAD” para produzir 4 geometrias diferentes:

- ✓ Geometria 60 x 60 x 30 mm sem abas;
- ✓ Geometria 60 x 60 x 8 mm com abas;
- ✓ Geometria 40 x 40 x 8 mm com abas;
- ✓ Geometria semelhante ao sensor de força com abas.

O material seleccionado foi o aço de construção. O primeiro passo consistiu em arranjar blocos de material de dimensões um pouco superiores às desejadas. Para tal, recorreu-se a uma serra eléctrica.

Posteriormente ao corte, passou-se para a CNC que correu o programa a partir do ficheiro CAD efetuado – Figura 3.46.



Figura 3.46 – Maquinação na CNC a maquirar a primeira geometria em aço

O último passo foi a retificação com a retificadora – Figura 3.47.



Figura 3.47 – Rectificadora para acabamento do amplificador

A peça final pode ser vista na Figura 3.48. À direita é visível a incapacidade das fresas da CNC de realizarem os cantos corretamente; era esperado um raio, mas não tão grande. A peça está já muito diferente da inicialmente projetada.

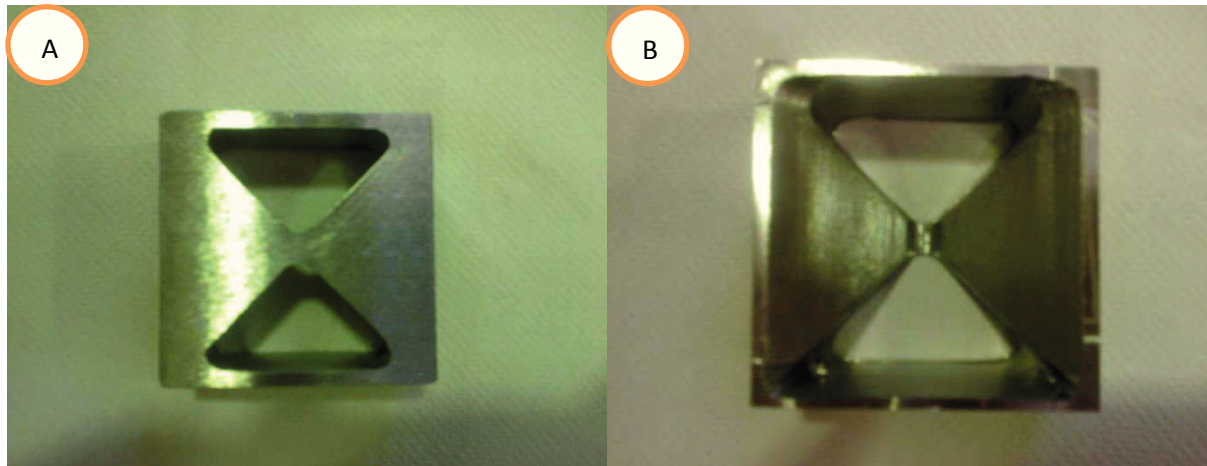


Figura 3.48 – Peça 60 x 60 x 30 mm finalizada: A – vista superior; B – vista inferior

É importante notar que a geometria produzida não ficou conforme a desejada, foram verificadas várias limitações, tais como:

- ✓ Material difícil de maquinar;
- ✓ Necessidade de abas para conectar aos provetes, foi ainda percebido que com as mesmas conseguia-se aumentar a performance do amplificador;
- ✓ Geometria com espessura muito elevada, as espessuras nas seguintes geometrias foram revertidas para os 8 mm. Isto deve-se ao facto das fresas de pequenos diâmetros serem curtas, não conseguindo aceder a todas as zonas da peça. Para efetuar esta peça o ideal passava pelo fabrico por eletroerusão, processo de fabrico que permitiria melhor precisão da peça e muito menos erros inerentes ao processo. No entanto esta tecnologia não estava ao alcance e, logo, não foi usada.

Para a produção das seguintes geometrias, portanto, houve algumas alterações. O material foi alterado para alumínio de construção. Para o primeiro passo da construção, o corte em pequenos blocos, dado que a serra elétrica não pode ser usada em alumínio, recorreu-se a

uma serra tico-tico. Originou muito mais trabalho, uma vez que a espessura de 8 mm é muito acima do limite da serra usada (5 mm), transformando minutos em horas de execução.

Foi usada a máquina CNC para produzir as 3 geometrias restantes – Figura 3.49.



Figura 3.49 – Máquina CNC a maquinar uma das geometrias em alumínio

O acabamento superficial da CNC no alumínio deixou muito a desejar, necessitando de uma boa rectificação. Surgiu ainda outro problema, a rectificadora também não estava preparada para trabalhar com alumínio e, portanto, o acabamento teria de ser manual, recorrendo a limas e lixas.

O passo final em cada uma das estruturas foi colocar um extensómetro para posterior comparação com um extensómetro colado no provete.

Nas Figura 3.48 e Figura 3.50 estão presentes os resultados, prontos a serem testados. É visível na Figura 3.50 a diferença da zona que foi rectificada manualmente para a zona não

rectificada. As abas não foram rectificadas, pois o atrito é interessante, e o mesmo é tanto maior quanto maior for a rugosidade.

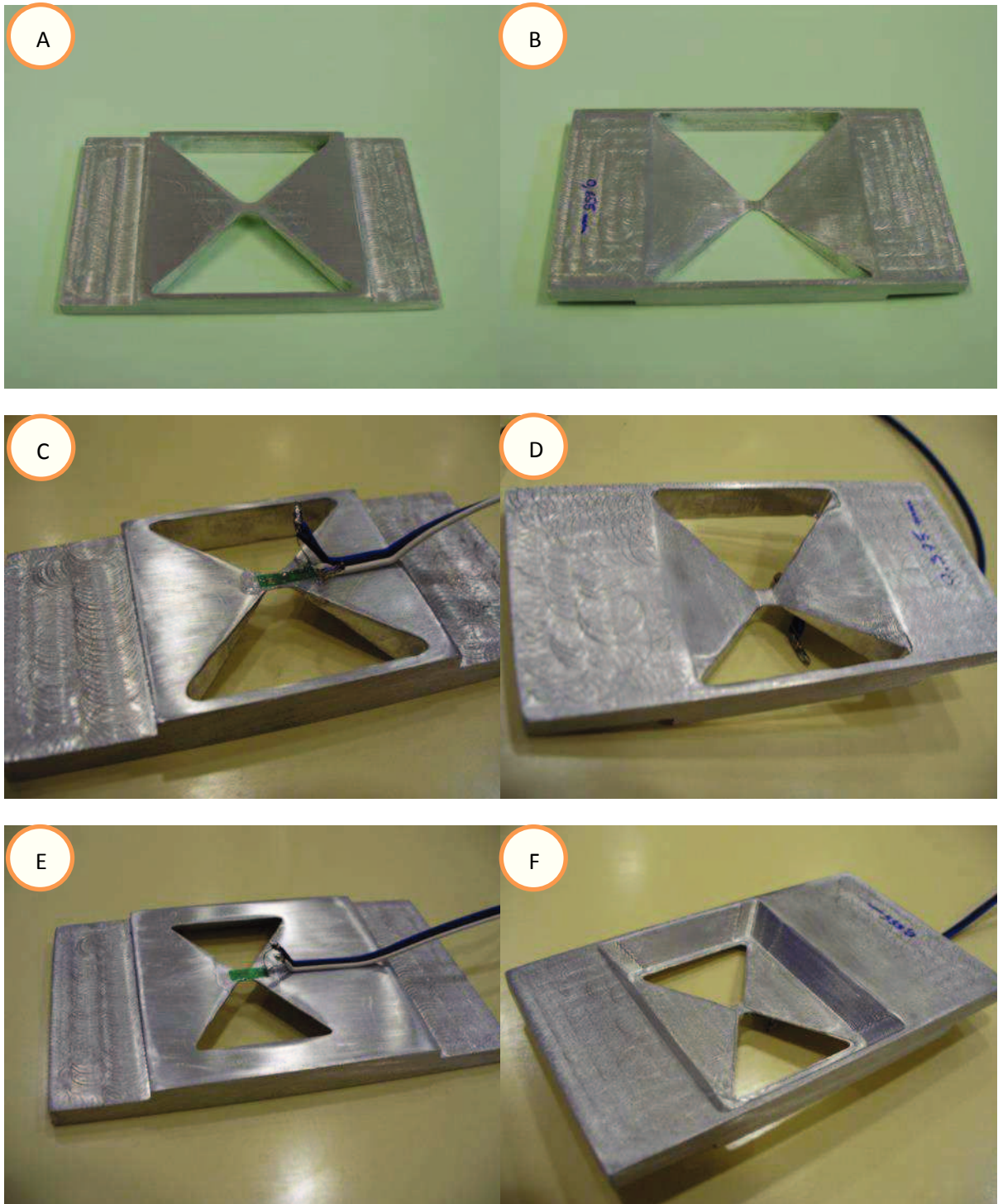


Figura 3.50 – Amplificadores acabados e prontos a testar: A – vista superior da geometria 1; B – vista inferior da geometria 1; C – vista superior da geometria 2; D – vista inferior da geometria 2; E – vista superior da geometria 3; F – vista inferior da geometria 3

### 3.2.2 Testes práticos e resultados

Para a realização dos testes práticos recorreu-se ao uso do software “Labview”, como software de aquisição e interface. Recorreu-se ainda ao chassi “NI cDAQ-9172” e ao módulo “NI 9237” da National Instrument para obter os valores dos extensómetros. Posteriormente os dados foram exportados para uma folha de “Microsoft Excel” e devidamente tratados. Na Figura 3.51 está representada a interface do software “Labview”.

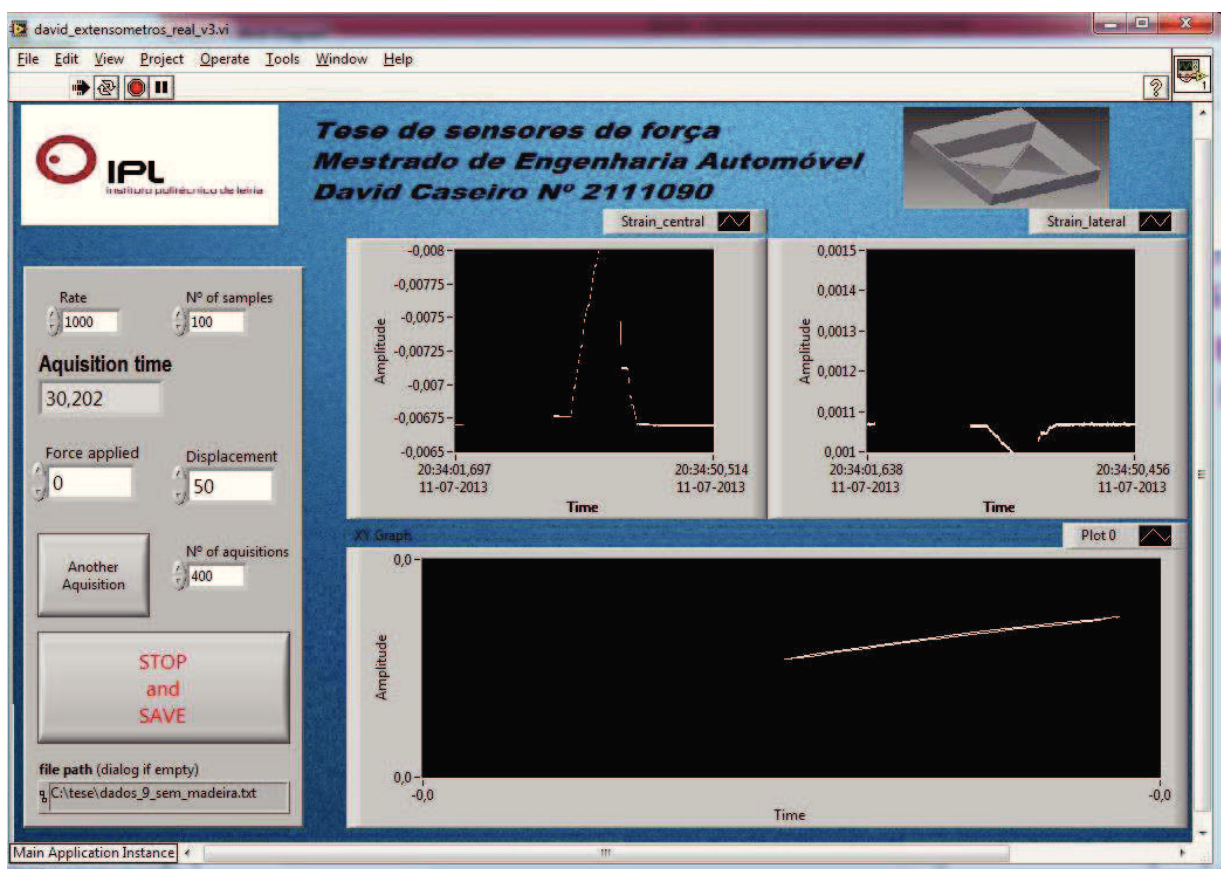


Figura 3.51 – Exemplo de um teste recorrendo ao software “Labview”

O esquema do Labview para obter os testes e ter esta interface foi o seguinte, representado na Figura 3.52.

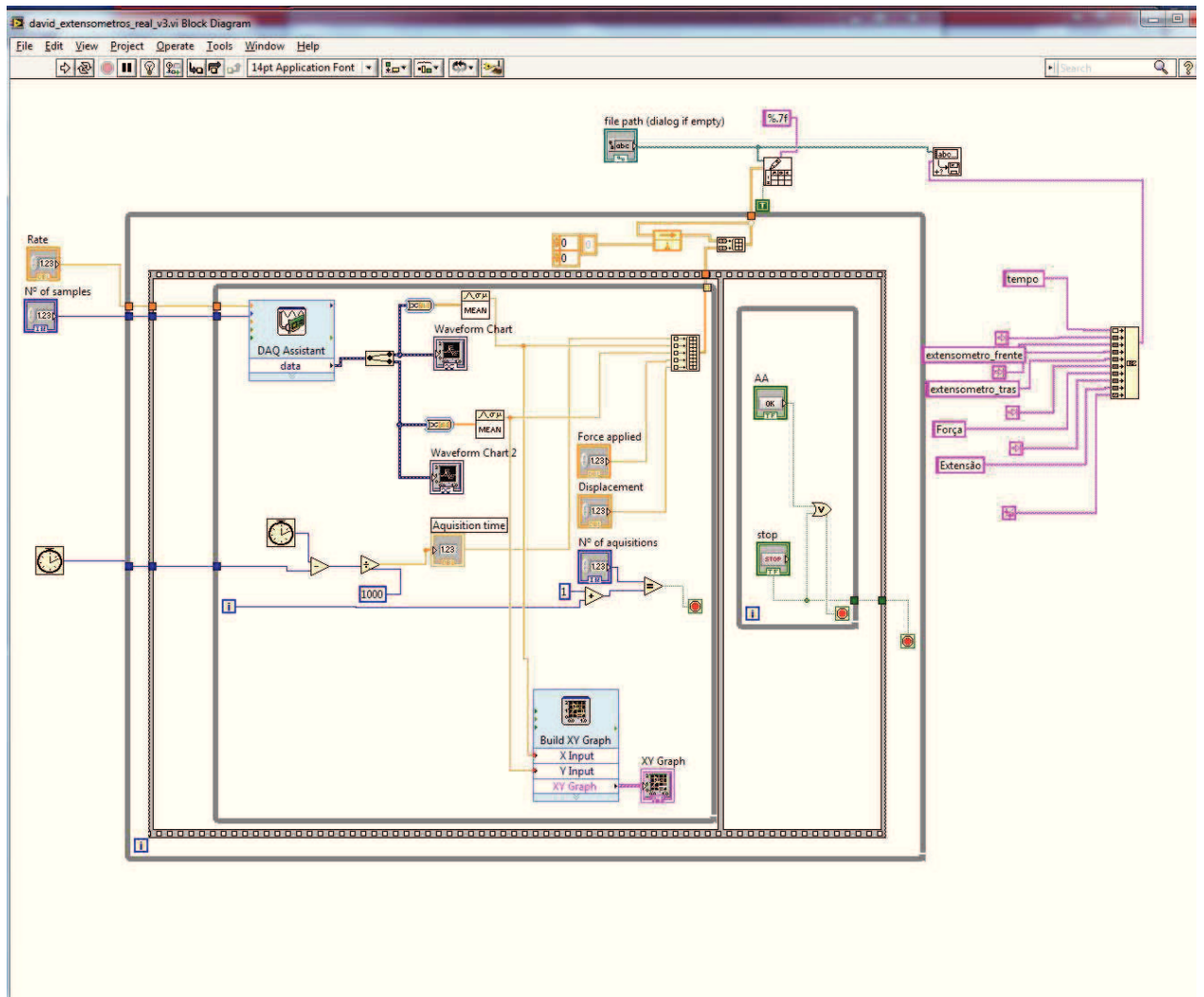


Figura 3.52 – Esquema do diagrama de blocos usado para o teste

Estando as geometrias criadas, restava testar se o conceito se verificava. Para este se verificar tinha de existir um aumento de sensibilidade em relação ao uso de apenas um extensómetro. Na Figura 3.53 está representado, esquematicamente, o teste da montagem experimental efetuada.

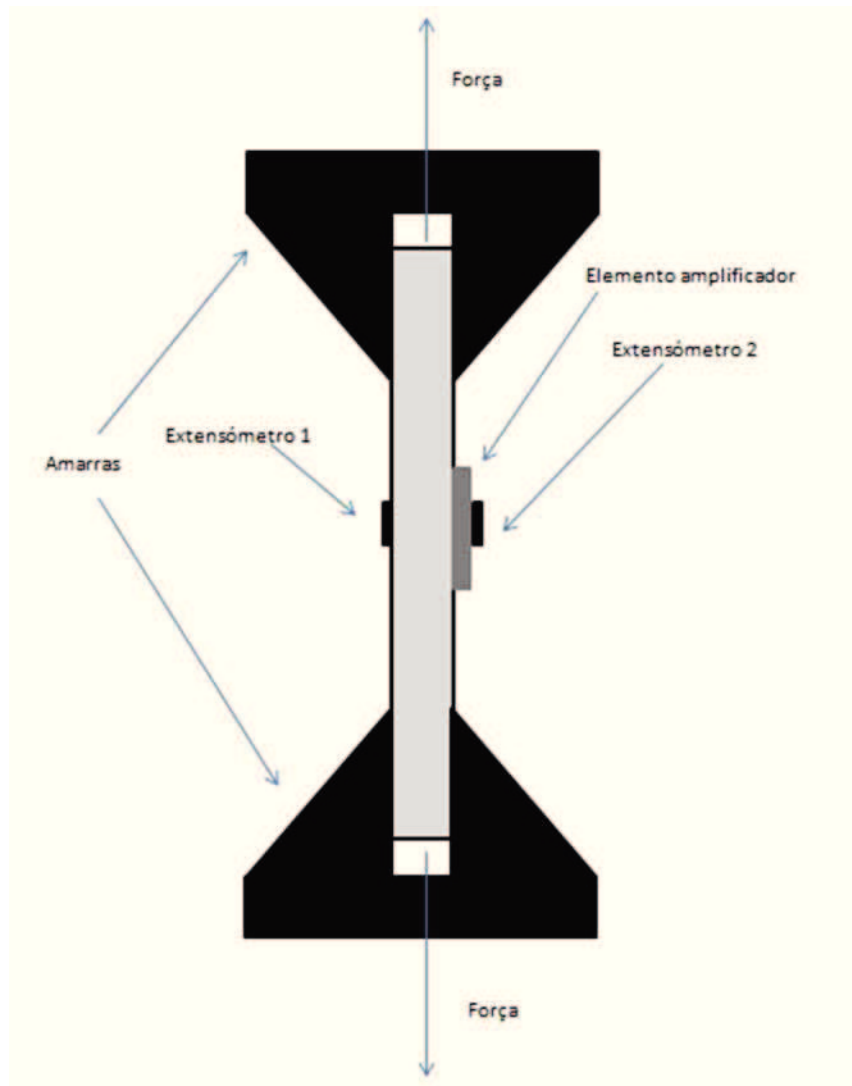


Figura 3.53 – Representação esquemática da montagem experimental

Se o conceito se comprovasse o extensômetro 2 mediria maior extensão do que o extensômetro 1, tendo portanto maior sensibilidade para a mesma força aplicada.

O ciclo de carga aplicado para este provete foi inicialmente uma recta até 0 kN para garantir um estado de repouso, de seguida uma recta até aos 10 kN (tração), seguida de uma recta até aos -10 kN (compressão), seguiu-se uma reta novamente até aos 0 kN e, sem qualquer intervalo, efetuaram-se de seguida 5 sinusóides com amplitude 10 kN, finalizando em 0 kN. Este teste foi realizado na máquina de testes “Instron 8802J4310” ideal para testes de compressão, tração e fadiga, Conseguindo aplicar diferentes tipos de ciclos de cargas.

Na Figura 3.54 é visível o teste efetuado para os diferentes amplificadores.

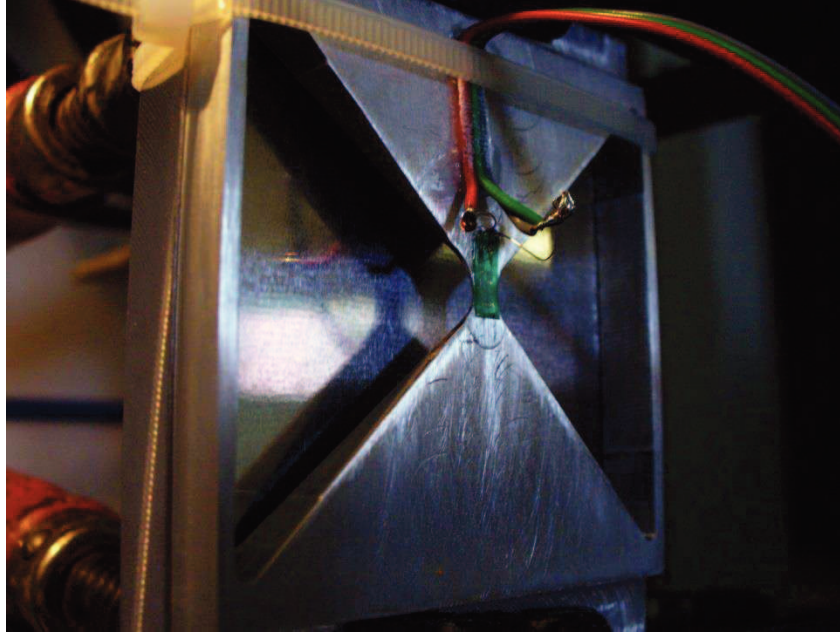


Figura 3.54 – Teste experimental

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## Discussão de Resultados

### 4.1 Resultados obtidos experimentalmente

#### 4.1.1 Geometria 1

Na Figura 4.55 é visível o ciclo de carga aplicado, assim como é já notória a amplificação do extensómetro 2 em relação ao extensómetro 1. Esta ampliação é visível através da amplitude em relação ao zero do sensor.

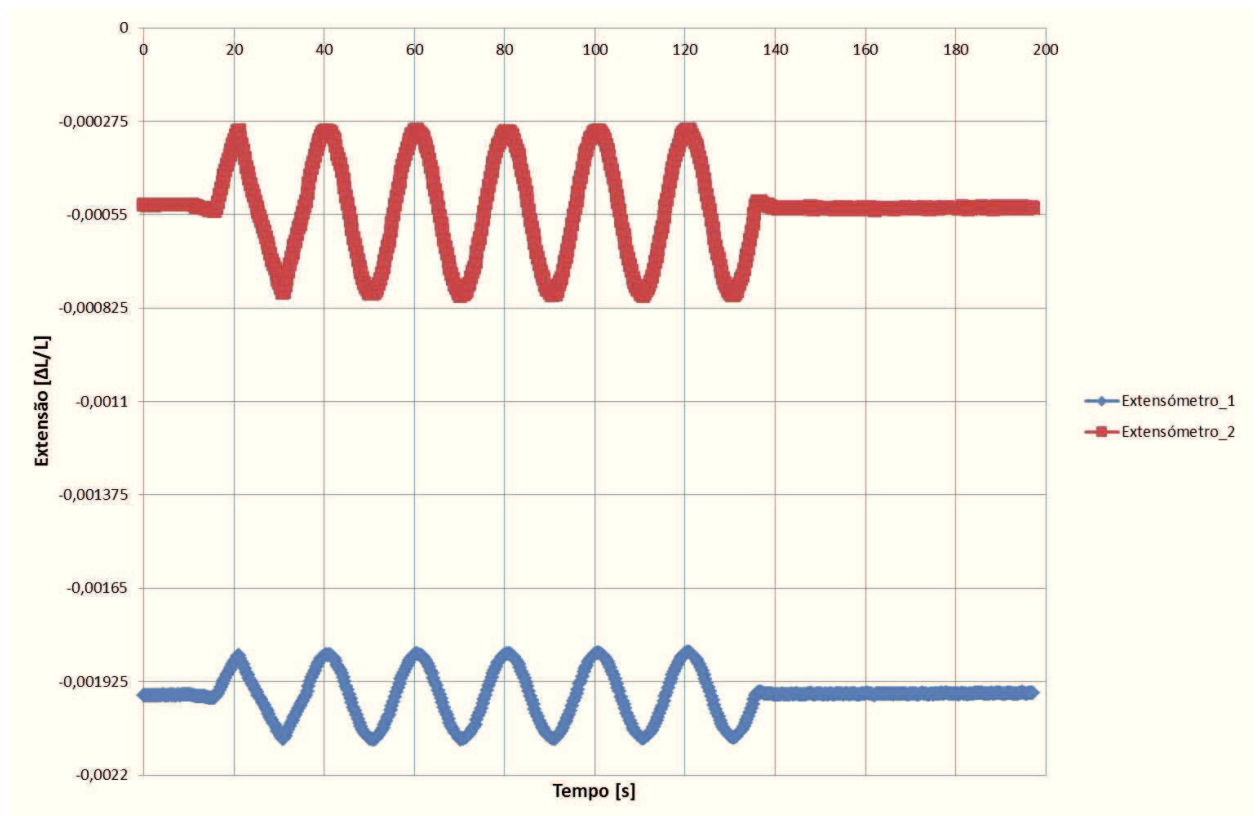


Figura 4.55 – Ciclo de cargas registrado pelos dois extensómetros para a geometria 1

Para se conseguir a relação de ampliação obtida, os dados foram comparados entre si. Na Figura 4.56, no eixo das abcissas temos os valores do extensómetro 1 e no eixo das ordenadas os valores do extensómetro 2. A razão de ampliação para esta geometria é de cerca de 1.9336 vezes. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é muito próximo de 1, o que mostra uma boa linearidade.

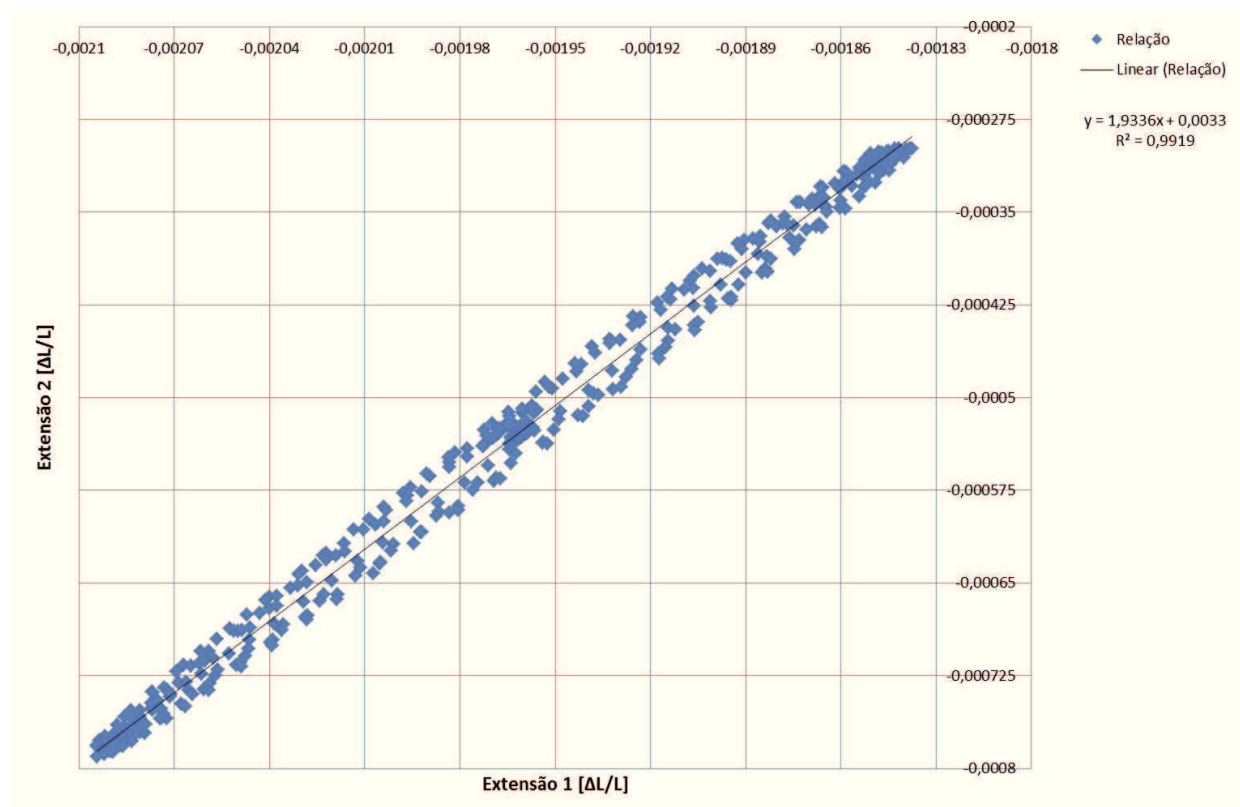


Figura 4.56 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para a geometria 1

### 4.1.2 Geometria 2

Para a geometria 2 foram feitos vários testes sem interrupção, requerendo tratamento dos dados para analisar cada teste individualmente.

Na Figura 4.57 é visível o ciclo de cargas aplicado, assim como a deteção por parte dos extensómetros do ciclo de forças aplicado. Apesar de terem sido usados dois eixos

verticais, foi tida em consideração a mesma amplitude (diferença entre mínimo e máximo), para que visualmente fosse comparada a diferença de amplitude. Como pode ser visto, a amplitude do extensómetro 2 é superior à do extensómetro 1, constatando-se existe ampliação.

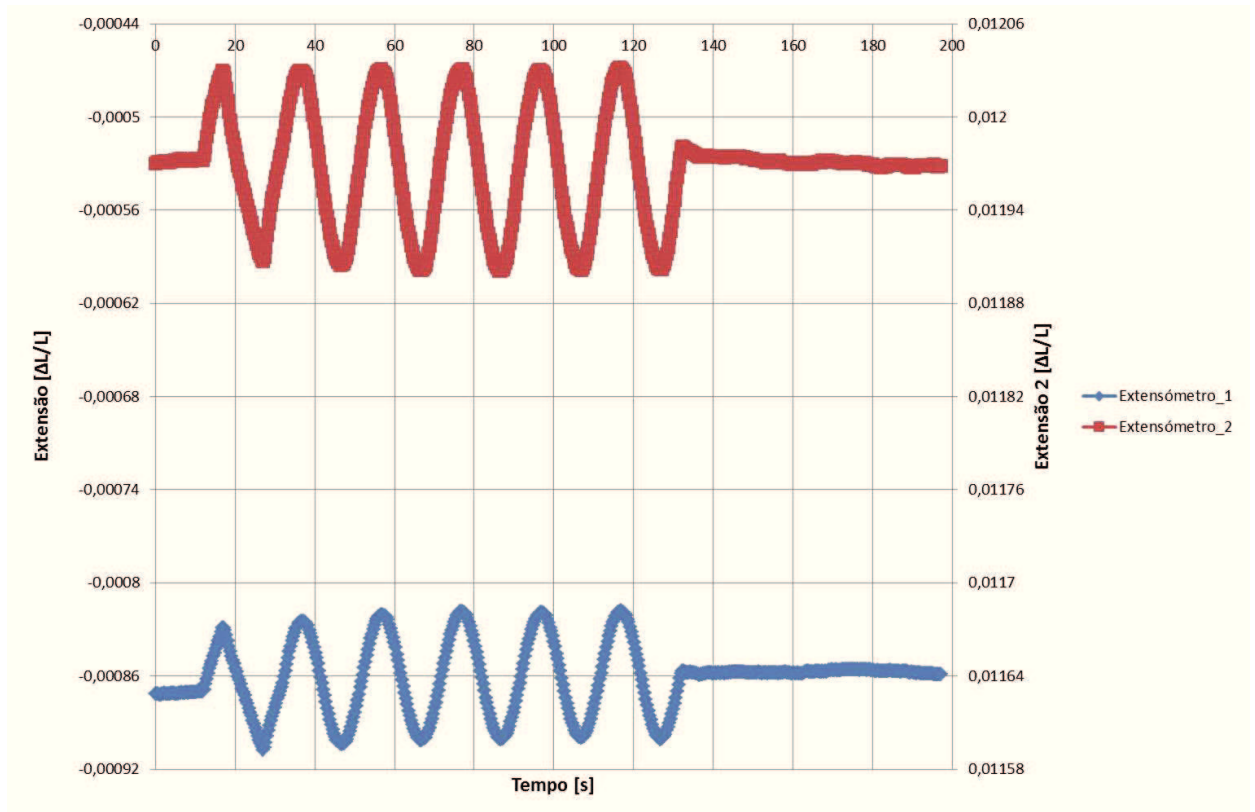


Figura 4.57 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para a geometria 2

Na Figura 4.58 estão representados os vários ciclos efetuados assim como uma recta de regressão linear para cada um dos testes. Mais uma vez, no eixo das abcissas temos os valores do extensómetro 1 e no eixo das ordenadas os valores do extensómetro 2. A razão de ampliação para esta geometria é de cerca de 1.5796 vezes (média dos declives dos 6 testes), estando os declives de cada um destes testes representado na Figura 4.58, por baixo da legenda e de forma sequencial. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) continua a ser muito próximo de 1 o que mostra uma boa linearidade.

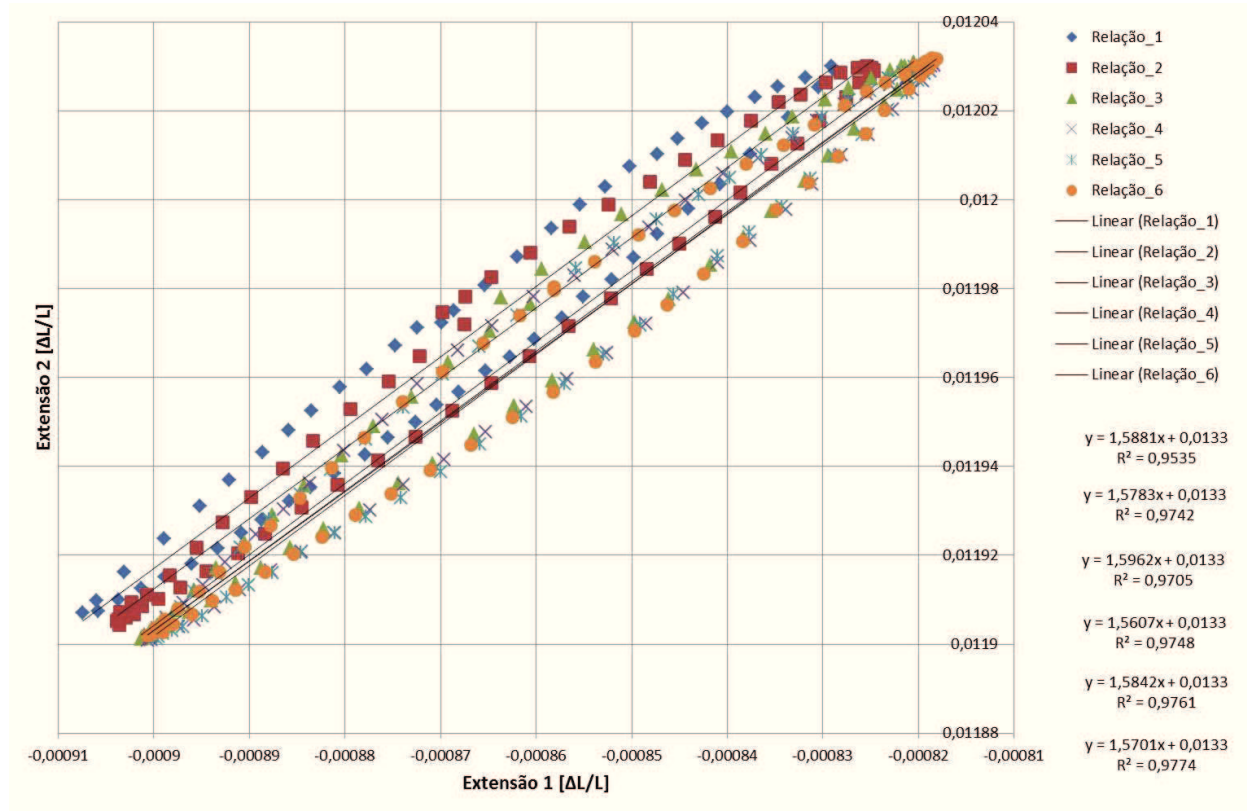


Figura 4.58 – Gráfico extensômetro 1 x extensômetro 2 para a geometria 2

### 4.1.3 Geometria 3

Tal como para a geometria 2, foram realizados vários testes sem interrupção e, portanto, os dados foram tratados para serem analisados individualmente.

Na Figura 4.59 é visível o ciclo de cargas sentido por cada um dos extensômetros, é ainda de realçar que o quinto ciclo da sinusóide não foi concluído, sendo possível que os dados respeitantes a este ciclo possam conter alguns erros associados à experiência.

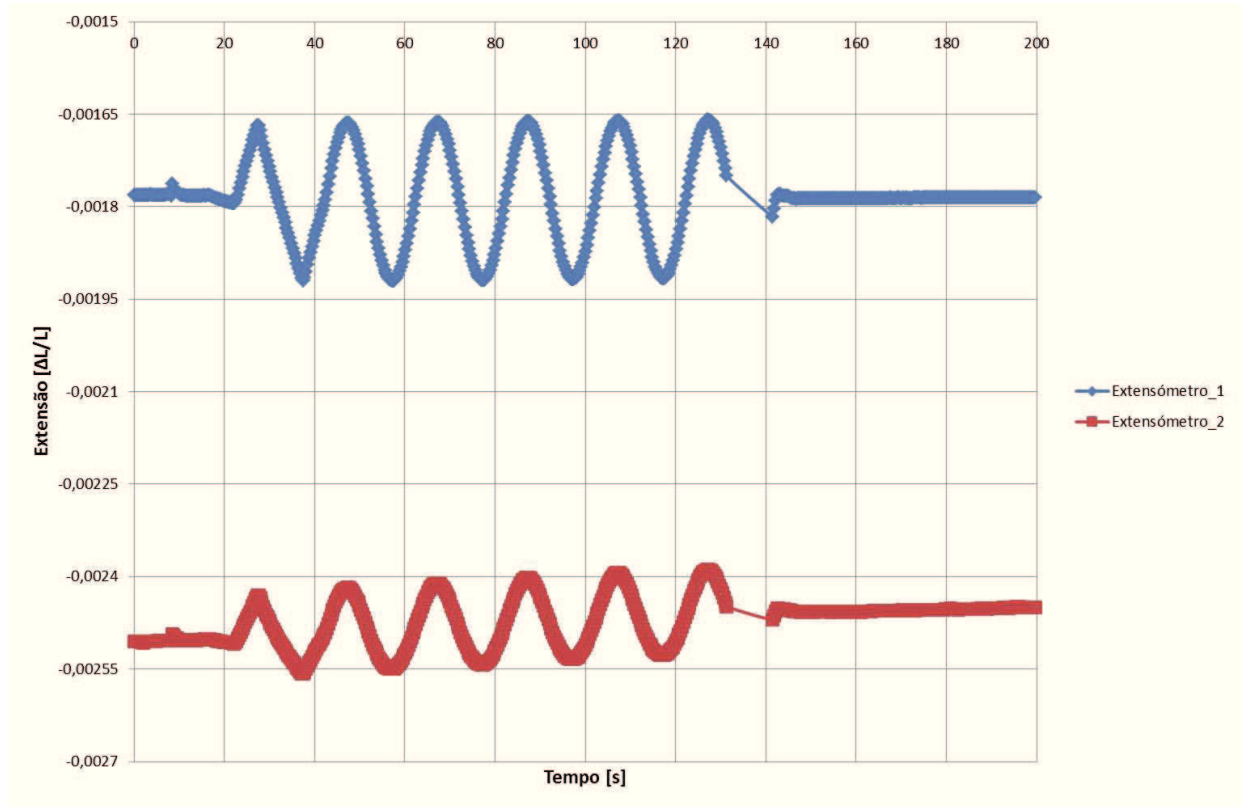


Figura 4.59 – Ciclo de cargas registrado pelos dois extensômetros para a geometria 3

Na Figura 4.60 estão representados os vários ciclos efetuados assim como uma recta de regressão linear para cada um dos testes. Mais uma vez, no eixo das abcissas temos os valores do extensómetro 1 e no eixo das ordenadas os valores do extensómetro 2. A razão de ampliação para esta geometria é de cerca de 0.5100 vezes (média dos declives dos primeiros 5 testes (bem efetuados)), os declives de cada um destes testes estão representados na Figura 4.60, por baixo da legenda e de forma sequencial. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) continua a ser muito próximo de 1, o que mostra uma boa linearidade. Este valor de ampliação pode acontecer apenas devido às dimensões do provete, pois a relação de dimensões entre o amplificador e o provete é muito baixa, fazendo com que o amplificador interfira muito nos testes.

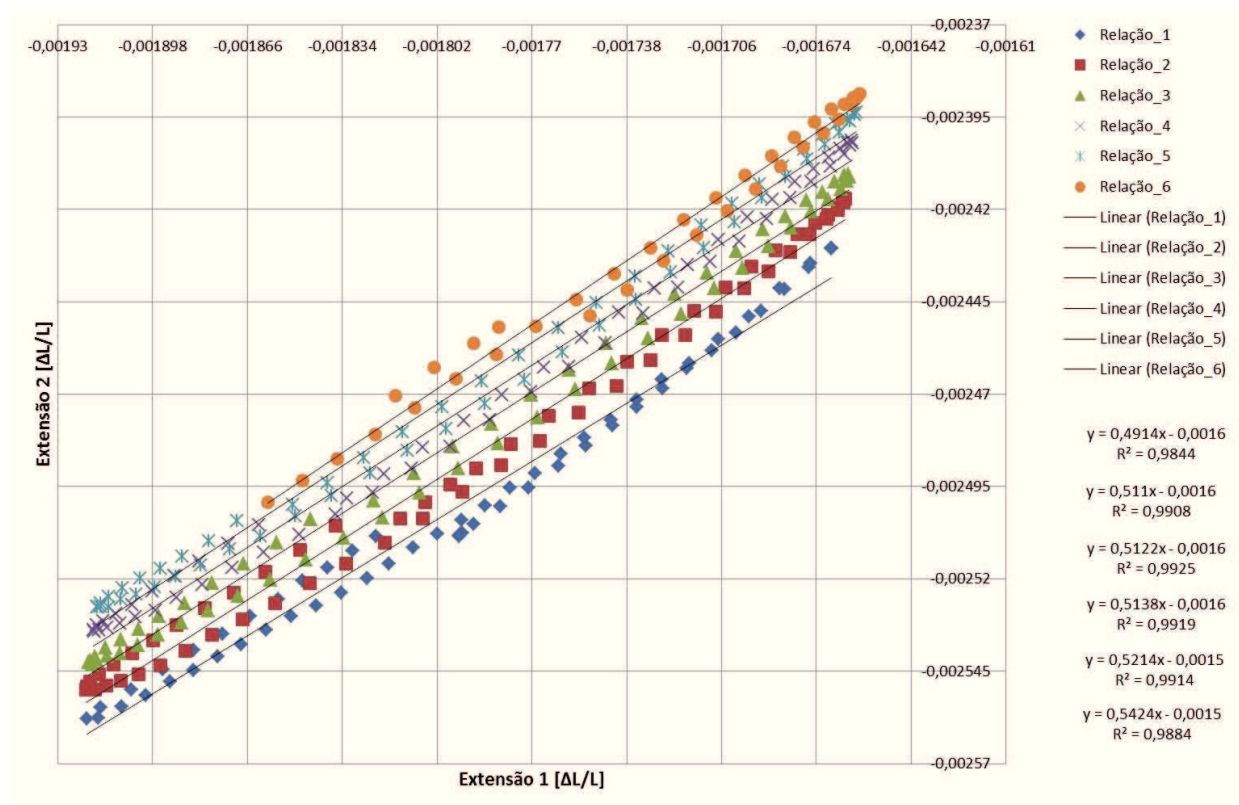


Figura 4.60 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para a geometria 3

#### 4.1.4 Geometria 3 com extensómetro semi-condutor

Na Figura 4.61 é visível o extensómetro semi-condutor na geometria anterior para testes.

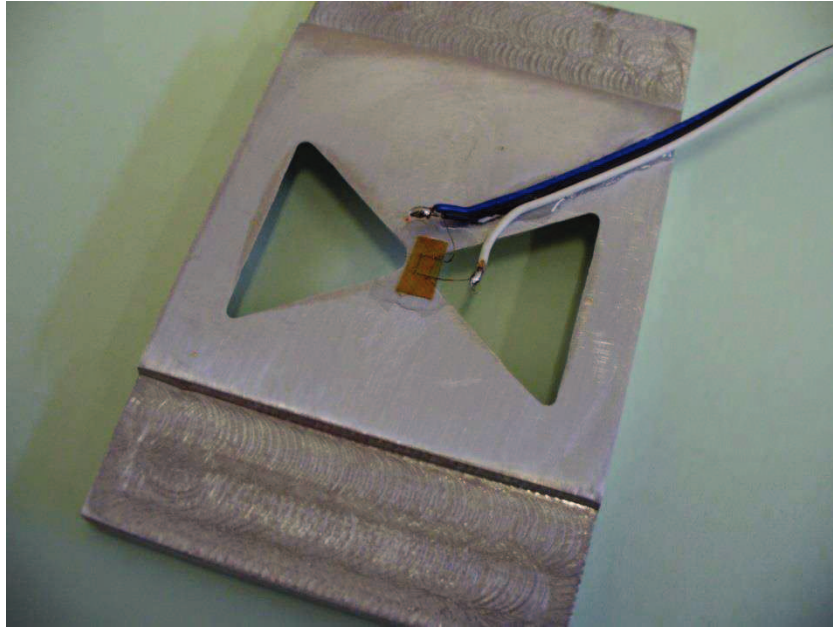


Figura 4.61 – Geometria 3 com extensómetro semi-condutor

Neste teste deparou-se um problema: o módulo “NI 9237” da National Instrument não estava preparado para obter os valores proporcionados por este tipo de extensómetros. Nem sequer no software “Labview” dava para seleccionar um extensómetro da ordem de grandeza dos atuais nos semi-condutores. O extensómetro semi-condutor testado foi o DP140-3-35-G da “Vyroba Tenzometru A Snimacu” e cedido pela mesma empresa justamente para esta tese. Para ultrapassar este problema mediu-se a tensão para, deste modo, se descobrir a resistência que o extensómetro semi-condutor apresentava a cada instante e, segundo a equação fornecida pelo fabricante, determinar a extensão sofrida.

Tendo a tensão para se obter a resistência e sabendo que foi aplicado uma tensão de 5 V, a fórmula para o divisor de tensão é dada pela equação (29).

$$V_{e_{out}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 5 \Leftrightarrow R_2 = \frac{V_{e_{out}} \times R_1}{5 - V_{out}} \quad (29)$$

Onde  $R_1$  é  $350 \Omega$  e  $R_2$  é a resistência do extensómetro que será usado na equação (30) como  $R_{\varepsilon,25}$  para determinar, por fim,  $\varepsilon$ . [14]

$$R_{\varepsilon,25} = R_{B,25} + R_{0,25} (C_1 \times \varepsilon + C_2 \times \varepsilon^2) \quad (30)$$

Onde  $R_{B,25}$  é 323  $\Omega$ ,  $R_{0,25}$  é 353.3  $\Omega$ ,  $C_1$  é 130 e  $C_2$  é 3715. Este extensómetro, por ser semi-condutor, varia a sua resistência notavelmente com a temperatura e, para anular esta variável, os testes foram feitos a 25 °C. Da equação (30) surge a equação (31).

$$3715 \times \varepsilon^2 + 130 \times \varepsilon - \frac{R_{\varepsilon,25} - 323}{353,3} = 0 \quad (31)$$

Tem-se portanto, através da fórmula resolvente, duas hipóteses:

Hipótese 1, equação (32).

$$\varepsilon = - \frac{-130 + \sqrt{130^2 - 4 \times 3715 \times \left(-\left(\frac{R_{\varepsilon,25} - 323}{353,3}\right)\right)}}{2 \times 3715} \quad (32)$$

Hipótese 2, equação (33).

$$\varepsilon = - \frac{-130 - \sqrt{130^2 - 4 \times 3715 \times \left(-\left(\frac{R_{\varepsilon,25} - 323}{353,3}\right)\right)}}{2 \times 3715} \quad (33)$$

Desta forma conseguimos converter a variação de tensão numa strain, que era o objetivo. De seguida compara-se esta com a strain obtida normalmente pelo extensómetro metálico que se encontra na parte de trás do provete.

Nas Figura 4.62 e Figura 4.63 são visíveis os ciclos de cargas sentidos por cada um dos extensómetros. Tal como no caso da geometria 2, foram usados dois eixos verticais mas,

neste caso, a amplitude do eixo vertical secundário (respeitante à do extensómetro 2) foi reduzida em dez vezes. Esta redução foi prepositada, e teve como objetivo uma melhor visualização de três aspetos fundamentais retirados deste teste:

- ✓ Não existe uma ampliação, contrariando o esperado, sendo a amplitude do extensómetro 2 cerca de 5.62 % da amplitude do extensómetro 1 (na figura apresenta cerca de 56.2 % devido à redução de 10 vezes no eixo secundário);
- ✓ Existe um desfasamento entre os resultados do extensómetro 1, extensómetro 2 (hipótese 1 da fórmula resolvente) e extensómetro 2 (hipótese 2 da fórmula resolvente). É notório que para as duas hipóteses do extensómetro 2 existe um desfasamento de 180 graus. Tanto na Figura 4.62 como na Figura 4.63 temos ainda um desfasamento do extensómetro 1 em relação ao 2. Tal deve-se ao facto do extensómetro 1 estar a ser recebido pelo módulo “NI 9237” e estar a sofrer um tratamento de sinal, atrasando a resposta. Por outro lado o extensómetro 2 está a ser lido diretamente através da variação do valor de tensão, não sofrendo qualquer atraso. A hipótese da fórmula resolvente acertada para o extensómetro 2 é a segunda, tendo uma correlação positiva;
- ✓ É notório ainda um grande ruído nos gráficos do extensómetro 2, que se deve à falta de tratamento de sinal, nomeadamente filtros.

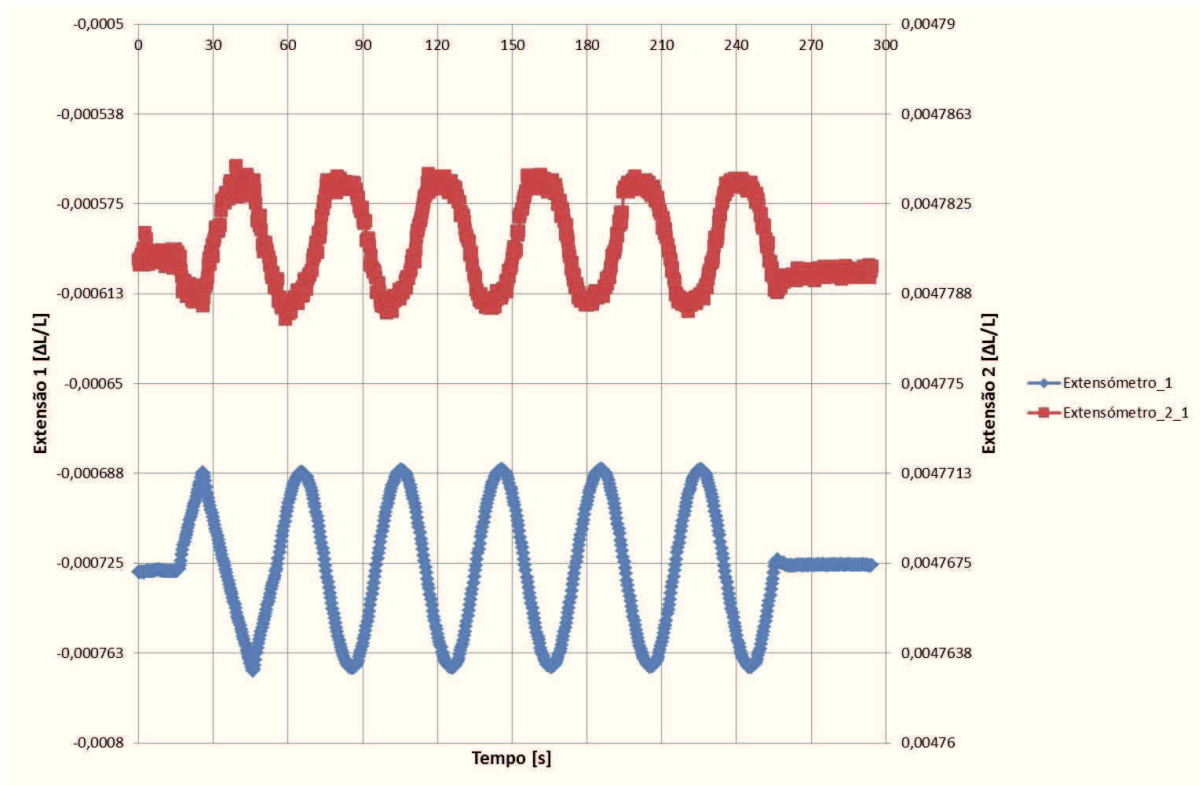


Figura 4.62 – Ciclo de cargas registrado pelos dois extensômetros para a geometria 3 com extensômetro semicondutor (hipótese 1)

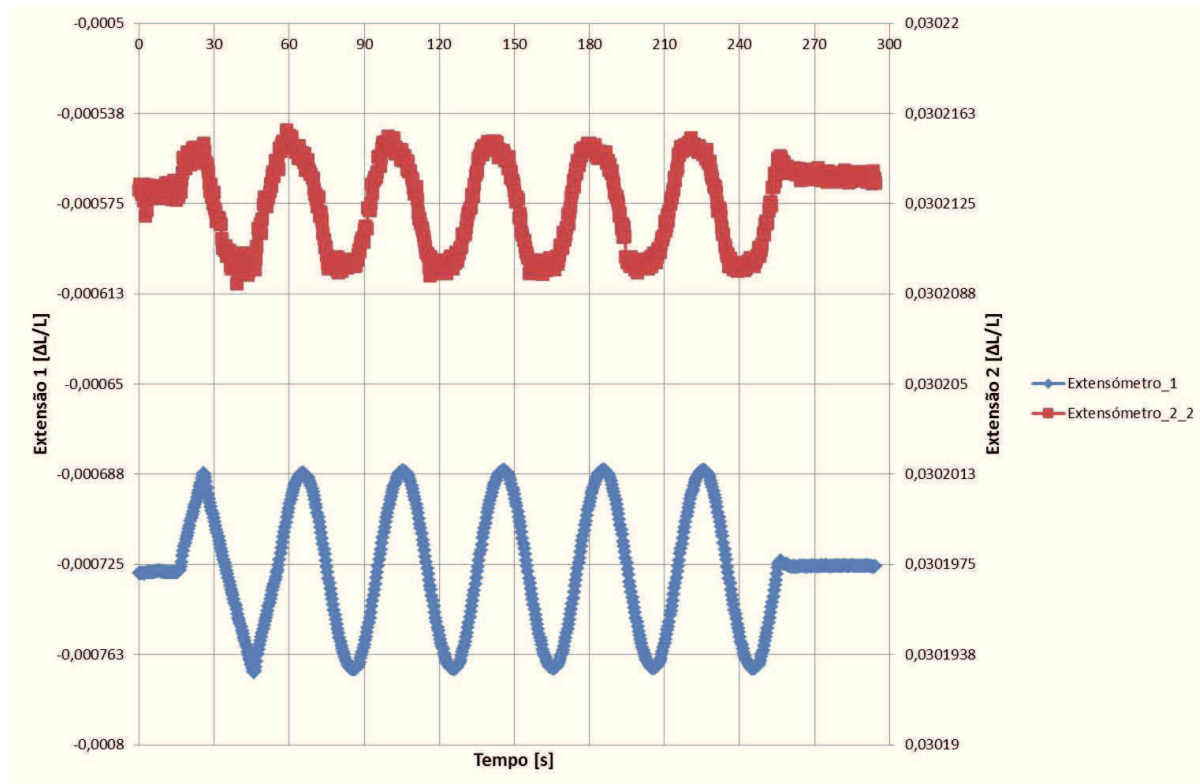


Figura 4.63 – Ciclo de cargas registrado pelos dois extensômetros para a geometria 3 com extensômetro semicondutor (hipótese 2)

Não se obteve uma ampliação ao recorrer ao extensómetro semi-condutor em detrimento do extensómetro metálico. Com efeito, e apesar da sensibilidade do extensómetro semi-condutor ser várias vezes mais elevada, nos testes efetuados não conseguimos uma melhoria de resultados, devido, principalmente, à falta de equipamento de receção e tratamento do sinal.

## 4.2 Comparação dos resultados obtidos com os esperados

Para a geometria 1 (60 x 60 x 8), os resultados obtidos por via numérica resultaram numa amplificação de 2.2109 vezes face à inexistência de amplificador, enquanto o resultado obtido por via experimental apresentou 1.9336 de amplificação. A fórmula do erro em relação ao valor obtido por via numérica é dada pela equação (34). A equação (35) representa o erro relativo para a geometria 1.

$$Erro_{relativo} = \frac{|Valor_{numérico} - Valor_{experimental}|}{Valor_{numérico}} \quad (34)$$

$$Erro_{relativo(1)} = \frac{|2.2109 - 1.9336|}{2.2109} = 12.54 \% \quad (35)$$

Para a geometria 1 temos, portanto, um erro relativo de 12.54 % em relação ao valor obtido por via numérica.

Para a geometria 2 (40 x 40 x 8 mm), os resultados obtidos por via numérica resultaram numa amplificação de 2.0325 vezes face à inexistência de amplificador, enquanto o resultado obtido por via experimental apresentou 1.5796 de amplificação. A equação (36) representa o erro relativo para a geometria 2.

$$Error_{relativo(2)} = \frac{|2.0325 - 1.5796|}{2.0325} = 22.28 \% \quad (36)$$

Para a geometria 2 temos, portanto, um erro relativo de 22.28 % em relação ao valor obtido por via numérica.

Para a geometria 3 (semelhante à geometria do sensor de força), os resultados obtidos por via numérica resultaram numa amplificação de 0.6459 vezes face à inexistência de amplificador, enquanto o resultado obtido por via experimental apresentou 0.5100 de amplificação. A equação (37) representa o erro relativo para a geometria 3.

$$Error_{relativo(3)} = \frac{|0.6459 - 0.5100|}{0.6459} = 21.04 \% \quad (37)$$

Para a geometria 3 temos, portanto, um erro relativo de 21.04 % em relação ao valor obtido por via numérica.

Estes erros são devidos a vários fatores, de entre os quais se destacam:

- ✓ Diferenças muito significativas entre as peças analisadas por via numérica e as construídas. A tecnologia usada para a produção não foi a mais apropriada em virtude de a escolhida, a eletroerusão, não se encontrar funcional, sendo-se forçado a optar pela CNC. A diferença nestas tecnologias é a incapacidade da CNC de, por exemplo, produzir um vértice, conseguindo apenas uma circunferência com 1.5 mm de raio. Também o acabamento superficial, saído da CNC, foi tão mau que necessitou de um acabamento manual, originando ainda mais erros de precisão.
- ✓ Imprecisão nas propriedades do alumínio e do aço, que não se conseguiram apurar com exatidão, tendo-se portanto que usar na via numérica a média da gama usual para estes materiais, podendo por isso conter alguns erros.

Além destes erros que seguramente estavam presentes, deve-se considerar ainda a possibilidade de ter ocorrido alguma espécie de escorregamento entre o amplificador e o provete pois, mesmo recorrendo a grampos e a cianoacrilato, a fixação pode não ter sido 100 % eficaz como o é no método por via numérica.

É de realçar ainda o facto de os maiores erros se encontrarem nas geometrias 2 e 3 o que já era expectável, visto que a geometria 2, por ser de mais menores dimensões, qualquer erro que exista, percentualmente vai ser mais significativo. Quanto à geometria 3, pelo facto da sua geometria ser muito mais complexa, permite a existência de muito mais zonas que incorretas.

Tendo estes aspetos em conta, o nível dos erros obtidos foi considerado bastante bom, e demonstra uma relação de proximidade entre os métodos numérico e experimental.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ***Conclusão***

---

### **5.1 Conclusão do trabalho**

São muitas e diversificadas as tecnologias que temos ao nosso dispor para conseguirmos obter determinada unidade elementar, neste caso obter uma força. Das tecnologias disponíveis realça-se a piezoresistividade e a piezoelectricidade. Sendo as mais usadas atualmente, qualquer melhoria feita com estes princípios se traduz, na prática, numa mais fácil produção e reintrodução de novos conceitos na mesma tecnologia. A tecnologia selecionada foi a piezoresistividade devido ao baixo custo, linearidade, acessibilidade à tecnologia e possibilidade de contextualizar o problema com as tecnologias existentes na universidade.

Escolhida a tecnologia, foram testadas diversas geometrias encontradas na bibliografia e, posteriormente, começou-se a criar outras geometrias, primeiramente com geometrias elementares, tais como quadrados, círculos e rectângulos e, numa fase posterior, mais complexas, já a cumprir as regras impostas na produção por micro maquinagem. Depois de muito trabalhar os círculos percebeu-se que existia uma relação de otimização no raio dos círculos; por um lado, quanto maior fosse o raio mais área removida mas, por outro lado, menos acentuada era a transição entre grande e pequena área. Surgiu então a solução, que passava pelos triângulos. Ainda assim, os triângulos tinham a desvantagem de ter um stress na direção y muito elevado e, para ultrapassar este obstáculo, passou-se a trapézios, que não são mais do que triângulos com um lado adicional mais curto num dos vértices.

Foram pensadas 5 configurações (Apêndice II) para disposição dos elementos sensitivos, sendo testadas e otimizadas as estruturas para cada uma destas configurações. Percebeu-se que o número de elementos finitos não era suficiente e fez-se uma análise de convergência (modal e por comparação das tensões de Von Mises). A convergência apenas foi conseguida quando se separou o sensor em estruturas elementares, possibilitando uma boa uniformidade de elementos finitos e conseguindo a convergência com um número de elementos finitos relativamente baixo. Obtiveram-se os melhores resultados (melhor sensibilidade – parâmetro escolhido para otimizar) para a configuração 3 otimizada.

Posteriormente à projeção de um sensor de força, e devido à impossibilidade de o testar, condicionantes monetárias e prazos de fabricação, surgiu a ideia de encontrar uma aplicação que fosse útil e que ao mesmo tempo comprovasse os testes até então realizados. Encontrou-se uma solução, que passou por usar a estrutura do sensor otimizado para a configuração 1 numa escala compatível com o equipamento de que se dispunha. Verificou-se não ser possível fazer o sensor à escala e, tentando obter a geometria o mais idêntica possível, foi necessário fazer algumas alterações. Denominou-se de geometria 3. Criaram-se mais três geometrias sem as limitações da micro maquinagem; uma de aço que se mostrou ineficiente para os testes, e as geometrias 1 e 2, sendo estas últimas muito idênticas, apenas sofrendo um fator escala em quase todas as dimensões, com exceção da zona central que era limitada pelas dimensões dos extensómetros.

Transformou-se assim o problema, num amplificador mecânico de stress. Por via numérica os resultados eram animadores e comprovou-se, com os testes efetuados por via experimental, que a amplificação existe. Foi ainda estudado um possível amplificador com maior grau de amplificação, apenas para mostrar o potencial do conceito. Os erros presentes entre a via experimental e a numérica atingem os 22.28 % para a geometria 2, sendo de 12.54 % para a geometria 1, e de 21.04 % para a geometria 3. Estes erros são devidos essencialmente ao facto de a produção dos amplificadores ter sido executada em CNC, necessitando de retificação manual, sendo expectáveis erros nesta gama de valores.

Os ganhos obtidos por via numérica, para o provete em causa, para as geometrias 1, 2 e 3 são, respetivamente de, 2.2109, 2.0325 e 0.6459. Como mostrado na Figura 3.44 a relação entre as dimensões do amplificador e do provete não são ajustadas, obtendo melhores prestações quando atingida a convergência (a partir de uma determinada razão entre o amplificador e o local a colocar o mesmo). Nas condições de teste o amplificador desenvolvido (Figura 3.42) pode septuplicar a sensibilidade de aplicações que recorrem ao uso de extensómetros, sendo uma alternativa económica e simples para o efeito.

O sensor micro maquinado tem uma sensibilidade de 3.5347 mV/V/MPa pelo método numérico, este método foi validado com os resultados obtidos experimentalmente. Devido às suas reduzidas dimensões a sua influência no sistema será nula e, portanto, o seu desempenho será máximo. A sua elevada sensibilidade, reduzidas dimensões e a possibilidade de ser fabricado por micro maquinagem permitirá obter novas aplicações para os sensores de força piezoresistivos.

## 5.2 Trabalhos futuros

Aos trabalhos futuros que possam dar continuidade a este trabalho, recomenda-se a fabricação do sensor micro maquinado proposto, assim como a elaboração dos testes de caracterização e aplicação prática, por exemplo num amortecedor de um veículo automóvel.

Aconselha-se ainda a verificar as restrições do processo de fabrico que podem ter alterado com a evolução tecnológica, permitindo novas geometrias e criando menos restrições; ou mesmo o estudo de outros processos de fabrico cujas limitações e regras resultem em novas geometrias.

Por fim, é recomendado, já para o caso dos amplificadores mecânicos, que estes sejam produzidos através da tecnologia de electroerosão, conseguindo-se melhores resultados e mais próximos do método numérico.

## ***Bibliografia***

---

- [1] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, Springer, 2010.
- [2] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft e N. White, *MEMS Mechanical Sensors*, Norwood: Artech House, 2004.
- [3] D. P. B. Z. Ç.-B. a. I. E. G. Gaviraj S Nadvi, "Micromachined force sensors using thin film nickel-chromium piezoresistors," pp. 1-10, 27 Abril 2012.
- [4] Tekscan, *Tekscan - FlexiForce Sensors User Manual*, South Boston, 2010.
- [5] M. O. M. M. X. J. L. a. G. M. W. X. Y. Liu, "Paper-Based Piezoresistive MEMS Force Sensors," *MEMS 2011*, pp. 133-136, 23 Janeiro 2011.
- [6] V. M. Stuhebnikov, "SOS strain gauge sensors for force and pressure transducers," 31 Janeiro 1991.
- [7] T. Kleckers, "Force Sensors for Strain Gauge and piezoelectric crystal-based mechatronic systems - a comparison," 2012.
- [8] D. Z. Z. C. Q. S. Y. G. Y. G. Qiaokang Liang, "Six-DOF micro-manipulator based on compliant parallel mechanism with integrated force sensor," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 124-134, 23 Junho 2010.
- [9] Y. Z. Q. L. e. G. Y. Weizhong Wang, "A three-axial micro-force sensor based on MEMS technology," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 33, pp. 991-999, 2010.
- [10] T. L. T. W. S. F. Manuel Mikczinski, "Development of Micro-force Sensors for Testing Applications in Micro- and Nanorobotics," *ROBOTIK 2010*, 2010.
- [11] A. T. e. M. T. A. S. Jagannathan Rajagopalan, "Highly Linear, Ultra Sensitive Bio-MEMS Force

Sensors With Large Force Measurement Range,” 2010.

- [12] H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. G. Korvink e O. Tabata, CMOS-MEMS: Advanced Micro and Nanosystems, Wiley-VCH, 2005.
- [13] “eFunda,” [Online]. Available: <http://www.efunda.com/home.cfm>. [Acedido em 16 Junho 2013].
- [14] V. T. A. Snimacu, *SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGE - test samples*, 2013.

## Apêndices

### 6.1 Apêndice I

Neste apêndice estão presentes as limitações do processo de micro maquinagem, de uma forma abreviada, da empresa “Sensor Technologies AS”.

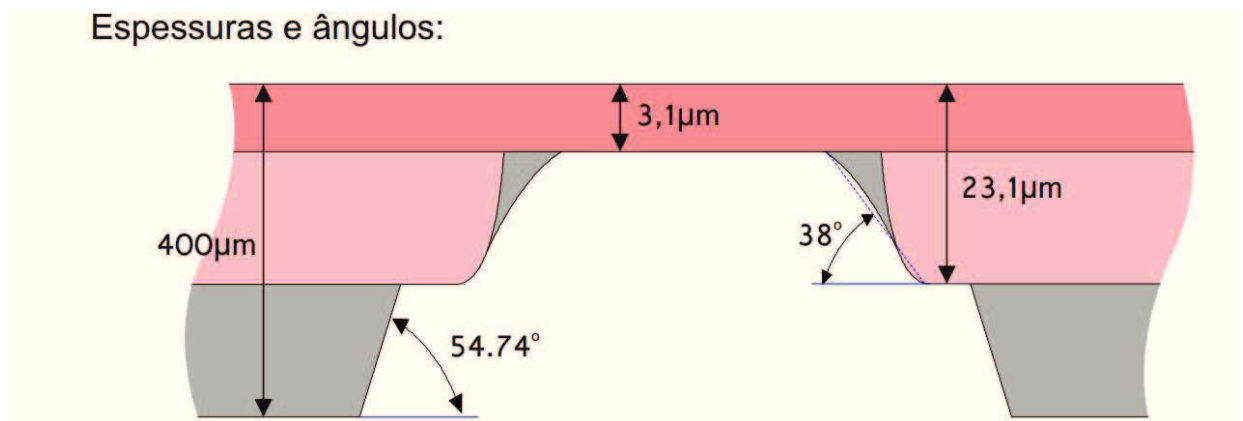


Figura I 1 – Imagem em corte de algumas limitações das várias camadas

Remoção de Silício na superfície da wafer:

- Linha: mínimo de 5 μm;
- Espaçamento: mínimo de 15 μm;
- Espaçamento com sensor: mínimo de 20 μm;
- Área máxima removida: 30 % da área total do chip.

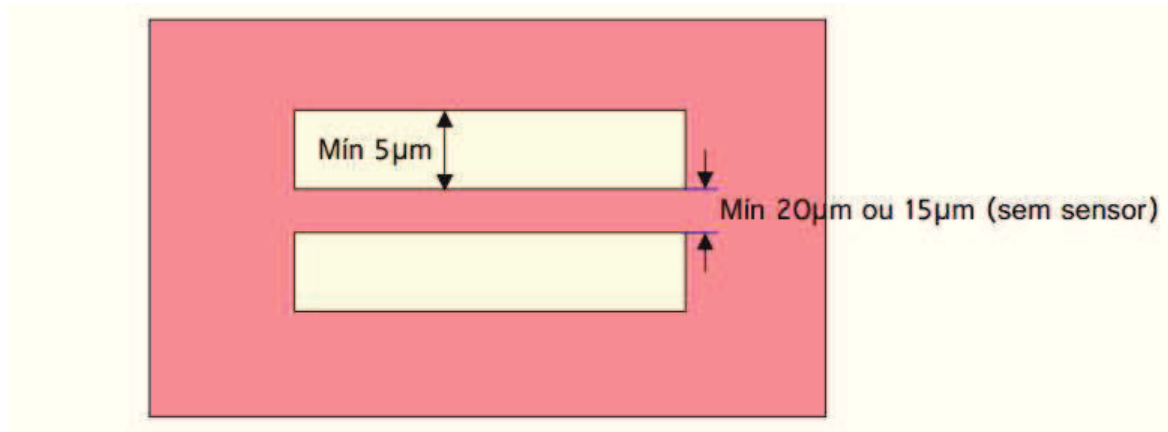


Figura I 2 – Limitações referentes à área superior

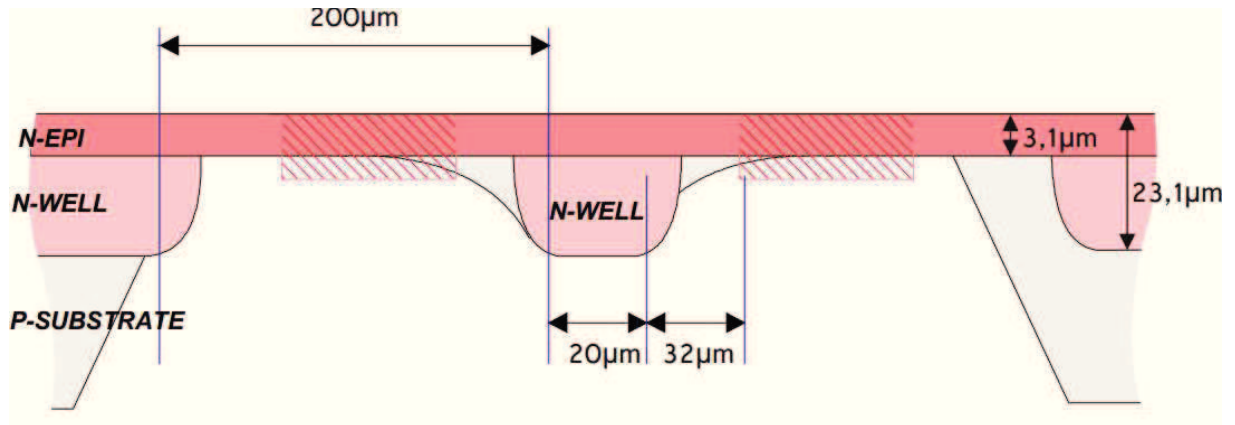


Figura I 3 – Limitações da transição entre a remoção de materiais e diferentes espessuras

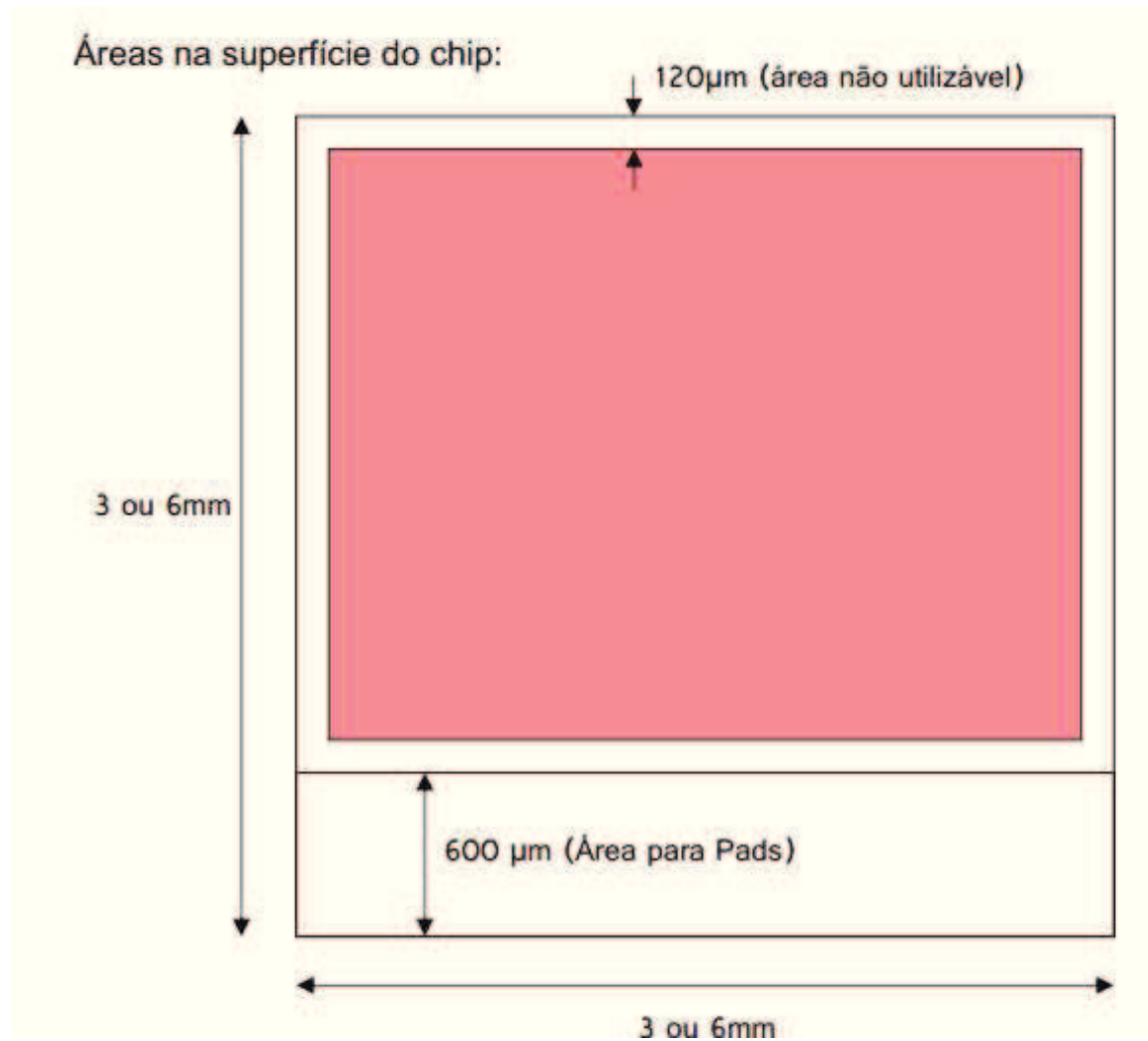


Figura I 4 – Vista superior com as limitações quanto à área a trabalhar

## 6.2 Apêndice II

Neste apêndice estão representadas as configurações de disposição dos extensômetros com as diferentes limitações.

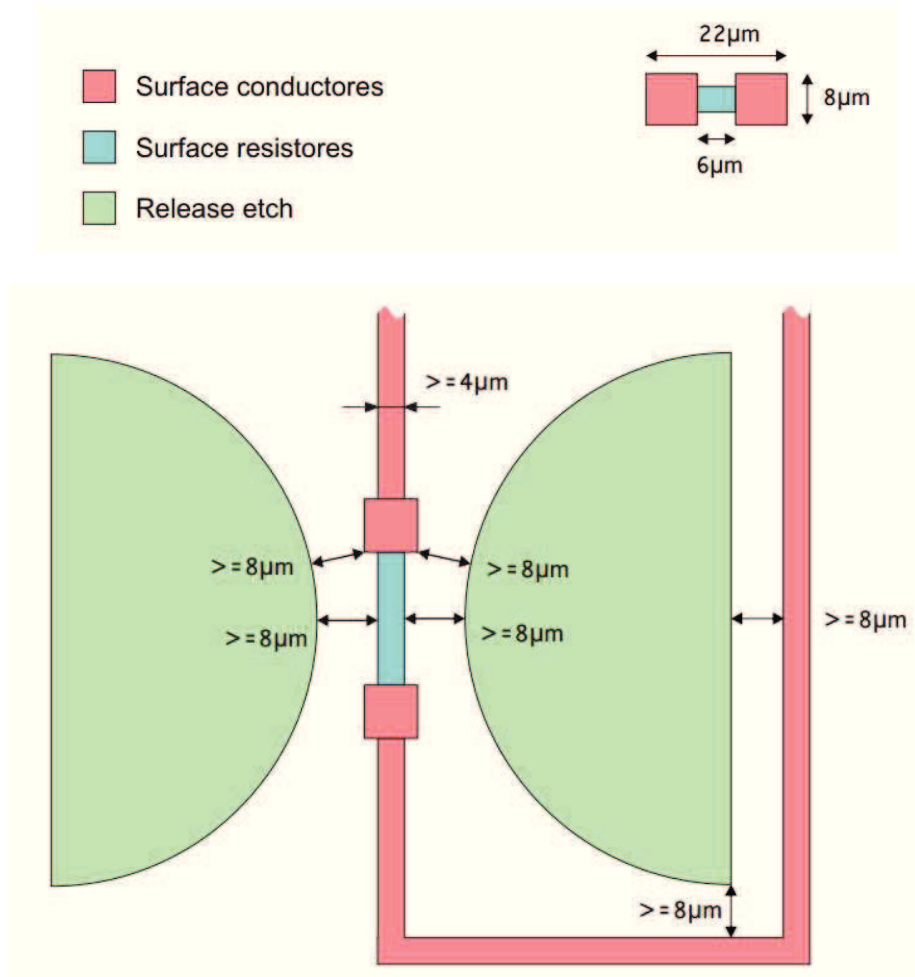


Figura II 1 – Configuração 1 – Uso de um elemento sensível na zona central

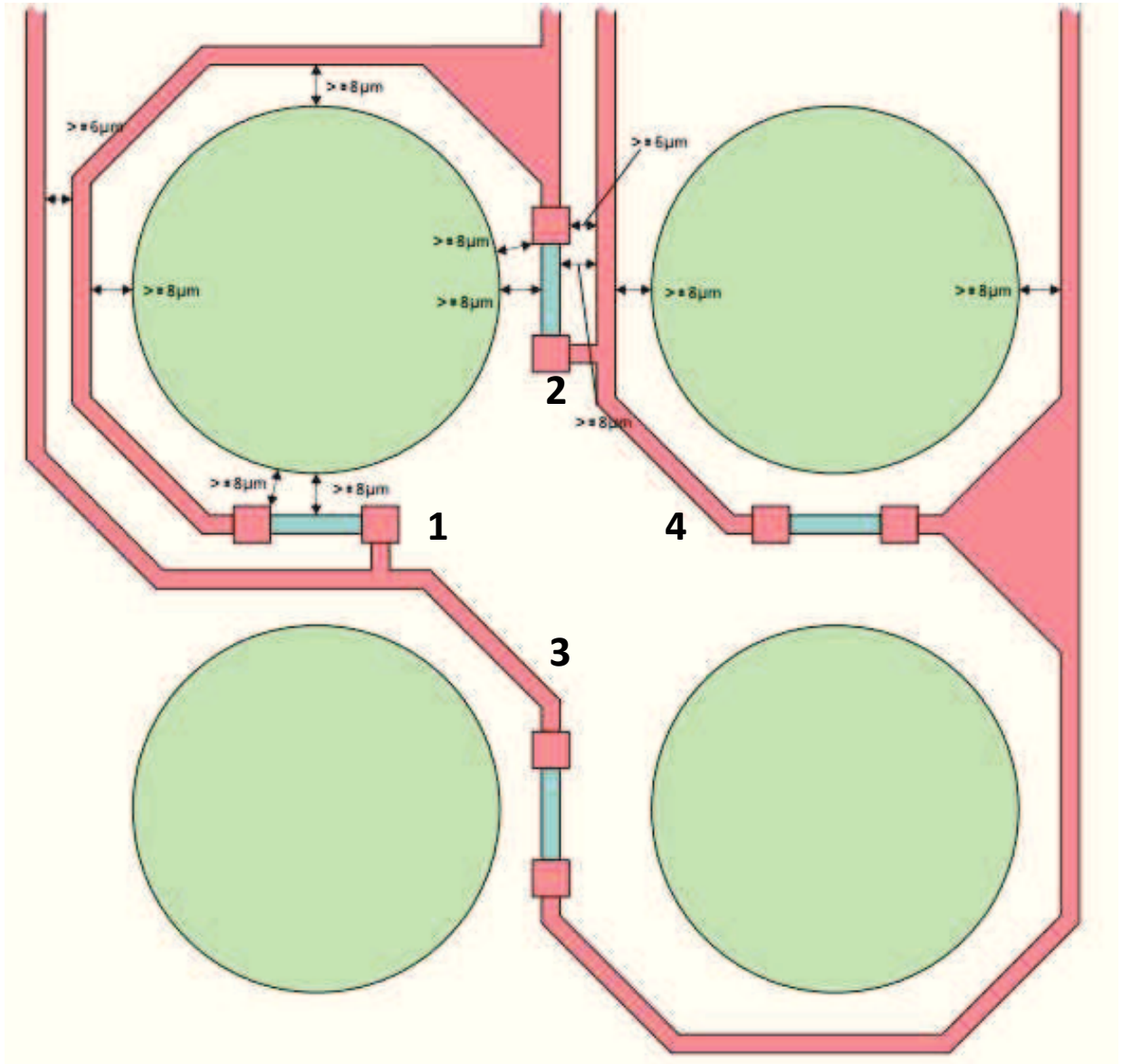


Figura II 2 – Configuração 2 – Uso de 4 elementos sensitivos em 4 zonas completamente distintas

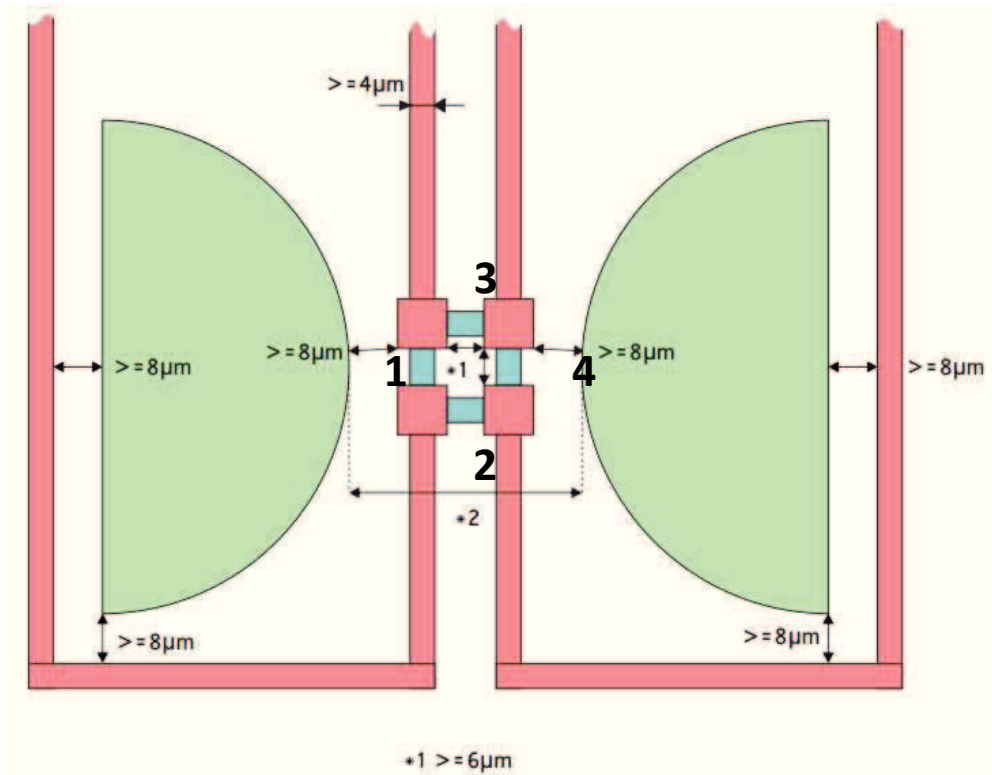


Figura II 3 – Configuração 3 – Uso de 4 elementos sensíveis num único local, estando dois à compressão e dois à tração

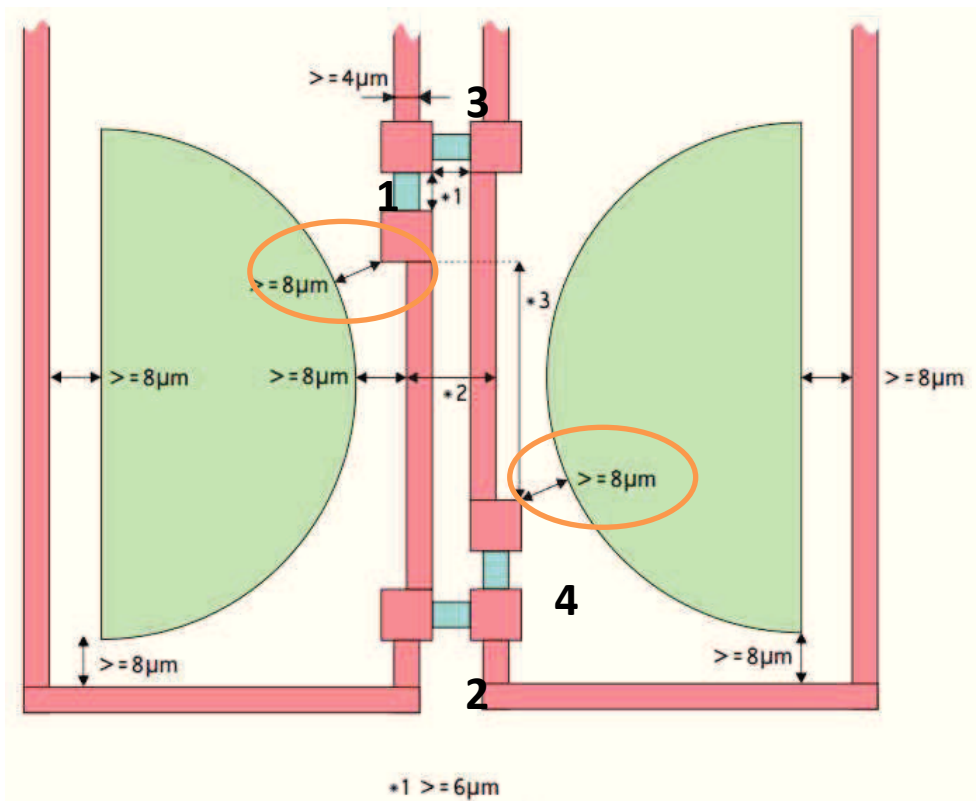


Figura II 4 – Configuração 4 – Uso de 4 elementos sensíveis distanciadamente de modo a ter uma zona central mais estreita

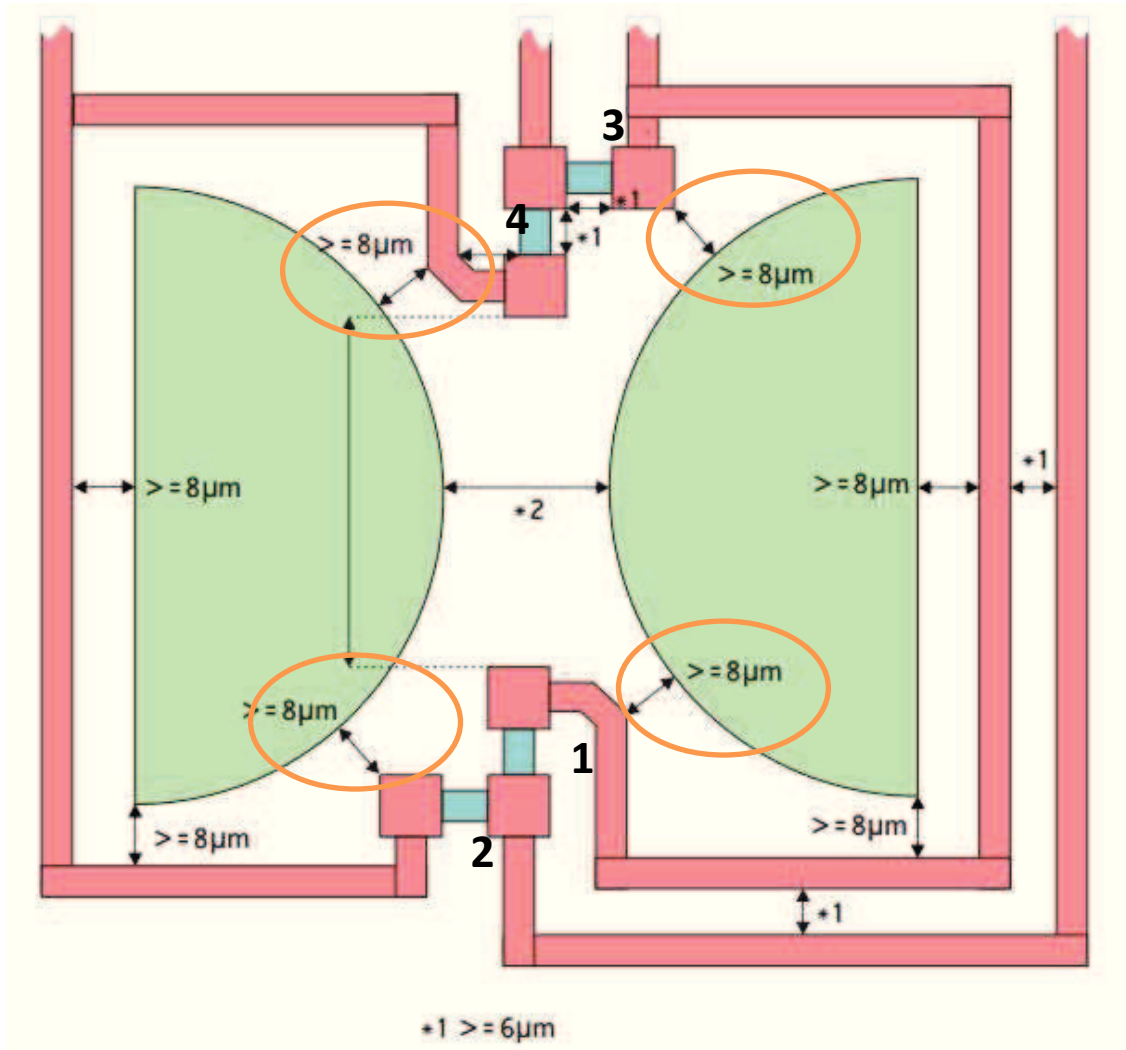


Figura II 5 – Configuração 5 – Uso de 4 elementos sensíveis distanciados 2 a 2 ainda mais afastados do que no caso anterior, tendo em vista a distância mínima entre os furos na zona central

## 6.3 Apêndice III

Neste apêndice está presente a programação por ficheiros de comando para o sensor mais sensível desenvolvido no software Ansys Multiphysics.

### 6.3.1 Ficheiro main

```
!***** MEAU *****
!***** Sensor de força *****
!***** David Caseiro *****
!***** Escola Superior de Tecnologia e Gestão *****
!***** Julho 2013 *****
!*****

! Main

finish                ! Exits from processor

/clear                ! Clears the database

/filename,Main.txt

/title, Sensor base

!*****

!*** Enters the model creation preprocessor

/prep7

!** Input files

/input,Geometry.txt

/input,MatProps.txt

/input,Meshing.txt

/input,ConstraintsLoadsFx.txt

/

/input,AnalysisStatic.txt

/

/input,Post_StaticStressFx.txt

/input,Post_StaticDisplacementFx.txt
```

```
!/input,AnalysisModal.txt
```

```
!/input,Post1Modal.txt
```

### 6.3.2 Ficheiro geometry

```
! Geometry
```

```
! Note: System of units is milimetres (mm)
```

```
!*****
```

```
!*** Dimensions
```

```
!*** Mesa
```

```
Lm = 3000E-3           ! Comprimento da mesa           9 mm
```

```
Tm = 1200E-3          ! Espessura da mesa             5 mm
```

```
!*** Base
```

```
Lb = 3000E-3           ! Length of the base           3 mm
```

```
Tnwell = 400E-3       ! Thickness of the n-well      0.4 mm
```

```
Tone = 376.9E-3       ! Thickness for removing      0.3769 mm
```

```
Ttwo = 20E-3          ! Thickness for second removing 0.02 mm
```

```
Lpad = 600E-3
```

```
Lbb = 2900E-3         ! New length of the base      2.9 mm
```

```
Lbbb = (Lbb-((2*Tone)/1.41444343))-(100E-3) ! New length of the second base
```

```
Lbbbb = (Lbbb-((2*Ttwo)/0.7812856265))
```

```
!*** Triangulos na base
```

```
h = (Lbbbb-(38E-3)-(32E-3*2))/2
```

```
b = Lbbbb-Lpad-(32E-3*2)
```

```
!*** Nova geometria
```

```
Wn = 20E-3
```

!\*\* Sensor

Ls = 6E-3 ! Length of the base

Ws = 4E-3 ! Weight of the base

!\*\* Forma a refinar

Lr = 53E-3

!\*\*\*\*\*

!\*\* Keypoints

!\*\* Mesa

K , 1, -Lm/2, Lm/2, -Tnwell

K , 2, Lm/2, Lm/2, -Tnwell

K , 3, Lm/2, -Lm/2, -Tnwell

K , 4, -Lm/2, -Lm/2, -Tnwell

!\*\* Base

K , 5, -Lbb/2+Lpad, Lbb/2, -Tnwell

K , 6, Lbb/2, Lbb/2, -Tnwell

K , 7, Lbb/2, -Lbb/2, -Tnwell

K , 8, -Lbb/2+Lpad, -Lbb/2, -Tnwell

K , 9, -Lbbb/2+Lpad, Lbbb/2, -Tnwell+Tone

K , 10, Lbbb/2, Lbbb/2, -Tnwell+Tone

K , 11, Lbbb/2, -Lbbb/2, -Tnwell+Tone

K , 12, -Lbbb/2+Lpad, -Lbbb/2, -Tnwell+Tone

!\*\* Triangulos

K , 13, (300E-3)-(b/2), h+(19E-3), 0

K , 14, (300E-3)+(b/2), h+(19E-3), 0

K , 15,  $(300E-3)-(26.5E-3)$ ,  $(19E-3)$ , 0

K , 16,  $(300E-3)+(26.5E-3)$ ,  $(19E-3)$ , 0

K , 17,  $(300E-3)-(b/2)$ ,  $-h-(19E-3)$ , 0

K , 18,  $(300E-3)+(b/2)$ ,  $-h-(19E-3)$ , 0

K , 19,  $(300E-3)-(26.5E-3)$ ,  $-(19E-3)$ , 0

K , 20,  $(300E-3)+(26.5E-3)$ ,  $-(19E-3)$ , 0

!\*\*\* Nova geometria

K , 21,  $(300E-3)-((Lbbb-Lpad)/2)-(32E-3)$ ,  $Lbbb/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 22,  $(300E-3)-(100E-3)$ ,  $Wn/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 23,  $(300E-3)-(100E-3)$ ,  $-Wn/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 24,  $(300E-3)-((Lbbb-Lpad)/2)-(32E-3)$ ,  $-Lbbb/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 25,  $(300E-3)+(100E-3)$ ,  $Wn/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 26,  $(300E-3)+((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)$ ,  $Lbbb/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 27,  $(300E-3)+((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)$ ,  $-Lbbb/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

K , 28,  $(300E-3)+(100E-3)$ ,  $-Wn/2$ ,  $-Tnwell+Tone$

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Areas

!\*\*\* Mesa

A, 1, 2, 3, 4

!\*\*\* Base

A, 5, 6, 7, 8

A, 9, 10, 11, 12

!\*\*\* Triangulos

A, 13, 14, 16, 15

A, 17, 18, 20, 19

!\*\* Nova geometria

A, 21, 22, 23, 24

A, 25, 26, 27, 28

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Volumes

!\*\* Mesa

VEXT, 1, , , , -Tm, 1, 1, 0

!\*\* Base

LOCAL, 11, 0, 300E-3, 0, 0 !changing axis

CSYS, 11

VEXT, 2, , , , Tone, ((Lbb-((2\*Tone)/1.41444343))-Lpad)/(Lbb-Lpad), (Lbb-((2\*Tone)/1.41444343))/Lbb,  
0 ! Lfm=(Lbb-(2\*Tone/(tg(54.7))))/Lbb

VEXT, 3, , , , Ttwo, (Lbbbb-Lpad)/(Lbbb-Lpad), Lbbbb/Lbbb, 0

CSYS, 0 ! back to previous axis

BLC4, -Lb/2, -Lb/2, Lb, Lb, -Tnwell ! BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH,  
HEIGHT, DEPTH

!\*\* Triangulos na base

CSYS, 11

VEXT, 4, , , , -Tnwell, 1, 1, 0

VEXT, 5, , , , -Tnwell, 1, 1, 0

!CYL4, 300E-3, rc+(10E-3), rc, , , , -Tnwell ! CYL4, XCENTER, YCENTER, RAD1, THETA1,  
RAD2, THETA2, DEPTH

!CYL4, 300E-3, -rc-(10E-3), rc, , , , -Tnwell

!\*\*\* TNova geometria

LOCAL, 12, 0, (300E-3)-((Lbbb-Lpad)/2)-(32E-3), 0, 0, 45

CSYS, 12

VEXT, 6, , , , , Ttwo, (((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3))+((20E-3)/0.7812856265))/(((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3)), (((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3))+((20E-3)/0.7812856265))/(((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3)), 0

LOCAL, 13, 0, (300E-3)+((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3), 0, 0, 45

!changing axis

CSYS, 13

VEXT, 7, , , , , Ttwo, (((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3))+((20E-3)/0.7812856265))/(((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3)), (((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3))+((20E-3)/0.7812856265))/(((Lbbb-Lpad)/2)+(32E-3)-(100E-3)), 0

!\*\*\* Forma a refinar

BLC4, -Lr/2+300E-3, -Lr/2, Lr, Lr, -Ttwo

!\*\*\* Forma a refinar

BLC4, -Lbbbb/2+(600E-3)+(32E-3), -Lbbbb/2+(32E-3), Lbbbb-(600E-3)-(64E-3), Lbbbb-(64E-3), -Tnwell

BLC4, -Lb/2, -Lb/2, (600E-3), Lm, -Tnwell

CSYS, 0

!\*\*\*\*\*

VSBV, 4, 2

VSBV, 12, 3

VADD, 2, 7, 8

VSBV, 3, 5

VSBV, 2, 6

VSBV, 3, 9, , KEEP, KEEP

VINV, 3, 9

VSBV, 2, 10, , KEEP, KEEP

VINV, 2, 10

VSBV, 3, 11, , KEEP, KEEP

VINV, 3, 11

VGLUE, 1, 2, 7

VGLUE, 5, 6, 9

VGLUE, 4, 5, 6

/EOF

### 6.3.3 Ficheiro MatProps

! Material Properties

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Define element type

ET, 1, SOLID187 ! 3-D 10-Node  
Tetrahedral

ET, 2, SOLID187 ! Structural Solid

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Define material properties of silicon

MP, DENS, 1, 2.33E-9 ! Density 2.33 g/cm<sup>3</sup> to tonne/mm<sup>3</sup>

MP, EX, 1, 169E3 ! Young's modulus 169GPa to MPa

MP, PRXY, 1, 0.3 ! Poisson's ratio

MP, DENS, 2, 2.33E-9 ! Density 2.33 g/cm<sup>3</sup> to tonne/mm<sup>3</sup>

MP, EX, 2, 169E3 ! Young's modulus 169GPa to MPa

MP, PRXY, 2, 0.3 ! Poisson's ratio

/EOF

### 6.3.4 Ficheiro Meshing

! Meshing

!\*\*\*\*\*

!\*\* Centro

VSEL, S, , , 4

VATT, 1, , 1, 0

ESIZE, 2E-3

!ESIZE, SIZE, NDIV

MSHAPE, 1, 3D

!MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)

MSHKEY, 0

!MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)

VMESH, 4

!\*\* Triangulos

VSEL, S, , , 5

VATT, 1, , 1, 0

ESIZE, 15E-3

MSHAPE, 1, 3D

!MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)

MSHKEY, 0

!MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)

VMESH, 5

VSEL, S, , , 6

VATT, 1, , 1, 0

ESIZE, 15E-3

MSHAPE, 1, 3D

!MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)

MSHKEY, 0

!MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)

VMESH, 6

!\*\* Anel

```
VSEL, S, , , 1
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE, 70E-3
MSHAPE, 1, 3D          !MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)
MSHKEY, 0              !MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)
VMESH, 1
```

!\*\* Pad

```
VSEL, S, , , 3
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE, 100E-3
MSHAPE, 1, 3D          !MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)
MSHKEY, 0              !MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)
VMESH, 3
```

!\*\* Mesa

```
VSEL, S, , , 8
VATT, 2, , 2, 0
ESIZE, 500E-3
MSHAPE, 1, 3D          !MSHAPE, KEY(0quadrados,1triangulos), Dimension(2Dou3D)
MSHKEY, 0              !MSHKEY, KEY (0free,1mapped,2mappedsenaoderfree)
VMESH, 8
```

VSEL,NONE

VSEL, ALL

/EOF

### **6.3.5 Ficheiro ConstraintsLoadsFx**

! Constraints and Loads - Fx

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Define displacement constraints on keypoints

/PREP7

ASEL, NONE

ASEL, ALL

ASEL, S, AREA, , 12

DA,ALL,ALL, 0

! nodes

ASEL, NONE

ALLSEL, ALL

SFA, 10,, PRES, -1

FINISH

/EOF

### ***6.3.6 Ficheiro AnalysisStatic***

! Analysis Static

!\*\*\*\*\*

ALLSEL,ALL

/SOLU ! Enters the solution

! processor

ANTYPE,0 ! 0 Static analysis

SOLVE ! Starts a solution

FINISH

SAVE ! Save all current database

! info

/eof

### 6.3.7 Ficheiro *Post\_StaticStressFx*

! Post Static Stress

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Enter the post processor

/POST1

/dist,,5

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Displays results as continuous contours

/title, STIMESI Force Sensor Design - Von Mises Plot

plnsol, s, eqv ! Equivalent stress

/image,save,StaticStressFx.png

!\*\*\*\*\*

path,beamlength,2,, 50 ! Defines a path

ppath, 1,, (-Ls/2)+(300E-3), (7E-3) ! Path defined by picking

ppath, 2,, (Ls/2)+(300E-3), (7E-3)

PDEF,stressx,S,x ! x-component stress

PDEF,stressy,S,y ! y-component stress

PDEF,stressz,S,z ! z-component stress

PDEF,stress,S,EQV,AVG ! average

/axlab,y,Stress (MPa)

/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)

/title,STIMESI Force Sensor Design - Stress Variation

/color,curve,2,1

/color,curve,7,2

/color,curve,12,3

/color,curve,10,4

```
plpath,stressx,stressy,stressz,stress      ! Displays path items on a graph
/image,save,PathStressFx1.png
```

```
/OUTPUT,stressFx_sensor1.txt,             ! redirects output to file
PRPATH,stressx, stressy, stressz, stress  ! prints path data
/OUTPUT
```

```
!*****
```

```
path,beamlength3,2,, 50                  ! Defines a path
ppath, 1,, (-7E-3)+(300E-3), (Ls/2)      ! Path defined by picking
ppath, 2,, (-7E-3)+(300E-3), (-Ls/2)
```

```
PDEF,stressx,S,x                          ! x-component stress
PDEF,stressy,S,y                          ! y-component stress
PDEF,stressz,S,z                          ! y-component stress
PDEF,stress,S,EQV,AVG                     ! average
```

```
/axlab,y,Stress (MPa)
```

```
/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)
```

```
/title,STIMESI Force Sensor Design - Stress Variation
```

```
/color,curve,2,1
```

```
/color,curve,7,2
```

```
/color,curve,12,3
```

```
/color,curve,10,4
```

```
plpath,stressx,stressy,stressz,stress    ! Displays path items on a graph
/image,save,PathStressFx2.png
```

```
/OUTPUT,stressFx_sensor2.txt, ! redirects output to file
```

```
PRPATH,stressx, stressy, stressz, stress ! prints path data
```

```
/OUTPUT
```

```
!*****
```

```

path,beamlength4,2,, 50                ! Defines a path
ppath, 1,, (7E-3)+(300E-3), (Ls/2)      ! Path defined by picking
ppath, 2,, (7E-3)+(300E-3), (-Ls/2)

PDEF,stressx,S,x                        ! x-component stress
PDEF,stressy,S,y                        ! y-component stress
PDEF,stressz,S,z                        ! y-component stress
PDEF,stress,S,EQV,AVG                   ! average
/axlab,y,Stress (MPa)
/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)
/title,STIMESI Force Sensor Design - Stress Variation
/color,curve,2,1
/color,curve,7,2
/color,curve,12,3
/color,curve,10,4
plpath,stressx,stressy,stressz,stress    ! Displays path items on a graph
/image,save,PathStressFx3.png

/OUTPUT,stressFx_sensor3.txt, ! redirects output to file
PRPATH,stressx, stressy, stressz, stress  ! prints path data
/OUTPUT

!*****

path,beamlength5,2,, 50                ! Defines a path
ppath, 1,, (-Ls/2)+(300E-3), (-7E-3)    ! Path defined by picking
ppath, 2,, (Ls/2)+(300E-3), (-7E-3)

PDEF,stressx,S,x                        ! x-component stress
PDEF,stressy,S,y                        ! y-component stress
PDEF,stressz,S,z                        ! y-component stress

```

```

PDEF,stress,S,EQV,AVG                ! average

/axlab,y,Stress (MPa)

/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)

/title,STIMESI Force Sensor Design - Stress Variation

/color,curve,2,1

/color,curve,7,2

/color,curve,12,3

/color,curve,10,4

plpath,stressx,stressy,stressz,stress    ! Displays path items on a graph

/image,save,PathStressFx4.png

/OUTPUT,stressFx_sensor4.txt, ! redirects output to file

PRPATH,stressx, stressy, stressz, stress    ! prints path data

/OUTPUT

!*****

path,beamlength2,2,,300 !Lb                ! Defines a path

ppath,1,,-Lb/2,0                ! Path defined by picking

ppath,2,,Lb/2,0

PDEF,stressx,S,x                ! x-component stress

PDEF,stressy,S,y                ! y-component stress

PDEF,stressz,S,z                ! y-component stress

PDEF,stress,S,EQV,AVG                ! average

/axlab,y,Stress (MPa)

/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)

/title,STIMESI Force Sensor Design - Stress Variation

/color,curve,2,1

/color,curve,7,2

/color,curve,12,3

```

```
/color,curve,10,4
plpath,stressx,stressy,stressz,stress      ! Displays path items on a graph
/image,save,PathStressFx5.png
    !/WAIT,5
    !PRPATH,stressx                        ! Prints path items along
    !path
    !PRPATH,stressy
    !PRPATH,stressz
    !PRPATH,stress
    !SAVE,stressFx,txt

/OUTPUT,stressFx,txt, ! redirects output to file
PRPATH,stressx, stressy, stressz, stress    ! prints path data
/OUTPUT

/EOF
```

### ***6.3.8 Ficheiro Post\_StaticDisplacementFx***

```
! Post Static Displacement - Fx
|*****|
|*** Enter the post processor
/POST1
/dist,,
/view,,0,-1,0
|*****|
|*** Displays results as continuous contours
/title, STIMESI Force Sensor Design - Deformation
pldisp, 0
/image,save,deformacaoFx.png
```

```

!*****
PDEF,deslocamento,U,X

/axlab,y,deslocamento (mm)
/axlab,x,Dist from base to end beam (mm)
/title,STIMESI Force Sensor Design - Deslocamento

plpath,deslocamento          ! Displays path items on a graph

/image,save,PathdeslocamentoFx.png

/EOF

```

### ***6.3.9 Ficheiro AnalysisModal***

```

! Analysis Static
!*****
ALLSEL,ALL

/SOLU          ! Enters the solution

! processor
ANTYPE,2      ! 0 Modal analysis
MODOPT, LANB, 2
SOLVE        ! Starts a solution
FINISH
SAVE         ! Save all current database
            ! info

/EOF

```

### ***6.3.10 Ficheiro Post1Modal***

! Post Static Stress

!\*\*\*\*\*

!\*\*\* Enter the post processor

/POST1

/dist,,5

SET, first

/title, 1st Mode

pldisp, 0

/image,save,firstmode.png

ANMODE, 40, 0.1, , 0

/ANFILE, save,firstmode,avi

SET, next

/title, 2st Mode

pldisp, 0

/image,save,secondmode.png

ANMODE, 40, 0.1, , 0

/ANFILE, save,secondmode,avi