

AMPLIFICADOR MECÂNICO DE DEFORMAÇÃO

MECHANICAL STRAIN AMPLIFIER

D. Caseiro¹, S. Santos², C. Ferreira^{3,4}

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria

² Departamento de Engenharia Mecânica, ESTG, CDRSP, Instituto Politécnico de Leiria

³ Departamento de Engenharia Eletrotécnica, ESTG, Instituto Politécnico de Leiria

⁴ INESC Coimbra, Rua Antero de Quental 199, 3000-033 Coimbra, Portugal



RESUMO

Este trabalho apresenta um amplificador de deformações mecânicas a instalar entre a superfície a monitorizar e um extensómetro, permitindo uma amplificação do fator de sensibilidade do extensómetro na ordem das 6 vezes. A geometria do amplificador foi projetada e otimizada através do método dos elementos finitos e verificada experimentalmente. A análise experimental consistiu na aplicação de um ciclo de cargas num provete de aço com um amplificador de deformação acoplado e, paralelamente, a extensão do provete foi medida com um extensómetro diretamente aplicado neste. Os ensaios experimentais, realizados numa máquina servohidráulica Instron, mostraram o funcionamento e aplicabilidade do amplificador mecânico proposto, verificando-se um aumento de sensibilidade da medição do extensómetro instalado. A elevada sensibilidade resultante da instalação do presente dispositivo possibilita um novo leque de aplicações pois permite explorar mais gamas de medição.

ABSTRACT

This work presents a mechanical strain amplifier to be installed between the surface to be monitored and a strain gauge, allowing the sensitivity factor of the strain gauge to be amplified by a factor of 6. The geometry of the proposed amplifier was designed and optimized using the finite element method and experimentally verified. The experimental analysis consisted on the application of a load cycle to a steel specimen with the mechanical strain amplifier coupled and, at the same time the specimen strain was also measured with a strain gauge placed directly on its surface. The experimental tests performed on an Instron servohydraulic actuator, showed the functionality and applicability of the proposed mechanical strain amplifier. The strain gauge installed on the mechanical amplifier presented a higher sensitivity than the specimen strain. The high sensitivity achieved with the proposed device enables a new range of applications since it allows exploring wider measuring ranges.

1. INTRODUÇÃO

A piezoresistividade é uma das principais tecnologias utilizadas na medição de deformações. Os dispositivos tipicamente utilizados são os extensómetros metálicos e, em alguns casos, os semicondutores. Os

extensómetros semicondutores apresentam um fator de sensibilidade elevado, mas o seu valor resistivo é fortemente dependente da temperatura [J. Fraden (2010)]. São por eleição utilizados nos sensores com chip de silício, por exemplo em sensores de pressão, onde é possível integrar eletrónica para

compensar a saída com a variação da temperatura [C. Ferreira et al.(2012)]. Por sua vez, os extensômetros metálicos apresentam um fator de sensibilidade muito inferior. No entanto, devido às vantagens que apresentam: instalação fácil, menor dependência com a temperatura e uma função de transferência bastante linear, são os elementos de referência utilizados na monitorização de deformação em dispositivos macro [S. Beeby et al. (2004)]. Neste sentido, foi desenvolvido um amplificador mecânico de deformações a instalar entre a superfície a monitorizar e o extensómetro, permitindo uma amplificação do fator de sensibilidade do extensómetro. O amplificador proposto permitirá conciliar as vantagens dos extensómetros metálicos com um aumento de sensibilidade na ordem das 6 vezes.

1.1. Introdução ao Amplificador

Um amplificador tipicamente consiste num dispositivo transdutor que apresenta uma grandeza física de saída que é função de uma grandeza física de entrada, multiplicada por um determinado ganho. A relação entre a entrada e a saída denomina-se de função de transferência. Neste artigo é desenvolvido um amplificador mecânico que amplia uma deformação de entrada numa deformação de saída, e que apresenta um ganho constante. O ganho, ou função de transferência, é função da geometria do amplificador.

2. PROJETO

Para desenvolver a geometria do amplificador recorreu-se ao software Ansys Multiphysics 14. Como ponto de partida foram testadas várias geometrias encontradas na bibliografia. Na Fig.1 encontra-se uma geometria em anel sugerida por H. Baltes *et al.*(2005). Este tipo de geometrias utiliza como principal princípio de amplificação da deformação um estrangulamento de secção, onde se concentram as tensões mecânicas. Foram também testadas geometrias que recorrem a um sistema de alavancas, exemplo na Fig.2, para amplificar a deformação numa pequena zona central.

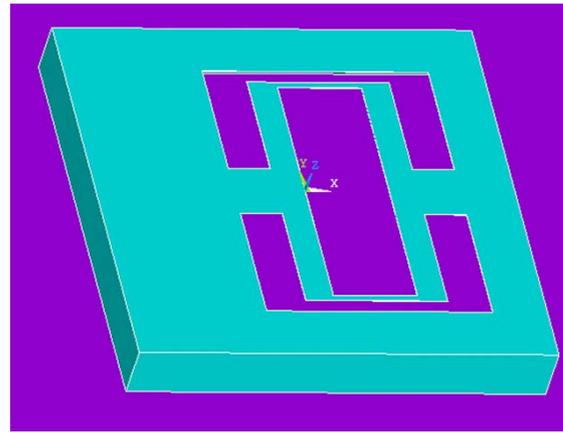


Fig. 1 – Geometria em anel.

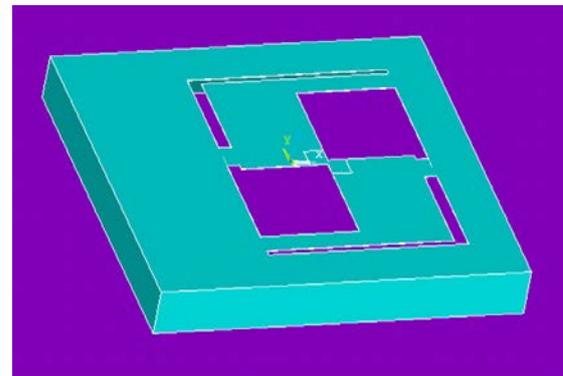


Fig. 2 – Geometria recorrendo a alavancas.

Pelos testes realizados com múltiplas geometrias com diferentes topologias e utilizando formas geométricas, tais como: quadrados, retângulos, círculos, elipses, triângulos e trapézios para o estrangulamento de secções, demonstrou-se que a geometria apresentada na Fig. 3 evidencia os melhores resultados.

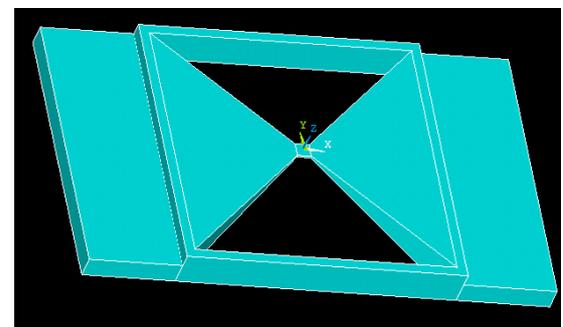


Fig. 3 – Geometria recorrendo a trapézios.

O amplificador proposto combina o estrangulamento de secção tridimensional, planos x-y e x-z, com o momento fletor dado pelo distanciamento entre a zona de

medição e a zona de aplicação da deformação (base/abas). A geometria em trapézio permite a utilização eficiente de toda a área do dispositivo amplificador na concentração de tensões mecânicas. Adicionalmente, foram introduzidas abas laterais, que para além de ajudarem o processo de fixação do amplificador, também contribuem para o aumento do fator de ampliação, por efeito através da ampliação do momento fletor na zona a colocar elemento sensível (extensómetro).

A Fig. 4 apresenta o modelo computacional utilizado para replicar os ensaios práticos efetuados, onde um amplificador com as dimensões de $60 \times 60 \times 8 \text{ mm}^3$ é colado ao provete de teste. A dimensão da zona central do amplificador, zona reservada à colagem do elemento sensível, foi numericamente otimizada para um extensómetro com as dimensões de $3 \times 3 \text{ mm}^2$.

Na Fig. 5 são mostrados os resultados numéricos obtidos. A figura compara a extensão verificada na zona central do amplificador proposto (a azul) com a extensão verificada no provete (a vermelho). Nestas condições, para o provete utilizado o amplificador mecânico proposto apresenta uma extensão que é, em média (ao longo dos 3 mm da secção central), superior à extensão no provete num fator de 2,21 vezes.

2.1. Relação entre amplificador e a superfície a monitorizar

Se o amplificador tiver dimensões e/ou características tais que modifiquem a rigidez estrutural do conjunto amplificador/superfície a monitorizar, a amplificação resultante será alterada. Este efeito não é pretendido e, portanto, deve ser garantida

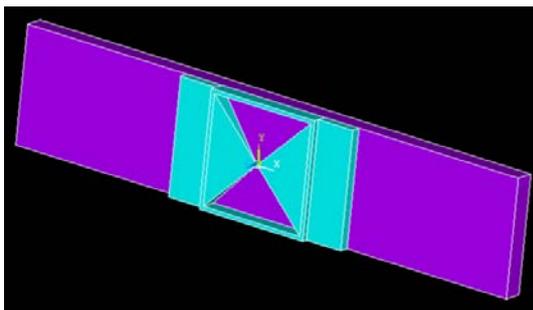


Fig. 4 – Geometria de trapézios $60 \times 60 \times 8 \text{ mm}$.

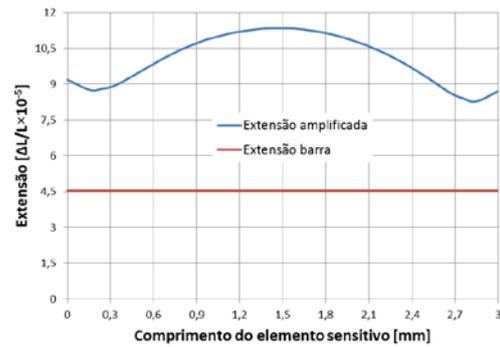


Fig. 5 – Comparação da extensão na zona central do amplificador proposto com a do provete.

uma influência mínima da estrutura do amplificador na superfície a monitorizar.

Na Fig. 6 está representada a variação da amplificação do amplificador com as dimensões da superfície a monitorizar. No caso em estudo é utilizado o amplificador de acordo com a Fig. 3 fabricado em alumínio, e um provete com dimensões iniciais de $285 \times 60 \times 10 \text{ mm}^3$ (dimensões em x, y e z, respetivamente). Na figura podemos verificar a dependência da amplificação com a espessura (a vermelho) e com a largura (a azul) do provete. Da figura é possível determinar, para o provete em estudo, as características dimensionais mínimas ($285 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$) para que exista convergência do fator de amplificação, tal verifica-se a partir de um aumento de 400% nas dimensões y e z.

A alteração do material da superfície a monitorizar, caso se traduza numa alteração da rigidez da superfície, implicará uma nova determinação das dimensões mínimas para que o fator de amplificação seja garantido. Um ponto de convergência para menores dimensões da superfície a monito-

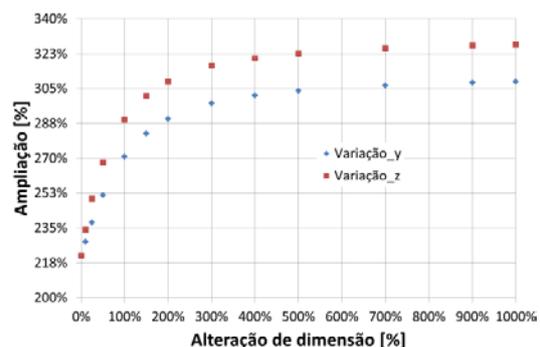


Fig. 6 – Gráfico representativo da ampliação com as alterações das características da superfície a colocar.

rizar é conseguido reduzindo as dimensões do amplificador, recorrendo, por exemplo, a tecnologias de micromaquinação combinadas com a utilização de extensómetros semicondutores (de dimensões mais reduzidas e/ou integrados num chip).

3. TESTES PRÁTICOS

Para os testes práticos foram fabricados dois protótipos do amplificador mecânico proposto, ambos em alumínio. Um com as dimensões de $60 \times 60 \times 8 \text{ mm}^3$, protótipo 1, (Fig. 7(A) e Fig. 7(B)) e um outro com as dimensões de $40 \times 40 \times 8 \text{ mm}^3$, protótipo 2, (Fig. 7(C) e Fig. 7(D)). Na Fig. 7(C) é visível o elemento sensível (extensómetro metálico) aplicado na zona de amplificação.

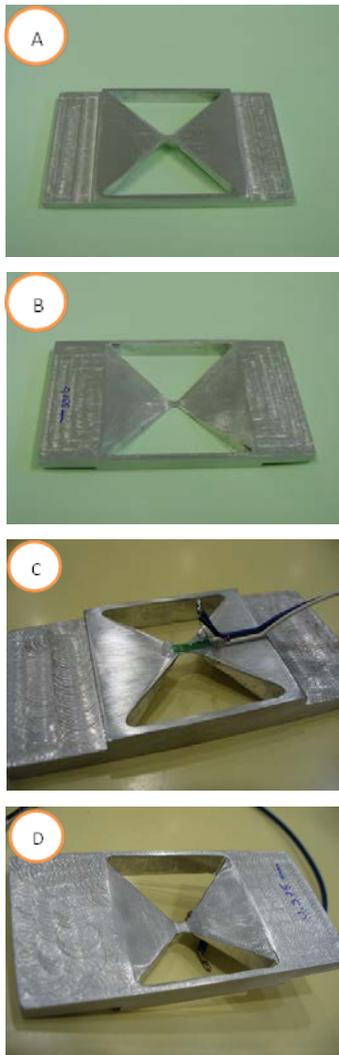


Fig. 7 – Amplificadores acabados e prontos a testar; A – vista superior do protótipo 1; B - vista inferior do protótipo 1; C - vista superior do protótipo 2; D - vista inferior do protótipo 2.

Os protótipos foram testados num provete, como exemplifica a Fig. 8. Foram aplicados dois extensómetros idênticos, um no amplificador de deformações e o outro diretamente no provete. Foram utilizados extensómetros FLA-3-23 da TML com uma resistência de 120Ω e fator $2,15 \pm 1 \%$.

Na realização dos testes foi utilizado o seguinte ciclo de carga: reta até 0 kN para garantir um estado de repouso, reta até aos 10 kN (tração), reta até aos -10 kN (compressão), reta 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.

Na Fig. 9 é visível a montagem do amplificador ao provete já na máquina de testes. Nesta figura encontra-se o protótipo 1 já com um elemento sensível, neste caso um extensómetro.

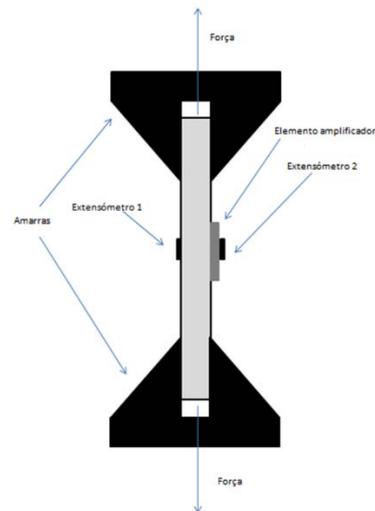


Fig. 8 – Representação esquemática da montagem experimental.

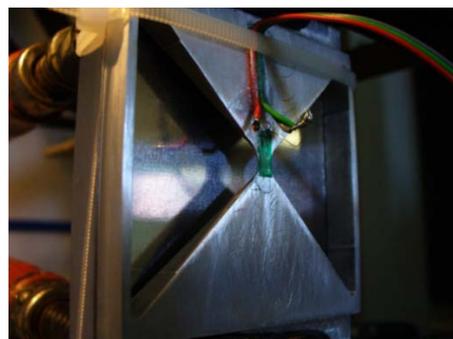


Fig. 9 – Teste experimental com o protótipo 1.

Recorreu-se ao software “Labview”, para desenvolver um programa de aquisição e processamento dos dados dos extensómetros utilizados. Na Fig. 10 está representado a interface com o utilizador desenvolvido em software “Labview”.

O hardware utilizado na montagem experimental consistiu num chassi NI cDAQ-9172 da National Instrument (agrega os componente de aquisição e implementa a comunicação de dados com o software a executar no PC), uma placa de aquisição da National Instrument dedicada para extensómetros NI 9237 e circuitos com 1/4 de uma ponte de Wheatstone NI 9944. Os dados adquiridos durante os ensaios foram depois guardados e exportados para uma folha de cálculo para posterior processamento.

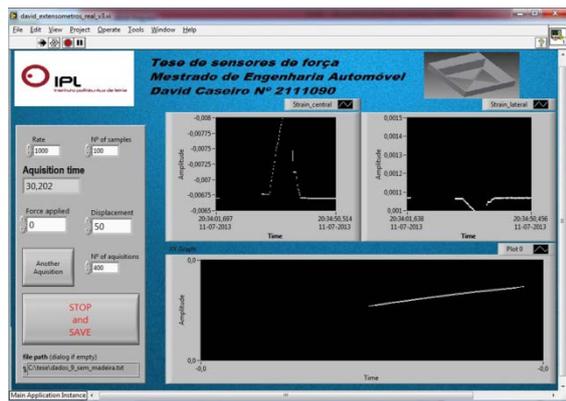


Fig. 10 – Software “Labview”.

4. RESULTADOS

Nesta secção é apresentado um resumo dos ensaios experimentais. Posteriormente são comparados com os resultados numéricos.

4.1. Resultados experimentais

A Fig. 11 apresenta a extensão medida por ambos os extensómetros num teste efetuado para o protótipo 1. Na figura é visível o ciclo de carga aplicado, assim como é notória a diferença de amplitudes entre as medições com o extensómetro 2 (colocado no protótipo proposto) em relação à medição do extensómetro 1 (colocado diretamente no provete).

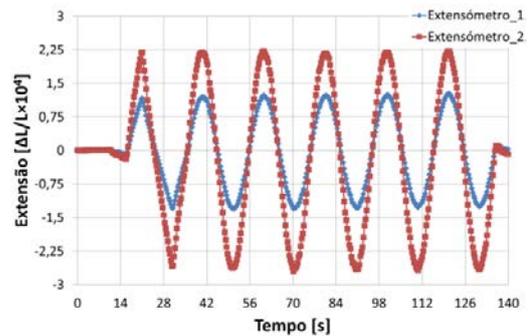


Fig. 11 – Ciclo de carga registado pelos dois extensómetros para o protótipo 1.

O fator de ampliação é obtido pela comparação dos dados, como se apresenta na Fig. 12. No eixo das abcissas temos os valores do extensómetro 1 e no eixo das ordenadas os valores do extensómetro 2. O fator de ampliação para esta geometria é de cerca de 1,93 vezes. O coeficiente de determinação (R^2) é muito próximo de 1, o que mostra uma boa linearidade.

Na Fig. 13 é visível a extensão no tempo obtido para o protótipo 2. Como pode ser visto, a amplitude do extensómetro 2 é superior à do extensómetro 1, constatando-se que existe ampliação.

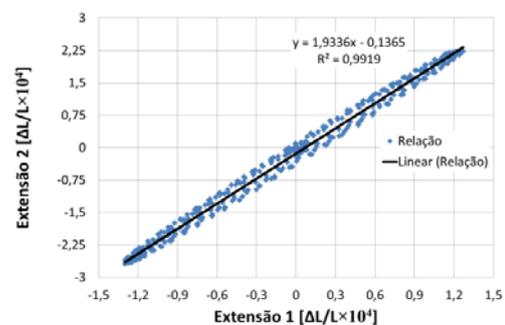


Fig. 12 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para o protótipo 1.

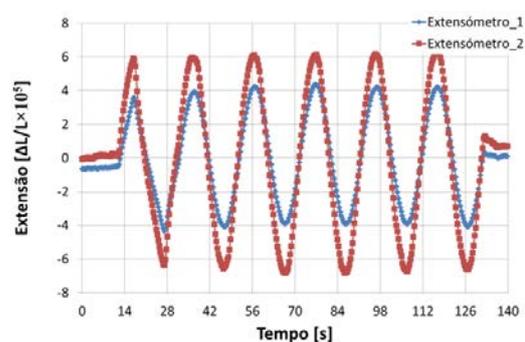


Fig. 13 – Ciclo de cargas registado pelos dois extensómetros para o protótipo 2.

Na Fig. 14 está representado o fator de ampliação. Mais uma vez, no eixo das abcissas temos os valores do extensómetro 1 e no eixo das ordenadas os valores do extensómetro 2. O fator de ampliação para esta geometria é de cerca de 1,55 vezes. O coeficiente de determinação (R^2) continua a ser muito próximo de 1, o que mostra uma boa linearidade.

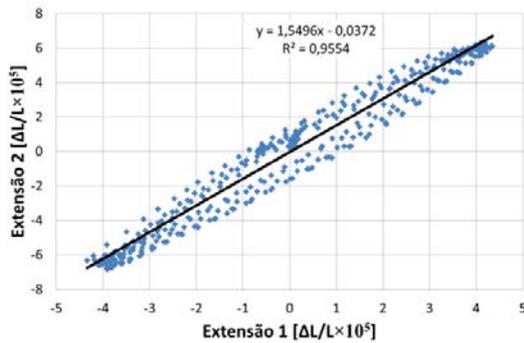


Fig. 14 – Gráfico extensómetro 1 x extensómetro 2 para o protótipo 2.

4.2. Comparação dos resultados numéricos e experimentais

Para o protótipo 1, os resultados obtidos por via numérica resultaram numa amplificação de 2,21 vezes face à inexistência de amplificador, enquanto o resultado obtido por via experimental apresentou 1,93 de amplificação. A Eq. (1) foi utilizada para determinar o desvio relativo, D_r , entre os resultados numéricos, R_N , e os resultados experimentais, R_E , obtendo-se deste modo um desvio relativo de 12,54 % em relação ao valor obtido por via numérica.

$$D_r = \frac{|R_N - R_E|}{R_N} \quad (1)$$

Para o protótipo 2, os resultados obtidos por via numérica resultaram numa amplificação de 2,03 vezes face à inexistência de amplificador, enquanto o resultado obtido por via experimental apresentou 1,55 de amplificação. Para este protótipo o desvio relativo é de 23,65 % em relação ao valor obtido por via numérica.

Os desvios obtidos são aceitáveis, considerando a precisão do processo de fabrico. Outros fatores contribuíram para estes desvios, tais como, a precisão de

circuitos elétricos e sistema de aquisição, precisão da colagem do extensómetro, propriedades dos materiais, entre outros.

Os protótipos foram fabricados com recurso a uma máquina *Computer Numerical Control* (CNC), com fresa rotativa, a qual não permitiu uma reprodução exata dos modelos numéricos, sobretudo na realização de vértices. A melhor aproximação conseguida é uma circunferência com 1.5 mm de raio. Recorreu-se também ao acabamento manual dos protótipos, para melhorar a qualidade das superfícies. Caso se utilizasse maquinação por eletroerosão, seria possível reproduzir com maior exatidão os modelos testados numericamente.

Foram consideradas as características típicas do aço e do alumínio nos ensaios numéricos: $\rho_S = 7750 \text{ Kg/m}^3$, $E_S = 200 \text{ Gpa}$, $\nu_S = 0,3$; $\rho_A = 2700 \text{ Kg/m}^3$, $E_A = 74,5 \text{ GPa}$, $\nu_A = 0,35$, respetivamente. Contudo, não foi possível apurar com exatidão as características dos materiais utilizados no provete de testes e na construção dos protótipos. Possíveis discordâncias decerto contribuíram para os desvios verificados.

Adicionalmente, problemas resultantes da colagem dos protótipos em teste (o provete foi reutilizado várias vezes e a superfície deixou de ser totalmente lisa – perfeita) podem ter limitado a transferência de deformação para o amplificador mecânico.

É de realçar ainda o facto de o maior desvio se verificar para o protótipo 2, visto que neste protótipo, por ser de menores dimensões, qualquer desvio dimensional existente, percentualmente vai ser mais influente.

Tendo em conta os aspetos acima citados, o nível dos desvios obtidos foi considerado aceitável, demonstrando a proximidade entre resultados dos métodos numérico e experimental.

5. GEOMETRIA SEM AS LIMITAÇÕES DA MAQUINAÇÃO CNC

A otimização numérica dos protótipos apresentados teve em conta as limitações do processo de fabrico e do extensómetro

utilizado. Com processos de fabrico baseados na eletroerosão são possíveis novas geometrias (exemplo na Fig. 15 e resultados na Fig. 16) que permitem fatores de amplificação na ordem dos 6. Adicionalmente, a utilização de extensómetros com dimensões inferiores a $3 \times 3 \text{ mm}^2$ permitirá exponenciar este fator.

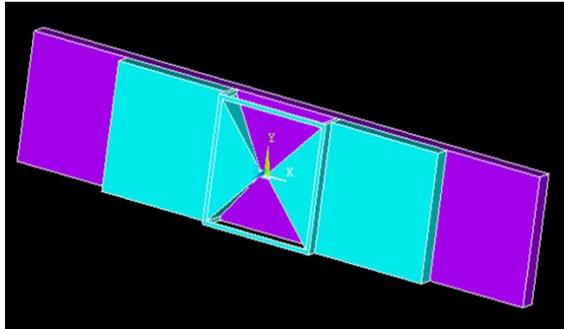


Fig. 15 – Geometria otimizada para ter mais amplificação.

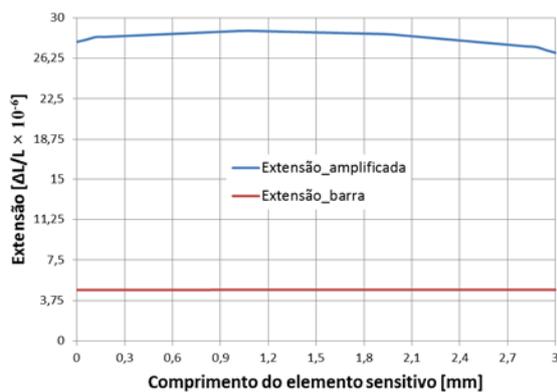


Fig. 16 – Gráficos da extensão na zona central do amplificador (azul) e no provete (vermelho) para geometria otimizada sem as limitações inerentes ao processo de maquinação CNC.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho propõe um amplificador mecânico de deformações, a instalar entre a superfície a monitorizar e o elemento sensível (ex. extensómetro), capaz de amplificar a deformação medida pelo mesmo.

O conceito foi desenvolvido por ensaios numéricos e foram otimizados dois amplificadores, protótipo 1 e protótipo 2, tendo em conta as condicionantes do processo de fabrico disponível e as dimensões do elemento sensível a utilizar. Para os protótipos propostos, 1 e 2, foram

determinados os fatores de amplificação de 2,21 e 1,97, respetivamente.

Os protótipos foram fabricados e testados experimentalmente com recurso a uma Instron 8802J4310, com um ciclo de carga predefinido. Os resultados obtidos com desvios de 12,54 % e 23,65 % em relação aos resultados numéricos, são principalmente originados pelas imperfeições geométricas no fabrico dos protótipos. Ainda assim, os resultados permitem validar os modelos numéricos e o conceito de amplificador mecânico.

O conceito proposto pode resultar em fatores de amplificação na ordem dos 10, caso as limitações do processo de fabrico sejam ultrapassadas e se utilizem elementos sensíveis com dimensões reduzidas. No limite, o conceito pode ser aplicado em sensores micromaquinados de silício, resultando num dispositivo com uma sensibilidade 1000 vezes superior à de um extensómetro metálico (sem amplificador de deformações).

No nosso entender, o conceito de amplificador de deformações é inovador, e permitirá potenciar a sensibilidade de todos os elementos sensores utilizados na medição de deformações, abrindo o caminho a sistemas sensoriais aplicados em novas situações, e na medição de novas grandezas (índirectas), até ao momento impossíveis devido à limitação por sensibilidade insuficiente.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) sobre o projeto PEst-OE/EEI/UI308/2014.

REFERÊNCIAS

- Fraden, J. 2010. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications, Springer.
- Ferreira, C. Grinde, C., Morais, R., Valente, A., Neves, C., Reis, M. 2012. Optimized design of a piezoresistive pressure sensor with measurement span of 1MPa, Procedia Engineering, 47, p. 1307-1310.

Beeby, S. Ensell, G., Kraft, M., White, N. 2004. MEMS Mechanical Sensors, Norwood: Artech House.

Baltes, H. Brand, O., Fedder, G. K., Hierold, C., Korvink, J. G., Tabata, O. 2005. CMOS-MEMS: Advanced Micro and Nanosystems, Wiley-VCH.