UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

ESTUDO PRELIMINAR DA SUPRESSÃO DE *FLUTTER* EM COMPONENTES AERONÁUTICOS

Angelique Pinto Pereira

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre
em Engenharia Aeronáutica

Orientador: Professor Doutor José Miguel Almeida da Silva

COVILHÃ
AGOSTO 2009

AGRADECIMENTOS

Enquanto autora deste trabalho, agradeço ao Prof. Doutor José Miguel Silva, meu orientador, pela possibilidade da realização desta dissertação, pela sua dedicação, atenção e apoio que contribuíram para a sua finalização. Também agradeço ao meu co-orientador, Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa, por todo o acompanhamento e disponibilidade. Um muito obrigada aos meus amigos, colegas da UBI e família que me apoiaram sempre, nas alturas boas e menos boas da minha vida, vocês sabem quem são. Rui e Nuno pelos momentos menos bons, pelas alegrias que já passámos e espero a passar mais, o meu muito obrigada, adoro-vos.

E por fim, aos meus pais, que sempre lutaram para a minha felicidade, para que pudesse concretizar os meus sonhos, para a minha educação e para ser quem sou hoje, feliz, amada e saber amar, estarão para sempre no meu coração. Obrigada!

Para os meus pais,

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos i

Índice Geral iii

Índice de Figuras v

Índice de Tabelas vi

Índice de Gráficos vii

Nomenclatura viii

Resumo ix

Abstract x

CAPÍTULO 1 - Introdução 1

1.1 Introdução 1

1.2 Objectivos e Metodologia 2

1.3 Estrutura da Dissertação 2

CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica 3

2.1 Supressão Activa e Vibrações Induzidas por *Flutter* 3

2.1.1 Fenómeno de Flutter 3

2.1.2 Supressão Aeroelástica Activa 6

2.1.3 Materiais Adaptativos 7

CAPÍTULO 3 - Análise Computacional da Supressão activa de Vibrações 13

3.1 Aplicação do Método dos Elementos Finitos 13

3.2 Aplicação do MEF ao estudo do *Flutter* 16

3.2.1 Matriz de Rigidez/Flexibilidade 18

3.2.2 Matriz de Permissividade: 18

3.2.3 Matriz das Constantes dos Piezoeléctricos 19

3.3 Descrição do Problema 19

3.3.1 Variáveis de Estudo 19

3.3.2 Descrição do Modelo Computacional 27

CAPÍTULO 4 - Análise dos Resultados 36

CAPÍTULO 5 - Conclusões e trabalhos Futuros 44

CAPÍTULO 6 - Bibliografia 46

Anexos 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Método de ensaio do voo de Flutter de Von Schlippe (2)..... 4
Figura 2 – Conceito de Flutter e interacção das forças aerodinâmicas e estruturais (5) 5
Figura 3 – Melhoria da performance da aeronave consoante os materiais (10)..... 7
Figura 4 – Esquematização de um processo de análise recorrendo ao Método de Elementos Finitos (22) 15
Figura 5 – Representação da geometria dos elementos do tipo SOLID5 e SOLID45 (23)..... 16
Figura 6 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 1..... 21
Figura 7 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 2..... 21
Figura 8 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 3..... 22
Figura 9 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 2 piezoeléctricos de orientação a 90º..... 24
Figura 10 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 4 piezoeléctricos de orientação a 90º..... 24
Figura 11 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 6 piezoeléctricos de orientação a 90º..... 25
Figura 12 – Disposição dos piezoeléctricos para o caso adicional 26
Figura 13 – Pormenor da malha realizada na placa de alumínio e no piezoeléctrico..... 30
Figura 14 – Exemplo da implementação da Voltagem num piezoeléctrico 33
Figura 15 – Posição inicial (grelha) e posição final (azul escuro) depois de aplicados os 100 Volts. 34
Figura 16 – Posição inicial (grelha) e posição final (azul escuro) depois de aplicada ±100 Volts 35
Figura 17 – Exemplo da deformação da placa à torção segundo o eixo dos zz..... 35

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características gerais dos actuadores mais utilizados em estruturas adaptativas (5) 10
Tabela 2 – Características gerais dos sensores considerados os mais utilizados em estruturas adaptativas (5) 12
Tabela 3 – Propriedades dos materiais da placa de alumínio e dos piezoeléctricos 20
Tabela 4 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx 22
Tabela 5 – Coordenadas das diferentes posições no eixo dos yy para o 1º caso 23
Tabela 6 – Coordenadas das diferentes posições no eixo dos yy para o 2º caso 23
Tabela 7 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx para o 3º caso 25
Tabela 8 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos yy para o 3º caso 25
Tabela 9 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx para o caso adicional 26
Tabela 10 – Coordenadas das diferentes posições dos piezoeléctricos segundo o eixo dos yy para o caso adicional 27
Tabela 11 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 1 dos piezoeléctricos 51
Tabela 12 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 2 dos piezoeléctricos 51
Tabela 13 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 3 dos piezoeléctricos 51
Tabela 14 – Resultados das diversas disposições para a 1ª posição para o 2º caso 51
Tabela 15 – Resultados das diversas disposições para a 2ª posição para o 2º caso 52
Tabela 16 – Resultados das várias posições para o caso de 2 pzt's orientados a 90º no 3º caso 52
Tabela 17 – Resultados das várias posições para o caso de 4 pzt's orientados a 90º no 3º caso 52
Tabela 18 – Resultados das várias posições para o caso de 6 pzt's orientados a 90º no 3º caso 52
Tabela 19 – Resultados das várias posições para o caso adicional 52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para o 1º caso 36
Gráfico 2 – Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para o 1º caso 37
Gráfico 3 – Representação gráfica dos resultados à flexão das duas melhores posições para o 2º caso. 38
Gráfico 4 – Representação gráfica dos resultados à torção das duas melhores posições para o 2º caso 39
Gráfico 5 - Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para a 3ª variável 40
Gráfico 6 - Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para a 3ª variável 40
Gráfico 9 - Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para o caso adicional. 41
Gráfico 10 - Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para a 3ª variável 42
Gráfico 11 – Gráfico das deformações de todas as posições em estudo à flexão 43
Gráfico 12 – Gráfico das deformações de todas as posições em estudo à torção 43

NOMENCLATURA

$[c^E]$, Matriz de Rigidez avaliada em condições de campo eléctrico constante

$[d]^t$, Matriz Transposta que relaciona a Deformação/Campo Eléctrico para os Piezoeléctricos

$[e]^t$, Matriz Transposta que relaciona a Tensão/Campo Eléctrico para os Piezoeléctricos

$[s^E]$, Matriz de Flexibilidade avaliada em condições de campo eléctrico constante

$[\varepsilon^S]$, Matriz Dieléctrica avaliada em condições de campo de extensões constante

$[\varepsilon^T]$, Matriz Dieléctrica avaliada em condições de campo de tensões constante

$\{D\}$, Vector de Deslocamento Eléctrico (três componentes, x, y e z)

$\{E\}$, Vector de Campo Eléctrico (três componentes, x, y e z)

$\{S\}$, Vector de Deformação (seis Componentes, x, y, z, yz, xz e xy)

$\{T\}$, Vector de Tensão (seis Componentes, x, y, z, yz, xz e xy)

$[d]$, Matriz que relaciona a Deformação/Campo Eléctrico para os Piezoeléctricos

$[e]$, Matriz que relaciona a Tensão/Campo Eléctrico para os Piezoeléctricos

T – Tensão Mecânica

S – Deformação Mecânica

D – Deslocamento Eléctrico (no ANSYS é referido como densidade do fluxo eléctrico)

E – Campo Eléctrico

RESUMO

As instabilidades aeroelásticas são um dos principais factores que restringem o envelope de voo de uma aeronave.

Um dos principais fenómenos aeroelásticos na aeronáutica é o *Flutter*, uma oscilação auto-excitada que pode levar à falha catastrófica da estrutura da aeronave.

Este trabalho consiste num estudo computacional, baseado na análise transiente do software ANSYS® de supressão activa do fenómeno de *Flutter* de um material tipicamente utilizado em estruturas aeroespaciais, designadamente uma placa de alumínio. Procurou-se avaliar, em particular, a supressão activa deste fenómeno aeroelástico através da utilização de actuadores piezoeléctricos, que quando sujeitos a uma tensão eléctrica exercem um controlo sobre as características de rigidez e o amortecimento dos componentes. Para a colocação dos piezoeléctricos foi realizado um estudo computacional paramétrico utilizando o mesmo software, de modo a definir a melhor disposição dos actuadores e desta forma se verificar a eficácia na capacidade de deformação da placa, quando sujeita a esforços de flexão e de torção.

Os resultados demonstram que a aplicação de piezoeléctricos no controlo aeroelástico constitui uma técnica valiosa para atenuar vibrações aeroelásticas, podendo assim reduzir o peso da aeronave. Deste modo pode-se estender o envelope de voo de aeronaves dotadas de estruturas adaptativas, embora com limitações inerentes à energia necessária para obtenção de deformações, principalmente quando se pretende controlar o modo de torção.

Os resultados obtidos neste trabalho constituem uma importante base de partida para outras investigações futuras que exijam a aplicação de materiais piezoeléctricos com funções de sensores e/ou actuadores em estruturas aeronáuticas com funcionalidades adaptativas, sendo esta actualmente uma área de grande actividade de investigação a nível internacional.

ABSTRACT

Aeroelastic instabilities are one of the most important factors that can restrict the flight envelope of an aircraft. Flutter is probably the most relevant aeroelastic phenomena, being characterized by a self-excited oscillation which can lead to the catastrophic failure of the aircraft structure.

This work is a computational study based on a transient analysis using ANSYS® software aiming at the active suppression of *Flutter* in a common material used in aerospace structures, namely an aluminum plaque. An effective active control of the structure through the usage of piezoelectric actuators was evaluated, since these actuators allow to control the stiffness and damping characteristics of the structure through the proper application of an electric field. A computational parametric study was performed using the same software in order to determine the best placement of the actuators and thus verify both the effectiveness and efficiency of deformation of the plaque under bending and torsion loading conditions.

The results show that piezoelectric actuactors are a valuable tool to minimize aeroelastic phenomena and reduce structural vibrations, allowing a considerable weight saving of the aircraft structure. As a consequence, the flight envelope of an aircraft with an adaptive structure capability can be further extended when compared with conventional aircrafts, although this may imply considerable energy requirements to an effective control of certain types of deformations.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico de sistemas adaptativos e inteligentes pretende-se executar uma concepção de sistemas aeronáuticos mais leves e, consequentemente, tornar as aeronaves mais rápidas e com envelopes de voo menos restritivos. As vibrações induzidas por fenómenos aeroelásticos podem tornar-se um problema, e nestes casos a supressão activa é um dos métodos que pode ser utilizado para a resolução dos problemas estruturais, destacando-se a supressão activa de vibrações e atenuação de ruídos.

Na última década, os materiais piezoeléctricos têm tido uma atenção muito considerável neste sentido, pois através de inúmeros estudos pode-se concluir que estes são uma solução efectiva para atenuação de vibrações aeroelásticas. Um grande número destes trabalhos tem um carácter computacional com recurso ao Método dos Elementos Finitos, uma técnica bastante utilizada na engenharia devido à sua enorme flexibilidade e celeridade na obtenção de resultados face a diversas condições de carregamento.

Na aeronáutica, os estudos incidentes sobre os problemas aeroelásticos são muito importantes, pois as melhorias daí decorrentes poder-se-á construir estruturas mais leves e mais resistentes ao fenómeno de *Flutter*. Por ser tão difícil de prever e evitar, este é o fenómeno aeroelástico mais estudado, de modo a que se possa alargar o envelope de voo em estruturas já existentes. Algumas aplicações actuais de actuadores piezoeléctricos em estruturas aeronáuticas têm demonstrado, desde já, algumas vantagens evidentes na resolução de alguns problemas que afectam as aeronaves e os seus componentes, tais como:

- A supressão de fenómenos aeroelásticos em asas fixas e móveis que contenham supressão activa;
- Redução de ruído no interior e exterior da aeronave, sem um aumento significativo no seu peso;
- Redução da frequência das inspecções e operações de manutenção devido à minimização das vibrações induzidas em voo.

1.2 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

O objectivo do presente trabalho é o estudo computacional das características da supressão activa induzidas pelo fenómeno de *Flutter*, tendo sido desenvolvido um modelo computacional com recurso ao programa ANSYS®. Foram, ainda, implementados algoritmos de pós-processamento para avaliar a viabilidade de uso e a qualidade das suas técnicas.

Com a realização de vários testes para diferentes posições dos piezoeléctricos, foi possível determinar qual a melhor posição destes actuadores numa perspectiva de melhor eficácia no que diz respeito à deformação da placa de alumínio.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para além deste capítulo introdutório, o presente documento é composto também por um capítulo referente à revisão bibliográfica sobre o fenómeno de *Flutter*, assim como algumas generalidades sobre o Método dos Elementos Finitos, o envolvimento do controlo aeroelástico activo com actuadores piezoeléctricos e uma breve referência a outros materiais que poderão ser utilizados para esta aplicação ou semelhante.

O capítulo 3 descreve a aplicação do Método dos Elementos Finitos ao caso particular do problema de minimização do *Flutter*, assim com a descrição do modelo computacional desenvolvido.

Por último apresentam-se conclusões, comentários finais e sugestões para trabalhos futuros. São, ainda, apresentados em anexo alguns gráficos, tabelas e outros dados complementares do trabalho de índole informativa.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUPRESSÃO ACTIVA E VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR *FLUTTER*

O Flutter é o problema mais importante no que diz respeito ao estudo da aeroelasticidade no ramo da engenharia aeronáutica, e pode ser definido, em termos gerais, como uma instabilidade dinâmica de uma superfície sustentadora resultante da interacção da própria estrutura com o escoamento em torno desta.

2.1.1 Fenómeno de Flutter

A ocorrência deste fenómeno tem sido a causa de muitos desastres aéreos desde que começaram as experiências de voos. Em 1930 ainda eram poucos os especialistas que entendiam este movimento vibratório, motivo pelo qual os pilotos tinham de considerar a aviação como um desporto arriscado (1).

Um dos primeiros acidentes registados ocorreu em 1916, envolvendo um Handley Page O/400, um bombardeiro biplano onde se verificou um mecanismo de *Flutter* associado ao acoplamento da fuselagem no modo de torção com o movimento assimétrico do leme de profundidade. Os lemes de profundidade deste avião eram accionados independentemente, e a solução passou por interligar estas superfícies de comando com um tubo de torque (2).

Quase duas décadas mais tarde, em 1935, foi realizado na Alemanha, por Von Schlippe, aquele que foi considerado o primeiro voo propositadamente com o intuito de estudar o fenómeno de *Flutter*, num voo onde se circulou à velocidade máxima para que fosse possível observar a estabilidade da estrutura. Desta forma, conseguiram excitar a estrutura rotativa utilizando um desequilíbrio no peso, medindo assim a resposta da amplitude e, em seguida, a gravação da resposta da amplitude em função da velocidade. A resposta forçada da amplitude iria aumentar rapidamente à medida que a aeronave se aproximou da sua velocidade de *Flutter*.

Foi assim que se pôde estimar a *velocidade Flutter* tendo como base dados obtidos em voo, conforme ilustrado na Figura 1.

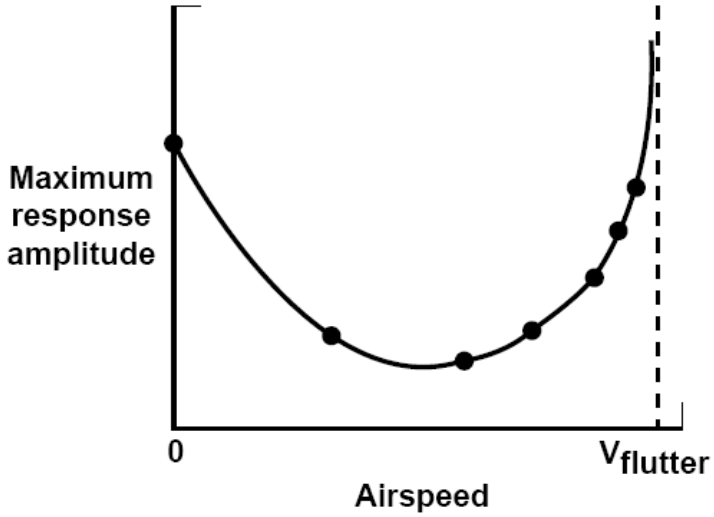


Figura 1 – Método de ensaio do voo de Flutter de Von Schlippe (2)

Em meados dos anos 70, foram desenvolvidas técnicas de supressão activa de *Flutter* com o intuito de superar a carência de técnicas passivas e para que fosse possível voar a uma velocidade superior sem risco de falha estrutural.

Após este período, com a viabilidade de novos motores e a tentativa de bater recordes de velocidade, o *Flutter* começou a ser reconhecido como um dos obstáculos para a engenharia, principalmente na sua análise e prevenção. Algumas das soluções apresentadas para o problema são aumentar a massa, a rigidez ou o amortecimento estrutural. Nem sempre era possível aumentar ou diminuir as frequências naturais, ou aumentar o amortecimento, pois isso acarretava um aumento significativo do peso da aeronave.

Através de modelos experimentais e analíticos, conseguiu-se calcular a velocidade de voo para a qual acontece o *Flutter*, e assim verificar-se que a frequência das oscilações é uma característica muito afectada pela distribuição da massa da estrutura e da sua rigidez. Com o aumento de velocidades que começaram a passar a velocidade do som, foi verificado que o fenómeno *Flutter* era mais provável em velocidades supersónicas, pois o aparecimento de uma onda de choque em cima de uma asa promovia um movimento instável e oscilatório (3).

Segundo Wright (4) o *Flutter* é uma condição onde os componentes de uma aeronave, como por exemplo a asa, evidenciam oscilações de sustentação própria (perturbação) para uma certa velocidade, que se denomina como velocidade crítica de *Flutter*. Para as velocidades inferiores a esta velocidade crítica, a vibração dinâmica estrutural inicial é amortecida, enquanto para velocidades superiores o movimento da estrutura está sujeito a forças elásticas, inerciais e aerodinâmicas que influenciam este movimento, conforme ilustrado

na Figura 2. A nova posição da estrutura, bem como o seu movimento, alteram o carregamento, podendo levar à ruptura total induzida por mecanismos de fadiga(5).

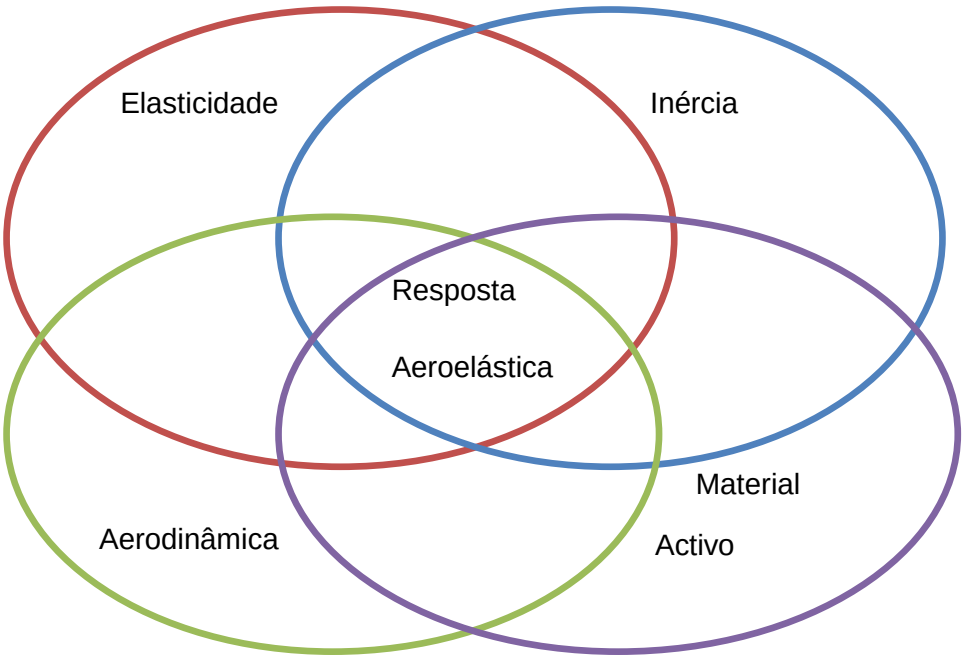


Figura 2 – Conceito de Flutter e interacção das forças aerodinâmicas e estruturais (5)

Este fenómeno não ocorre sempre ao mesmo tempo em todos os envelopes de voo, variando consoante o tipo de asa (tendo em conta a sua forma, composição estrutural, etc) e também consoante a velocidade de projecto da aeronave.

Todavia, para que ocorra o *Flutter*, é necessário que os componentes estruturais estejam dotados de alguns graus de liberdade, nomeadamente perante esforços de flexão e de torção (6).

Para contornar este fenómeno, tem-se limitado o envelope de voo de cada aeronave de modo a que se possam excluir as regiões em que o *Flutter* pode ser crítico. Outra via possível passa pelo aumento da rigidez estrutural da aeronave, embora esta possibilidade acarrete um aumento indesejável de peso.

O fenómeno de *Flutter* é um tema muito extenso para análise, tendo vindo a ser investigado ao longo de décadas. Essa análise tem-se feito de várias formas: analiticamente – recorrendo a fórmulas e matrizes; computacionalmente – o método usado neste trabalho; e experimentalmente – realizando testes e ensaios, que serve geralmente de validação dos dois métodos anteriores. No caso do presente trabalho, optou-se por recorrer ao Método dos Elementos Finitos por ser aquele que tem vindo a apresentar melhores resultados no âmbito de inúmeras investigações desenvolvidas por outros autores, já que permite a diversidade de

condições de fronteira sem que seja necessário descobrir uma função aproximada mais satisfatória (7).

2.1.2 Supressão Aeroelástica Activa

Devido aos problemas que o fenómeno de *Flutter* acarreta, foi necessário evoluir, fazendo mudanças nas aeronaves, de modo a que a estabilidade destas aumentasse.

As melhores respostas dadas para melhorar a estabilidade da estrutura das aeronaves foram o aumento de rigidez e compensação por massas (os chamados métodos passivos), que, embora continuem a ser aplicadas, há muito que deixaram de ser as mais eficientes, e hoje em dia crê-se que a melhor resposta é obtida na presença de sistemas activos (os métodos activos), entre os quais podemos salientar a supressão aeroelástica (6). Esta é uma tecnologia que permite a melhoria da qualidade de voo e, também, minimizar os estragos da fadiga causada pela vibração, levando que as aeronaves consigam funcionar para além da barreira do *Flutter* (8).

Foi nos laboratórios da NASA, no início da década de 70, que se realizaram as primeiras experiências para se desenvolver a supressão aeroelástica (2). A aeronave em questão tinha uma asa em delta com actuadores no bordo de fuga e no bordo de ataque (6), e foi neste modelo que começou a aparecer o interesse em colocar actuadores para controlarem os movimentos oscilatórios verificados num flap. Desde então, muitos dos estudos realizados sobre supressão activa têm sido efectuados com actuadores nas superfícies de controlo.

Os testes preliminares evidenciaram alguns problemas ao nível da instrumentação inadequada, métodos de excitação e determinação de técnicas de estabilidade. Ao longo das últimas décadas, têm sido realizadas melhorias consideráveis para as técnicas dos ensaios de *Flutter*, ao nível da instrumentação e da análise de dados das respostas.

É devido a esses estudos e testes que a supressão aeroelástica tem sofrido algumas alterações no seu modo de actuação. Uma das principais consistiu no embebimento dos actuadores na própria estrutura, permitindo, assim, um controlo mais directo e efectivo na mesma. Num desses estudos (2) foi desenvolvido um sistema de montagem flexível para testar o *Flutter* num túnel de vento com asas rígidas. A supressão activa de regimes de controlo foi testada experimentalmente com actuadores, e assim foi possível proceder a uma análise modal e à posterior determinação dos modos de deformação. Ou seja, os testes em túnel de vento passaram a ser uma importante ferramenta para caracterizar o fenómeno de *Flutter*, e desta forma determinar a velocidade crítica *Flutter* e a sua frequência (9).

De acordo com Moniz, (6), têm sido feitos vários estudos analíticos e computacionais para determinar a praticabilidade da aplicação de actuadores piezoeléctricos para suprimir ou controlar vibração estrutural. No entanto, a análise num contexto experimental tem sido muito limitada. É necessário um conhecimento exacto dos modos elásticos causados pela supressão activa de *Flutter*, que podem levar a uma constante modificação das suas características, o que faz com que o *Flutter* aconteça a velocidades cada vez mais elevadas.

2.1.3 Materiais Adaptativos

Com o avançar dos tempos, foram-se desenvolvendo novos materiais com reflexos evidentes na fiabilidade estrutural das aeronaves e no seu nível de desempenho. A Figura 3 ilustra esta tendência evolutiva durante o último século, sendo notório o enorme potencial evolutivo inerente ao aparecimento de materiais adaptativos durante as últimas décadas. Isto é, realizam funções próprias visando sempre um acréscimo do desempenho do sistema. Trata-se de um tipo de materiais adaptativos, ou seja, que se adaptam conforme necessário, podendo deformar-se se preciso. Este tipo de materiais dividem-se em dois grandes grupos: actuadores e sensores. Em ambos os casos, são produzidos com materiais especiais que possuem características próprias, como por exemplo sensibilidade a pressões e temperaturas, deformações, alteração de forma perante a aplicação de campos eléctricos, etc.

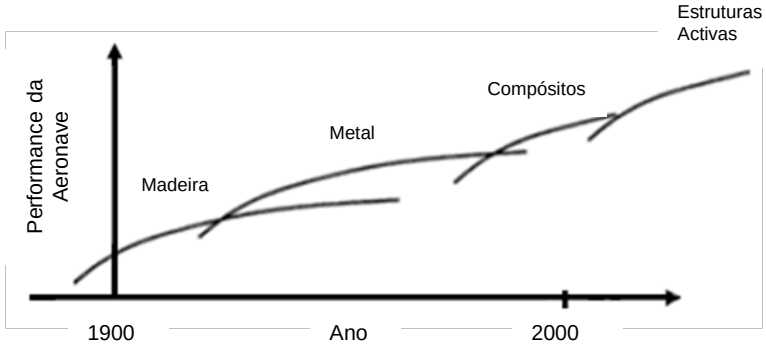


Figura 3 – Melhoria da performance da aeronave consoante os materiais (10)

A utilização de sensores e actuadores no âmbito de estruturas adaptativas confere-lhes um enorme potencial de aplicações, tais como, na supressão activa de ruído, na atenuação activa de vibração, no controlo adaptativo de forma e na monitorização da integridade estrutural.

Na supressão activa de ruído, estes materiais são aplicados para se tentar reduzir sons, particularmente aqueles associados à operação das aeronaves (motores, por exemplo). Como isto acontece? Para se diminuir o ruído existente, vai-se provocar um outro ruído, uma onda de som que seja contrária (em oposição de fase) à que se quer reduzir. Desta forma acontece o chamado contra-balanço, funcionando assim com base no princípio de interferência destrutiva.

A atenuação activa de vibração é bastante importante visto que todos os sons produzem alguma forma de vibração. Tenta-se assim aplicar actuadores na tentativa de absorver essas vibrações de uma forma mais eficaz. Se antigamente se usavam abafadores e molas isolantes para esse efeito, com o desenvolver da tecnologia surgem os chamados shunts de ressonância, que dissipam a energia que provoca a vibração, e também os actuadores piezocerâmicos, de especial interesse para este trabalho.

No controlo adaptativo de forma usam-se actuadores que podem ser piezoeléctricos, bimórficos ou piezoeléctricos empilhados, de modo a que se consigam corrigir deformações de superfícies, fazer com que haja uma melhoria no desempenho das aeronaves e de superfícies hidrodinâmicas, mas também para melhorar a precisão de pontaria de sistemas de óptica/laser, antenas, etc.

Recorrendo à monitorização da integridade estrutural consegue-se obter a informação em tempo real sobre o verdadeiro estado de uma estrutura, sabendo-se sempre se esta se encontra em boa ou má condição. Isto veio aumentar a segurança no sector da aviação, pois desta forma existe informação correcta e em tempo útil sobre se uma aeronave necessita sair do serviço para realização de manutenção, ou se pode continuar em operação. Esta monitorização reduziu imenso os custos desnecessários nesta área.

Passaremos, agora, a fazer uma breve descrição de cada um destes grupos (sensores e actuadores), realçando a sua importância no contexto de estruturas aeronáuticas.

2.1.3 – a) Actuadores

O processo de actuação pode ser definido como uma libertação controlada de energia, ou seja, converte uma reserva de energia numa dada acção (5). Os materiais com funcionalidades actuadoras podem ser organizados tendo em conta a sua área de aplicação, nomeadamente:

- Campo eléctrico

- Energia Térmica
- Energia Magnética
- Extensão Mecânica

São várias as características pelo qual um actuador é avaliado, desde a força e quantidade do deslocamento ocorrido, o tempo de resposta, a sua precisão, massa e custo, passando pela tendência que possuem de preservar as suas propriedades, mesmo quando já não se encontram sob a influência do estímulo que as gerou.

Alguns exemplos de actuadores são as Ligas de Memória de Forma (ou Shape Memory Alloy: SMA), os Materiais Magnetoestritivos e também Materiais Piezoeléctricos.

As Ligas de Memória de Forma (SMA) são ligas que têm a habilidade de retornarem à sua forma ou tamanho original mediante um procedimento térmico, sendo assim resistentes a altas temperaturas. Outra propriedade que possuem é a sua resistência à corrosão. São muito usadas nas asas das aeronaves que tenham como objectivo a alteração da sua morfologia aerodinâmica (5). A liga mais comum é o Nitinol – uma liga de Níquel-Titânio, uma vez que permite a obtenção de maiores deslocamentos mesmo que gerando pouca força.

Os Materiais Magnetoestritivos conseguem transformar energia magnética em energia mecânica, e vice-versa (11). Têm a particularidade de poder modificar as suas dimensões sempre que sujeitos a um campo magnético, resultando daí o seu nome. Isto é, se forem magnetizados ocorre uma deformação, e da mesma maneira também são deformados face à acção de uma força externa. É por isso que este tipo de materiais conseguem maiores alongamentos do que outros alternativos. Um exemplo de material magnetoestritivo é o Terfenol-D, considerado por muitos o mais conhecido, mas também existem ligas de Níquel, Ferro e Cobalto (5) (11).

Os Materiais Piezoeléctricos podem ser estimulados por duas vias: mediante a aplicação de um campo eléctrico (que originará uma deformação) ou através de uma deformação mecânica (que originará um campo eléctrico) (12). Esta dupla funcionalidade explica a cada vez maior vulgarização deste tipo de actuadores quando se procura estudar o movimento, força, pressão, vibração ou extensões de materiais. Esta característica influenciou, também, a escolha deste tipo de material para o presente trabalho.

Os materiais piezoeléctricos podem ser constituídos à base de polímeros, compósitos polímero/cerâmicos ou então cerâmicos – os piezocerâmicos (PZT) e os

piezopolimeros (PVDF). Os piezocerâmicos são aqueles que apresentam a maior capacidade de gerar força, sendo os que operam numa maior gama de frequências.

Na Tabela 1 apresentam-se características gerais dos actuadores considerados como sendo os mais utilizados em estruturas adaptativas

	NITINOL	**TERFENOL-D**	**PZT-BM500**
Energia	Calor	Campo Magnético	Campo Eléctrico
Histerese	Muita	Pouca	Pouca
Banda de Operação	Pequena	Moderada	Alta
Precisão	Pouca	Muita	Muita
Tempo de Resposta	Lento	Rápido	Muito Rápido
Uso de Potência	Bom	Moderado	Moderado
Maturidade	Novo	Novo	Estabelecido

Tabela 1 – Características gerais dos actuadores mais utilizados em estruturas adaptativas (5)

2.1.3 – b) Sensores

Quando existe uma variação no campo de energia (electromagnético) no material onde o sensor está posicionado, podem ocorrer algumas alterações nas suas características. Ou seja, quando a estrutura sofre uma vibração, são os sensores que vão indicar o valor da tensão mecânica daí resultante. A resposta de um sensor poderá ser:

- Mecânica
- Eléctrica
- Óptica
- Magnética
- Térmica
- Química

A resposta mais desejada para aplicações adaptativas é a eléctrica, pois poderá ser facilmente monitorizada e analisada por um sistema de controlo.

Também podem ser avaliados quanto à sua sensibilidade. O seu desempenho depende de:

- Tamanho da amostra;
- Banda de funcionamento;
- Repetibilidade e precisão;
- Peso e Custo.

Alguns exemplos de sensores são as Fibras Ópticas e os Sensores Piezoeléctricos.

A Fibra Óptica é um filamento de vidro com a capacidade de transmitir luz, que se propaga graças à diferença de índice de refracção entre o núcleo e o revestimento, ocorrendo a reflexão total. Ela, enquanto sensor, vai detectar um sinal que acontece quando se altera um parâmetro específico ou geral no ambiente.

É considerada um excelente sensor, e costuma ser usada como tal pelas suas vantagens: trata-se de um material leve e flexível, que pode ser usado em qualquer lugar, transmitindo informação a alta velocidade mesmo para longas distâncias, electricamente isolada e imune a interferências electromagnéticas.

Os Sensores Piezoeléctricos são os mais indicados para um estudo dinâmico pois, as suas cargas eléctricas geradas a partir de deformações mecânicas irão dissipar-se ao longo do tempo. A sua corrente eléctrica dependerá da capacitância, resistividade e carga. A sua alta rigidez assegurará uma frequência de ressonância alta levando, assim, a um impacto mínimo na estrutura. Os transdutores piezoeléctricos irão inverter a energia mecânica recebida em energia eléctrica.

Os sensores piezoeléctricos cerâmicos são utilizados geralmente para a monitorização de deformações. A diferença de potencial eléctrico resultante será proporcional ao coeficiente de voltagem, à carga aplicada e à espessura da cerâmica utilizada. Assim, quanto maior for a espessura do piezoeléctrico, maior será a sua sensibilidade.

Na Tabela 2 apresentam-se características gerais dos sensores considerados como sendo os mais utilizados em estruturas adaptativas.

	FIBRAS ÓPTICAS	**PZT**
Sensibilidade	Moderado	Moderado
Banda de Frequência	Alta	Moderada
Resolução	Alta	Moderada
Intervalo de Tempo	Alto	Alto

Tabela 2 – Características gerais dos sensores considerados os mais utilizados em estruturas adaptativas (5)

Deste modo, podemos concluir que os actuadores piezoeléctricos são aqueles que se adaptam a um funcionamento a temperaturas mais elevadas, necessitando da aplicação de pequenas ou médias potências de excitação. Porém, por serem materiais muito finos e minuciosos, estes são difíceis de fabricar e de manusear, sendo, contudo, de fácil incorporação nas estruturas onde irão actuar assumindo-se como bons candidatos para a utilização em estruturas adaptativas (13).

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE COMPUTACIONAL DA SUPRESSÃO ACTIVA DE VIBRAÇÕES

3.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) trata-se de um método computacional que é utilizado em alternativa aos normais métodos analíticos para a análise de diversos problemas de engenharia. Este calcula com elevada precisão as grandezas físicas desejadas em geometrias mais complexas, assim como as suas variações ao longo de toda a estrutura e/ou componente (14) (15). Com este método, veio-se simplificar a análise estrutural, visto antes ser feita analiticamente resolvendo equações matemáticas complexas, que para além de serem muito morosas, também podem levar à ocorrência de erros de análise de difícil detecção. Portanto, o MEF assume actualmente um papel de destaque face a outras abordagens no contexto da maioria dos problemas de análise estrutural no domínio aeronáutico (15).

Pode-se dizer que foi no início do século XX que se começou a caminhar em direcção daquilo que viria mais tarde a ser comummente conhecido como o Método de Elementos Finitos. Na década de 20, Richard Courant (1888-1972) menciona algumas vezes nos seus livros um método, a quem ninguém pareceu dar importância. Quando, 20 anos mais tarde, em 1943, Courant publica um estudo sobre o problema de torção de Saint-Venant, primeira aplicação do método que tinha referido anteriormente como método numérico, continua a não haver reacção por parte da comunidade Matemática e das Engenharias(16) (17). Na década de 60, cientistas na área das Engenharias desenvolveram esse método com base na publicação daquele autor, desta vez recorrendo a computadores. Foi nessa altura que, para que se pudesse realizar esta análise num computador, foram desenvolvidos softwares que implementam o método, como por exemplo o ANSYS®, software utilizado no desenvolvimento deste trabalho (16), embora existam muitos outros com funcionalidades semelhantes.

Com a implementação deste método pôde-se analisar novas estruturas mais complexas, que até aí estavam limitadas devido à inexistência de recursos computacionais (18). Até aos dias de hoje, assistiu-se a um verdadeiro boom no que respeita à utilização do MEF.

Tratando-se de um método matemático de modelação por aproximação, a sua aplicação é de enorme conveniência na área que o desenvolveu – a Engenharia (17). Assim, pode-se levar a cabo vários estudos em diferentes domínios, como o comportamento de

fluidos, transferências de calor ou tensões e deformações actuantes em diferentes estruturas (19), como é o caso deste trabalho.

Em que consiste o MEF?

Este método baseia-se na resolução numérica de sistemas com equações diferenciais parciais, de onde se obtém soluções aproximadas àquelas que se pretendem obter. Ao realizar o estudo de um problema recorrendo ao MEF o seu processo é dividido em três passos distintos: pré-processamento, solução e pós-processamento (15).

Neste trabalho, no pré-processamento procedeu-se ao estudo dos elementos de acordo com o ANSYS® e as suas propriedades. Nesta etapa, tenta-se dividir o sistema físico em *elementos*, que funcionam como pequenas partições adjacentes (20) (21) tendo em atenção que esses elementos irão ter a mesma forma ou forma semelhante à do actuador em questão. Também é necessário ter em conta a disposição dos elementos, que terá a forma semelhante ao modelo em estudo, que poderá ser bidimensional ou tridimensional. Ao conjunto de todos estes elementos chama-se malha: quantos mais elementos se tiver em estudo, mais refinada será a malha, levando assim a uma maior discretização do modelo e, consequentemente, a uma solução mais rigorosa. Aos pontos que comummente poderiam ser designados por vértices desses elementos (visto estes tomarem formas geométricas), dá-se o nome de *nós*, embora também possam existir nós noutros pontos dos elementos.

É nesses pontos, nos nós, que se irão obter as variáveis em estudo, neste caso os deslocamentos e tensões que levaram à deformação dos piezoeléctricos e da placa de alumínio.

Na segunda fase, a solução, procede-se ao cálculo das deformações e tensões elementares, tendo em conta os deslocamentos dos nós, ou seja, os deslocamentos nodais.

Já na última parte do processo, o pós-processamento, vão-se obter os dados de saída (*outputs*), neste caso os deslocamentos nodais e a deformação da estrutura total.

Pode-se projectar uma análise de um problema recorrendo ao Método dos Elementos Finitos de acordo com o esquema que se apresenta na Figura 4.

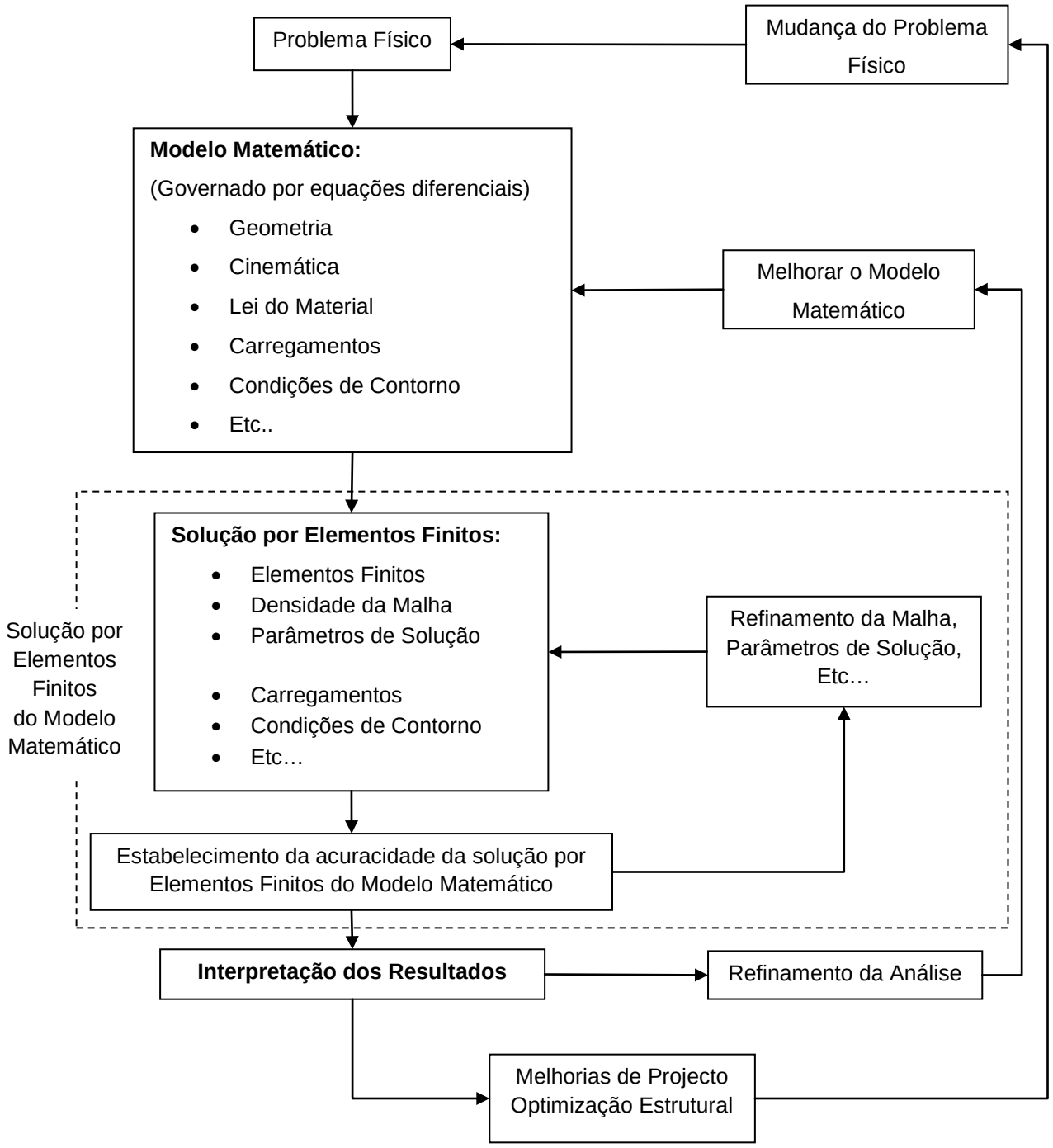


Figura 4 – Esquematização de um processo de análise recorrendo ao Método de Elementos Finitos (22)

3.2 APLICAÇÃO DO MEF AO ESTUDO DO *FLUTTER*

O programa computacional de análise ANSYS® é um software que permite solucionar problemas recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, com uma aplicação muito vasta nas áreas da Engenharia, tais como Electromagnetismo, Dinâmica dos Fluidos e também em estudos sobre Aeroelasticidade, o caso estudado neste trabalho (22).

Este programa gera malhas constituídas pelos elementos, como referido no ponto anterior, fazendo a distinção das três etapas do processamento da análise.

Para a realização do modelo computacional desenvolvido neste trabalho, usou-se o elemento SOLID45 para a placa de alumínio, e também o elemento SOLID5 para os actuadores piezoeléctricos, estando ambos representados na Figura 5.

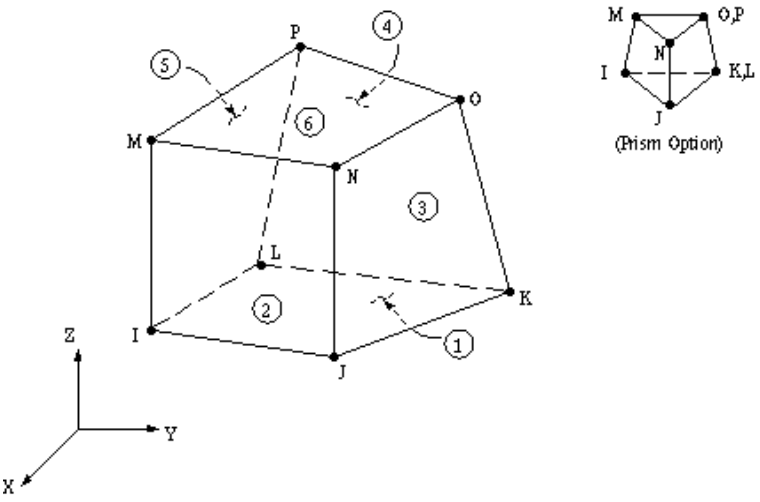


Figura 5 – Representação da geometria dos elementos do tipo SOLID5 e SOLID45 (23)

Os elementos do tipo SOLID5 e SOLID45 são tridimensionais, podendo-se dizer que têm a estrutura semelhante à de um cubo contendo 8 nós, sendo usados para modelar vários tipos de estruturas (15).

Para a determinação das variáveis principais de definição dos actuadores piezoeléctricos em ambiente ANSYS®, Imaoka (24) criou uma tabela e, respectivamente, um conjunto de fórmulas que permitem simplificar a utilização das mesmas. Nestas fórmulas são inseridos os valores fornecidos pelo fornecedor do material piezoeléctrico, no caso a *Sensortech*, relativamente ao piezoeléctrico em estudo, com referência BM500.

Posteriormente, são obtidos os valores necessários para implementar a macro realizada. Estes dados são, por exemplo, a matriz de rigidez, constantes dieléctricas e constantes dos piezoeléctricos.

Normalmente, os dados do material fornecidos pelo fabricante têm o seguinte formato:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad \textit{Eq. 1}$$

$$\{D\} = [d]^t\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad \textit{Eq. 2}$$

No entanto, o formato de entrada exigido pelo ANSYS® é um pouco diferente:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad \textit{Eq. 3}$$

$$\{D\} = [e]^t\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\} \quad \textit{Eq. 4}$$

Assim, e seguindo as recomendações do manual do ANSYS®, torna-se necessário converter os dados do fabricante (representados sob a forma das *Eq. 1* e *2*) para o formato de entrada exigido pelo software, ou seja, é necessário explicitar a *Eq. 1* em função da tensão mecânica (em vez da extensão). Assim, as equações anteriores assumem a seguinte forma:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad \textit{Eq. 5}$$

$$[s^E]\{T\} = \{S\} - [d]\{E\} \quad \textit{Eq. 6}$$

$$\{T\} = [s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\} \quad \textit{Eq. 7}$$

Uma vez que a *Eq. 2* relaciona o vector de deslocamento eléctrico (densidade de fluxo eléctrico) com a extensão (em vez da tensão), então também será necessário proceder a alguma manipulação algébrica, levando às seguintes expressões:

$$\{D\} = [d]^t\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad \textit{Eq. 8}$$

$$\{D\} = [d]^t([s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\}) + [\varepsilon^T]\{E\} \quad \textit{Eq. 9}$$

$$\{D\} = [d]^t[s^E]^{-1}\{S\} + ([\varepsilon^T] - [d]^t[s^E]^{-1}[d])\{E\} \quad \textit{Eq. 10}$$

Comparando as *Eq. 7* e *10* com as *Eq. 3* e *4,* obtém-se a relação dos valores necessários entre o fabricante (dados fornecidos) com o ANSYS® (valores necessários):

$$[c^E] = [s^E]^{-1} \quad \textit{Eq. 11}$$

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t[s^E]^{-1}[d] \qquad \textit{Eq. 12}$$

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t[s^E]^{-1} \qquad \textit{Eq. 13}$$

Estas equações constituirão a base das diferentes análises que foram desenvolvidas no decurso deste trabalho.

3.2.1 Matriz de Rigidez/Flexibilidade

Para introduzir os dados da tensão/deformação do elemento piezoeléctrico, assumiremos uma polarização em três eixos, ajustando os dados do fabricante aos exigidos pelo software ANSYS® da seguinte forma:

$$[s^E] = [c^E]^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{66}^E & 0 & 0 \\ & & & & s_{44}^E & 0 \\ & & & & & s_{44}^E \end{bmatrix} \qquad \textit{Eq. 14}$$

Neste caso escolheu-se fazer $[c^E] = [s^E]^{-1}$ para colocar os valores na macro realizada.

3.2.2 Matriz de Permissividade:

O ANSYS® necessita da definição de uma matriz de permissividade em condições de extensões constantes. Como visto anteriormente através da *Eq. 12*, podemos determinar as constantes dieléctricas em condições de extensões constantes através da seguinte relação:

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t[s^E]^{-1}[d] \qquad \textit{Eq. 15}$$

A matriz de permissividade é definida como tendo somente termos na diagonal:

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ & & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \qquad \textit{Eq. 16}$$

Esta matriz é necessária consoante os valores fornecidos pelo fabricante do material, muitas vezes fornecidos em condições de tensão constante. Por isso, torna-se necessário fazer esta adaptação através da matriz de permissividade

3.2.3 Matriz das Constantes dos Piezoeléctricos

Normalmente, os dados do fabricante do material piezoeléctrico são fornecidos sob a forma de uma matriz [d] que relaciona as extensões mecânicas com o campo eléctrico. No entanto, o ANSYS® precisa de considerar uma matriz [e] que relaciona as tensões mecânicas com o campo eléctrico. A relação entre estas matrizes pode ser feita partindo da *Eq. 13*. Assumindo uma polarização em três eixos e simetria nas direcções polarizadas ($d_{32} = d_{31}$ e $d_{24} = d_{15}$), então:

$$[d]^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \textit{Eq. 17}$$

e

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \textit{Eq. 18}$$

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.3.1 Variáveis de Estudo

Para o presente estudo, foi considerada uma placa de alumínio com as seguintes medidas: 500x150x0,41 mm. Como já referido, os piezoeléctricos escolhidos para a realização dos testes são os Sensortech *BM500*, com dimensões 28x20x*0,254 mm.* Algumas das suas características são descritas na Tabela 3, segundo os valores fornecidos pelo fornecedor e também considerando os valores calculados pelas equações descritas no capítulo anterior.

Propriedades	**BM 500**	**Alumínio**
Módulo de Young	-	$68,8x10^9$ (N/m^2)
Densidade	7650 (Kg/m^3)	2800 (Kg/m^3)
Coef. de Poisson	-	0,33
Matriz de Rigidez Elástica		
C_{11}	$1,1799x10^{11}$ (N/m^2)	
C_{12}	$6,9206x10^{10}$ (N/m^2)	
C_{13}	$6,8966x10^{10}$ (N/m^2)	
C_{33}	$1,0345x10^{11}$ (N/m^2)	
C_{44}	$2,4390x10^{10}$ (N/m^2)	
Matriz de Deformação do Pzt		
E_{31}	-7,5862 (C/m^2)	
E_{33}	13,6207 (C/m^2)	
E_{15}	13 (C/m^2)	
Matriz Dieléctrica		
ε_{11}	791 (F/mm)	
ε_{22}	791 (F/mm)	
ε_{33}	889 (F/mm)	

Tabela 3 – Propriedades dos materiais da placa de alumínio e dos piezoeléctricos

O objectivo deste estudo consiste em localizar a melhor posição para a colocação dos piezoeléctricos de modo a que a placa sofra uma deformação eficaz à flexão e torção. Assim, consideraram-se as seguintes variáveis de estudo: 1) a posição dos actuadores ao longo do eixo transversal da placa; 2) a posição dos actuadores segundo o eixo longitudinal da placa; 3) a orientação dos actuadores segundo as duas direcções principais de referência (0º e 90º).

1ª Variável de estudo:

A primeira posição de localização dos actuadores será, para todos os casos analisados, junto às extremidades da placa de alumínio, tal como representado na Figura 6.

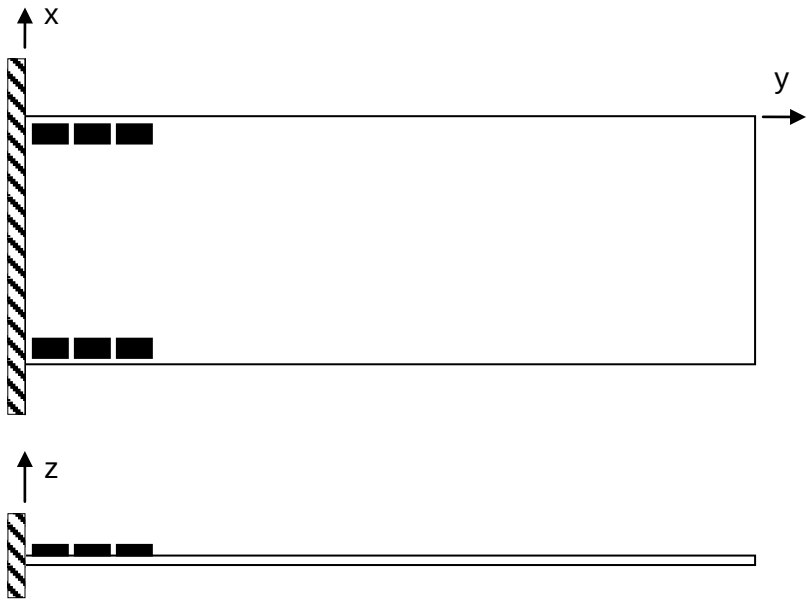


Figura 6 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 1

A segunda localização dos piezoeléctricos será a ¼ e a ¾ em relação à largura da placa, como representado na Figura 7.

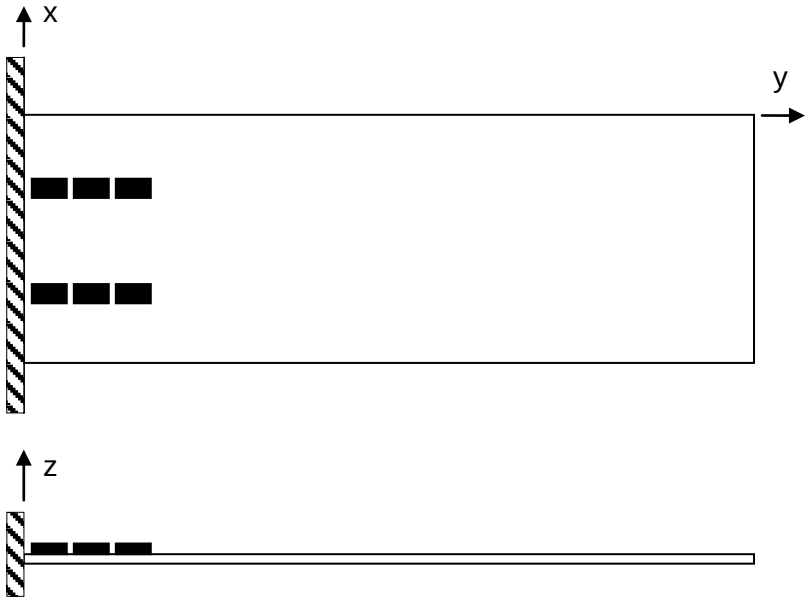


Figura 7 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 2

A terceira localização considerada situa-se junto ao eixo de torção, como representado na Figura 8.

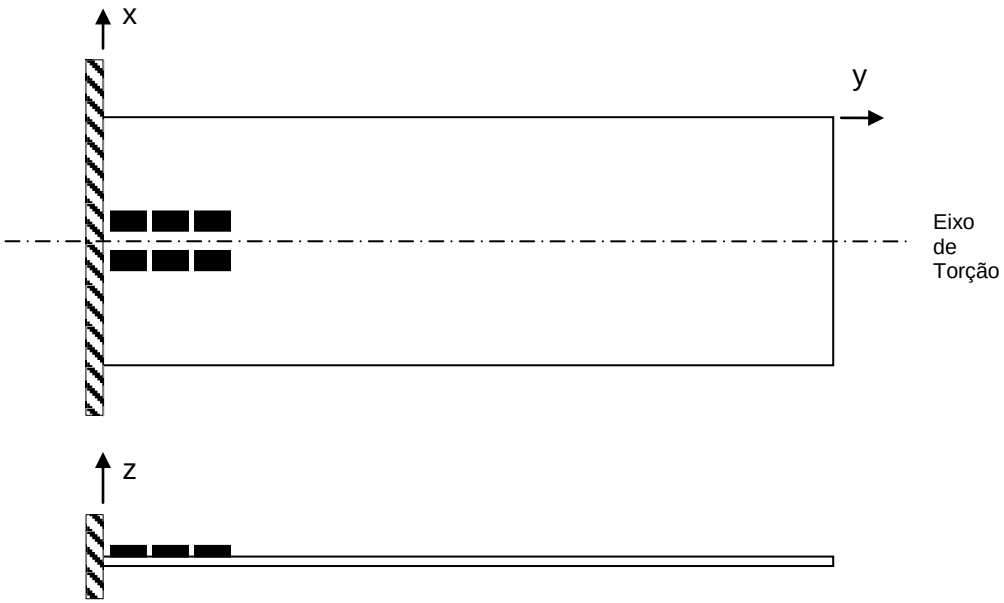


Figura 8 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição 3

A Tabela 4 mostra as coordenadas consideradas para as diferentes posições dos piezoeléctricos em relação ao eixo dos *xx* e considerando os dois conjuntos de actuadores em relação ao eixo longitudinal da placa (i.e., acima e abaixo deste eixo, como visível nas figuras anteriores).

Coordenadas / Localização	Inicial	Final
1	0,005	0,025
	0,125	0,145
2	0,028	0,048
	0,103	0,123
3	0,040	0,060
	0,090	0,110

Tabela 4 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx

Após definidas as 3 posições, avaliou-se o efeito da variação da localização do conjunto de piezoeléctricos localizado mais à direita ao longo do eixo longitudinal da placa, tendo-se efectuado 10 divisões equidistantes. Todas as posições deste conjunto de actuadores estão assinaladas na Tabela 5. No entanto, a posição dos restantes piezoeléctricos foi mantida constante, considerando uma distância fixa de 1 cm em relação à aresta esquerda da placa.

Posição / Coord.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Inicial	0,081	0,120	0,158	0,197	0,235	0,274	0,313	0,351	0,390	0,428	0,467
Final	0,109	0,148	0,186	0,225	0,263	0,302	0,341	0,379	0,418	0,456	0,495

Tabela 5 – Coordenadas das diferentes posições no eixo dos yy para o 1º caso

2º Variável de Estudo:

Para esta variável, ir-se-á seleccionar as duas melhores localizações que se obtiveram no caso anterior em termos de eficácia de deformação à flexão e torção.

Assim calcular-se-á novamente os valores de deformação com novas posições ao longo do eixo longitudinal (eixo dos *yy)*. Desta vez, optou-se por separar os actuadores piezoeléctricos localizados junto à aresta esquerda com 2 cm de distância ao longo do eixo dos *yy*.

A Tabela 4 mostra as coordenadas consideradas neste caso, mantendo as posições segundo o eixo transversal e criando um novo conjunto de posições ao longo do eixo longitudinal, como expresso na Tabela 6.

Posição / Coord.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Inicial	0,02	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Final	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048

Tabela 6 – Coordenadas das diferentes posições no eixo dos yy para o 2º caso

3º Variável de Estudo:

Pretende-se, agora, averiguar o efeito da orientação dos piezoeléctricos ao longo das direcções de referência, i.e., 0º e 90º. Para isso, foram analisadas 3 configurações distintas ilustradas nas Figuras 9, 10 e 11. No caso da Figura 9, utilizaram-se quatro piezoeléctricos combinando as duas orientações perpendiculares entre si. O mesmo foi feito no caso da Figura 10, mas desta vez considerando 2 actuadores orientados a 0º e 4 orientados a 90º. Finalmente, o caso ilustrado pela Figura 11 pretende analisar o efeito de uma orientação de todos os actuadores ao longo da direcção transversal, i.e., 90º.

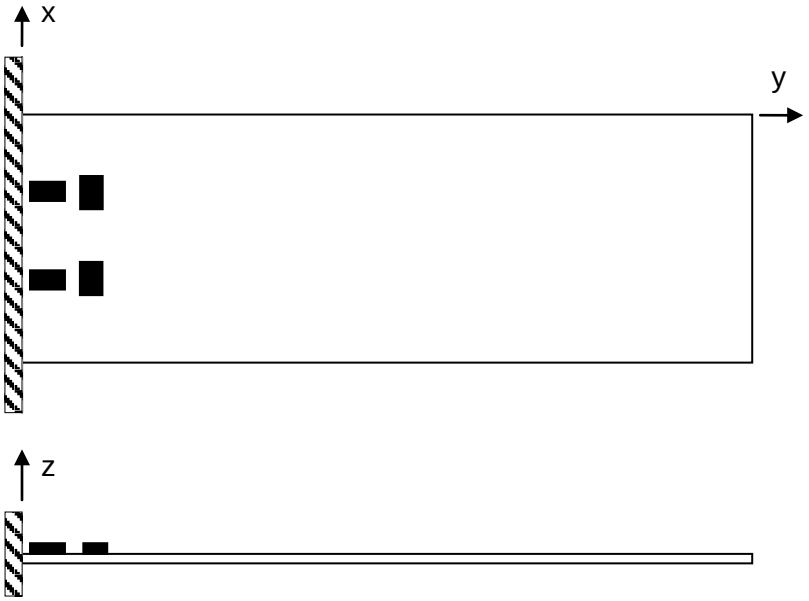


Figura 9 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 2 piezoeléctricos de orientação a 90º

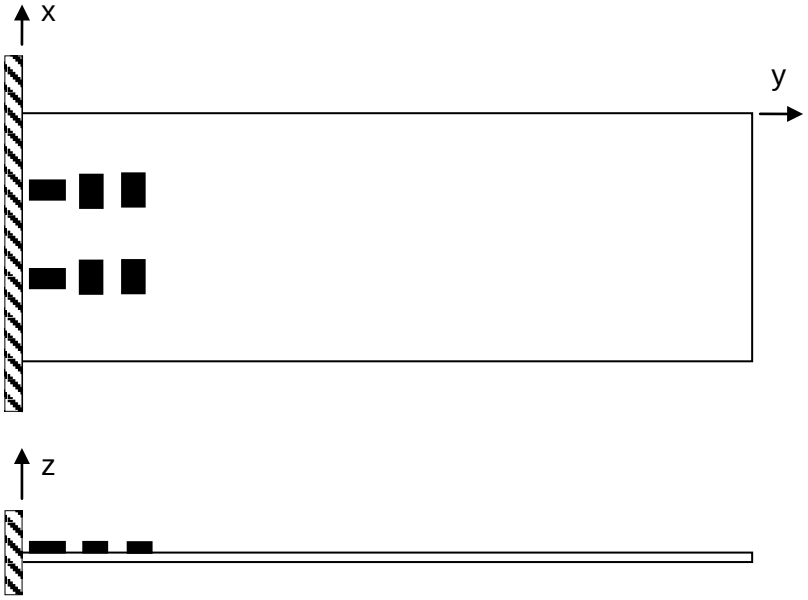


Figura 10 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 4 piezoeléctricos de orientação a 90º

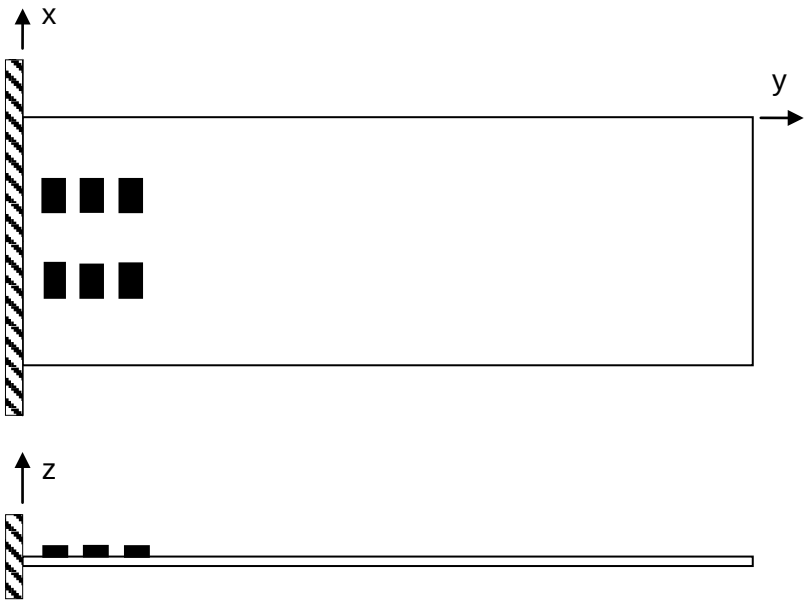


Figura 11 – Disposição dos piezoeléctricos para a posição com 6 piezoeléctricos de orientação a 90º

A Tabela 7 indica as posições das coordenadas dos piezoeléctricos colocados na placa de alumínio segundo a direcção transversal para todos os casos anteriormente referidos.

Coordenadas / Posições	Inicial	Final
Pzt´s orientados a 0º	0,028	0,048
	0,103	0,123
Pzt's c/ Rotação de 90˚	0,024	0,052
	0,099	0,127

Tabela 7 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx para o 3º caso

A Tabela 8 apresenta as diferentes coordenadas dos actuadores ao longo do eixo longitudinal para os 3 casos analisados. Em qualquer deles, foram consideradas 5 divisões equidistantes ao longo deste eixo.

Caso	1	2	3	4	5	Caso	1	2	3	4	5	6	Caso	1	2	3	4	5
1	0,042	0,067	0,092	0,117	0,142	2	0,075	0,106	0,137	0,168	0,199	0,230	3	0,047	0,105	0,142	0,178	0,215
	0,062	0,087	0,112	0,137	0,162		0,095	0,126	0,157	0,188	0,219	0,250		0,067	0,125	0,162	0,198	0,235

Tabela 8 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos yy para o 3º caso

Caso adicional

Durante a realização do trabalho, e atendendo aos resultados que entretanto foram sendo obtidos, decidiu-se simular uma configuração adicional que combina o posicionamento dos actuadores em diferentes posições transversais e longitudinais da placa. Este caso está ilustrado na Figura 12. Como se vê, foram usados 4 piezoeléctricos localizados a ¼ e ¾ da largura da placa, junto à sua extremidade esquerda e com posição fixa. A influência dos restantes 2 actuadores, localizados junto das extremidades superior e inferior da placa, foi averiguada para 6 posições equidistantes ao longo do eixo longitudinal.

Figura 12 – Disposição dos piezoeléctricos para o caso adicional

A Tabela 9 elucida a disposição dos actuadores em relação ao eixo dos *xx*, enquanto a Tabela 10 apresenta as diferentes posições de estudo em relação ao eixo dos *yy*.

Coordenadas / Posições	Inicial	Final
4 Pzt's a ¼ e a ¾	0,028	0,048
	0,103	0,123
2 Pzt's junto à extremidade	0,005	0,025
	0,125	0,145

Tabela 9 – Coordenadas das diferentes posições para os piezoeléctricos no eixo dos xx para o caso adicional

Posição	1	2	Posição	1	2	3	4	5	6
4 Pzt's a ¼ e a ¾	0,005	0,038	Pzt's dianteiros	0,071	0,101	0,131	0,162	0,192	0,222
	0,033	0,066		0,099	0,129	0,159	0,190	0,220	0,250

Tabela 10 – Coordenadas das diferentes posições dos piezoeléctricos segundo o eixo dos yy para o caso adicional

Todos os piezoeléctricos têm apenas uma distância de 5 mm entre si em relação ao eixo dos *yy*.

3.3.2 Descrição do Modelo Computacional

A macro escrita utilizando o ANSYS® começa por estabelecer o desenho da placa de alumínio com o elemento SOLID45 mantendo as suas medidas fixas; seguidamente, define-se a geometria dos piezoeléctricos com o elemento SOLID5, como referido no ponto 3.1. As instruções usadas para este efeito foram as seguintes:

```
x1=0
x2=0.15
y1=0
y2=0.5
z1=0
z2=0.00041
block,x1,x2,y1,y2,z1,z2                !Define bloco por 3 pontos
a=0.005
b=0.025
c=0.125
d=0.145
e=0.005
f=0.033
g=0.053
h=0.081
i=0.430
j=0.458
```

```
block,a,b,e,f,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 1
block,c,d,e,f,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 2
block,a,b,g,h,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 3
block,c,d,g,h,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 4
block,a,b,i,j,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 5
block,c,d,i,j,0.00041,0.000664          !Define bloco do pzt 6
et,1,solid45
et,2,solid5
keyopt,2,1,3
keyopt,2,3,0
keyopt,2,5,0
```

De seguida, são descritas as propriedades dos materiais utilizados na macro considerando as três dimensões de referência. Neste caso, o material 1 corresponde ao alumínio e o material 2 ao material dos piezoeléctricos.

```
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,ex,1,,68.9e9                     !Módulo de Young do alumínio
mpdata,prxy,1,,0.33                    !Razão de Poisson's do alumínio
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,dens,1,,2800                     !Densidade do alumínio
tb,anel,2,1,0                           !Define plano estrutural
tbdata,1,1.1799e11,6.9206e10,6.8966e10 !C11,C12,C13
tbdata,7,1.1799e11,6.8966e10            !C22,C23
tbdata,12,1.0345e11                     !C33
tbdata,16,2.4390e10                     !C44
tbdata,19,2.2222e10                     !C55
tbdata,21,2.2222e10                     !C66
tb,piez,2                               !Define plano piezoeléctrico
tbdata,3,-7.5862                        !E31
tbdata,6,-7.5862                        !E32
tbdata,9,13.6207                        !E33
```

```
tbdata,14,13                          !E15
tbdata,16,13                          !E16 constante piezoeléctrica
emunit,epzro,8.85e-12
mp,perx,2,791                         !Permissividade na direcção x
mp,pery,2,791                         !Permissividade na direcção y
mp,perz,2,889                         !Permissividade na direcção z
mp,dens,2,7650                        !Densidade do material do pzt
```

O passo seguinte consiste na criação dos nós e elementos finitos por uma ordem sequencial. Primeiro, ir-se-á utilizar o SOLID45, ou seja, serão criados os nós do alumínio e consequentemente os seus elementos finitos, e depois serão criados os nós do SOLID5 para que estes coincidam com os anteriores, de modo a que seja possível realizar o estudo.

Por existirem muitos nós coincidentes é necessário fazer uma operação de “merge”, a qual consiste numa função do programa que junta nós localizados a uma distância inferior a uma tolerância pré-estabelecida. Os comandos usados para este efeito foram:

```
vsel,all
type,1                                !Modelagem do Alumínio
vsel,s,loc,z,0,0.00041                !Selecção do Alumínio
vatt,1,,1                             !Atribuição do material 1
allsel
esize,0.001,0
vmesh,1
vsel,all
type,2                                !Modelagem dos piezoeléctricos
vsel,s,loc,z,0.00041,0.000664
vatt,2,,2
allsel
esize,0.001
vmesh,2,7,1
allsel
nplot
nummrg,node,,,,low
```

Na Figura 13 encontra-se, a título de exemplo, uma representação geral da malha obtida para um dos casos analisados, bem como os nós e elementos finitos correspondentes.

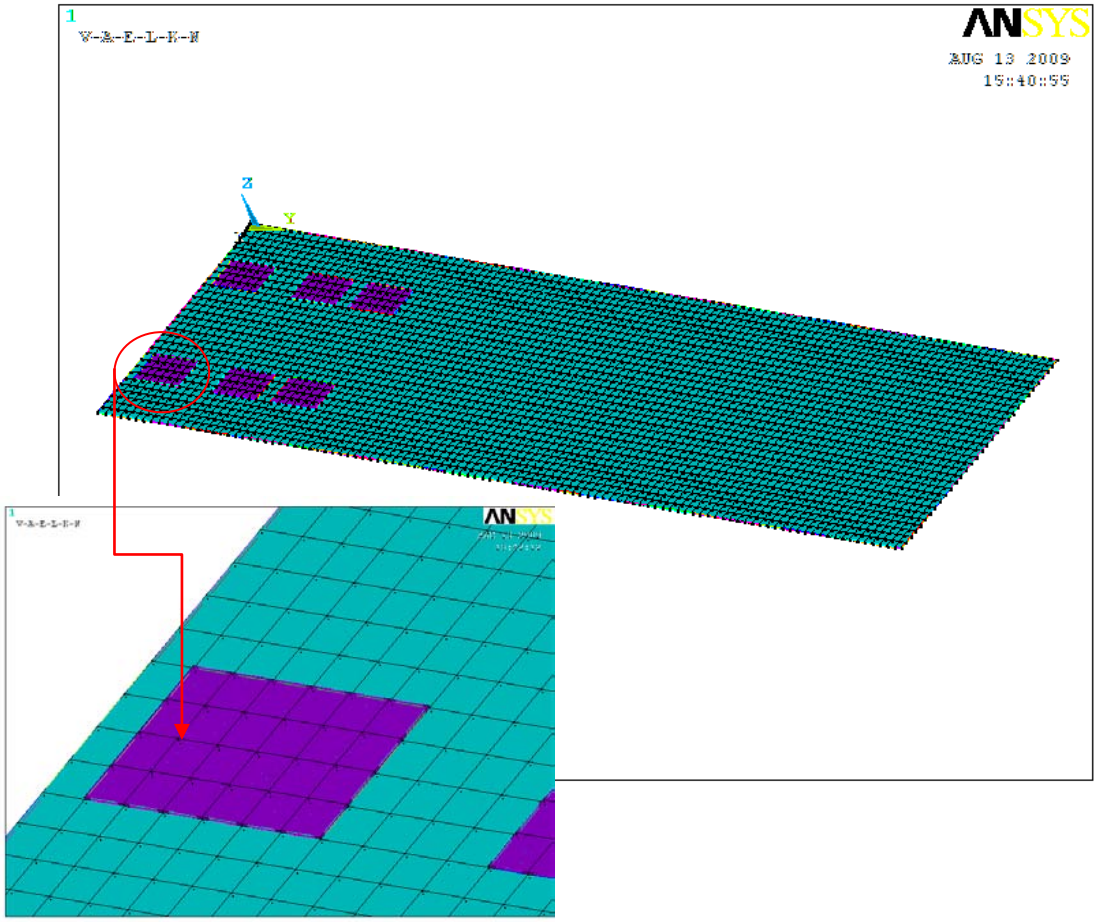


Figura 13 – Pormenor da malha realizada na placa de alumínio e no piezoeléctrico

É, agora, necessário seleccionar todos os nós do elemento SOLID5 para se impor a voltagem que se deseja aplicar para as diferentes simulações. Para tal, foi necessária a utilização da função "*nsel*", a qual selecciona os nós existentes nas áreas que se deseja. Sem esta função ter-se-ia de seleccionar um nó de cada vez. Depois de estes estarem seleccionados, atribui-se a identificação pretendida para que de seguida seja só preciso "chamar" a entidade em causa para a introdução das diferentes voltagens. A Figura 14 ilustra a aplicação deste procedimento, o qual está descrito nas instruções que se apresentam de seguida:

```
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,e,f
cp,1,volt,all                          !Componente nº1 Baixo
```

```
*get,baixo1,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,e,f
cp,2,volt,all                          !Componente nº1 Cima
*get,cima1,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,e,f
cp,3,volt,all                          !Componente nº2 baixo
*get,baixo2,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,e,f
cp,4,volt,all                          !Componente nº2 cima
*get,cima2,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,g,h
cp,5,volt,all                          !Componente nº3 Baixo
*get,baixo3,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,g,h
cp,6,volt,all                          !Componente nº3 Cima
*get,cima3,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
```

```
nsel,r,loc,y,g,h
cp,7,volt,all                          !Componente nº4 Baixo
*get,baixo4,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,g,h
cp,8,volt,all                          !Componente nº4 cima
*get,cima4,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,i,j
cp,9,volt,all                          !Componente nº5 baixo
*get,baixo5,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,i,j
cp,10,volt,all                         !Componente nº5 cima
*get,cima5,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,i,j
cp,11,volt,all                         !Componente nº6 baixo
*get,baixo6,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,i,j
cp,12,volt,all                         !Componente nº6 cima
*get,cima6,node,0,num,min
allsel
```

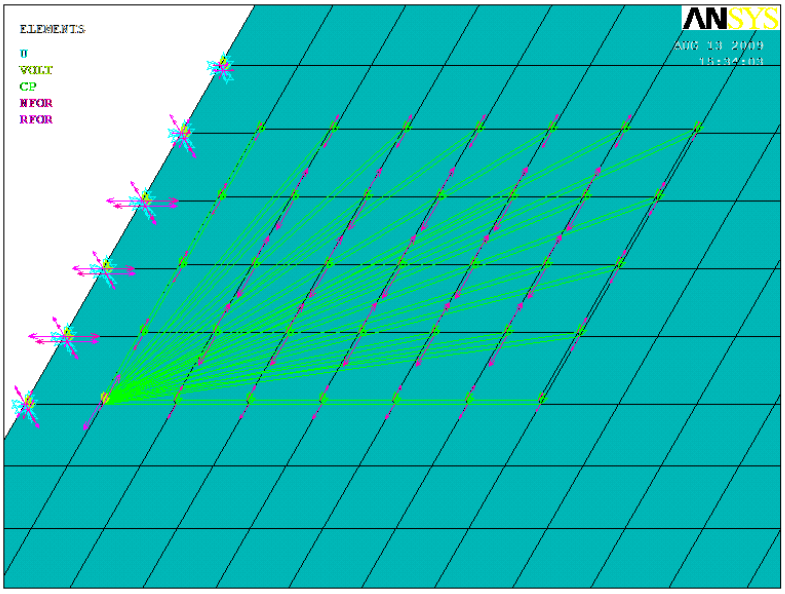


Figura 14 – Exemplo da implementação da Voltagem num piezoeléctrico

Todavia, é preciso ter em atenção que as superfícies superior e inferior dos piezoeléctricos deverão ser excitadas por tensões adequadas ao efeito da deformação pretendida. Assim, quando se pretende causar uma deformação de flexão, as superfícies superior e inferior dos actuadores devem estar excitadas por tensões eléctricas de sinal contrário mas mantendo a mesma disposição ao longo de toda a placa. No entanto, quando se pretendem deformações que originem torção, os actuadores deverão ter uma polarização invertida relativamente ao eixo de torção da placa. Os comandos indicados abaixo dizem respeito, exactamente, a uma simulação onde se pretende excitar os actuadores de modo a causar um esforço de torção:

```
d,baixo1,volt,0                    !Aplica voltagem 0 a baixo1
d,cima2,volt,0                     !Aplica voltagem 0 a cima2
d,baixo3,volt,0                    !Aplica voltagem 0 a baixo3
d,cima4,volt,0                     !Aplica voltagem 0 a cima4
d,baixo5,volt,0                    !Aplica voltagem 0 a baixo5
d,cima6,volt,0                     !Aplica voltagem 0 a cima6
allsel
d,cima1,volt,100                   !Aplica voltagem 100 a cima1
d,baixo2,volt,100                  !Aplica voltagem 100 a baixo2
d,cima3,volt,100                   !Aplica voltagem 100 a cima3
d,baixo4,volt,100                  !Aplica voltagem 100 a baixo4
d,cima5,volt,100                   !Aplica voltagem 100 a cima5
```

```
d,baixo6,volt,100                    !Aplica voltagem 100 a baixo6
allsel
```

Finalmente, é criada a condição de fronteira com o encastramento da placa de alumínio no eixo dos *xx*:

```
da,3,all                          !Aplica encastramento na área 3
```

Estamos, agora, em condições de proceder à análise estática dos elementos. O nó 75803 representa um dos nós da extremidade da placa para que seja possível obter o valor da deformação máxima (DMX), correspondente à deformada ilustrada pela Figura 15.

```
/solu
antype,static                        !Análise estática estrutural
/status,solu
solve                                !Apresenta o valor do nó 75803
*get,deflexao,node,75803,uz
```

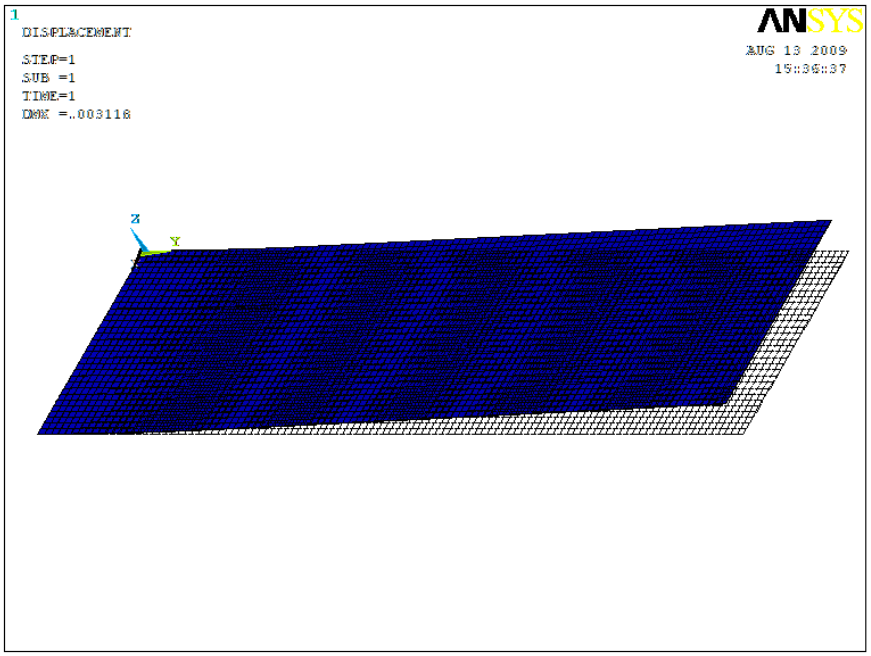


Figura 15 – Posição inicial (grelha) e posição final (azul escuro) depois de aplicados os 100 Volts.

A Figura 16 representa um caso onde se obteve uma deformação da placa à torção. Para esta situação, apresentam-se, a título de exemplo, as deformações locais segundo o eixo dos *zz* representadas através da escala de cores da Figura 17.

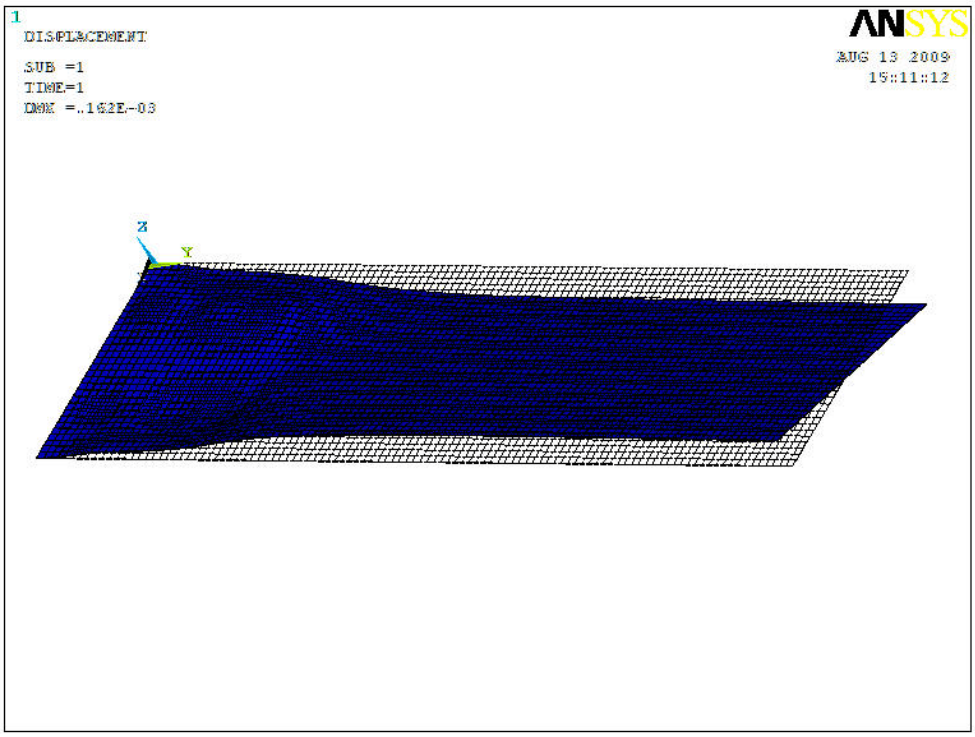


Figura 16 – Posição inicial (grelha) e posição final (azul escuro) depois de aplicada ±100 Volts

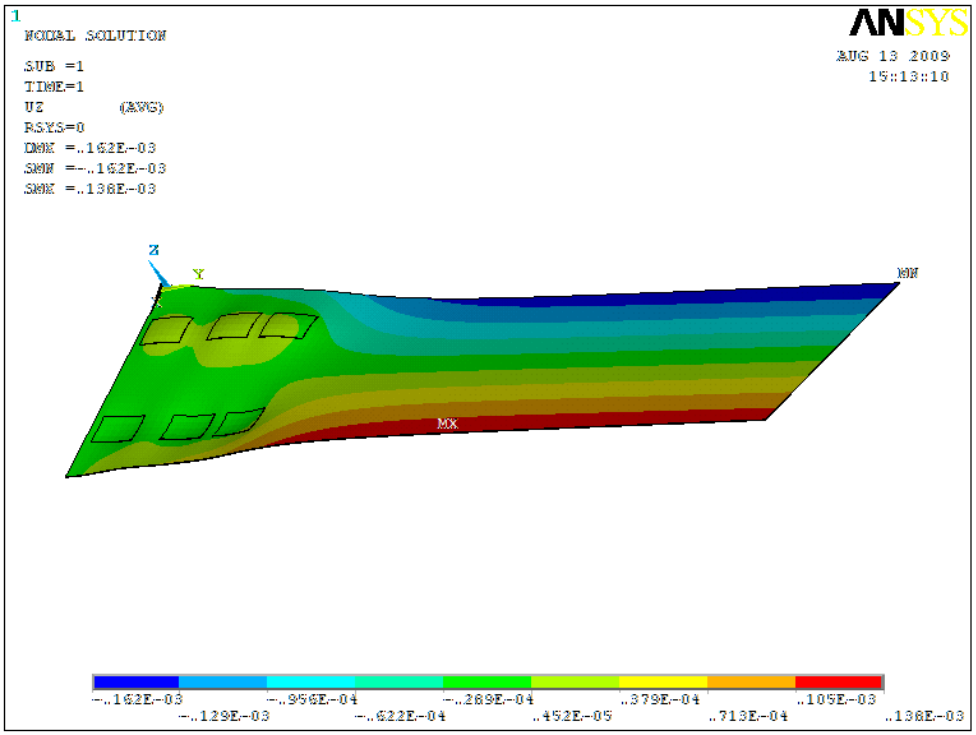


Figura 17 – Exemplo da deformação da placa à torção segundo o eixo dos zz.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo analisaremos os diferentes resultados para todos os casos descritos no capítulo anterior. Em termos gerais, todas as simulações apontam para uma tendência comum de aumento da eficácia dos actuadores à medida que se diminui a distância entre si.

1ª Variável de Estudo

Através dos Gráficos 1 e 2 podemos visualizar a deformação máxima obtida para cada posição dos actuadores ao longo do eixo longitudinal., respectivamente para as solicitações à flexão e torção.

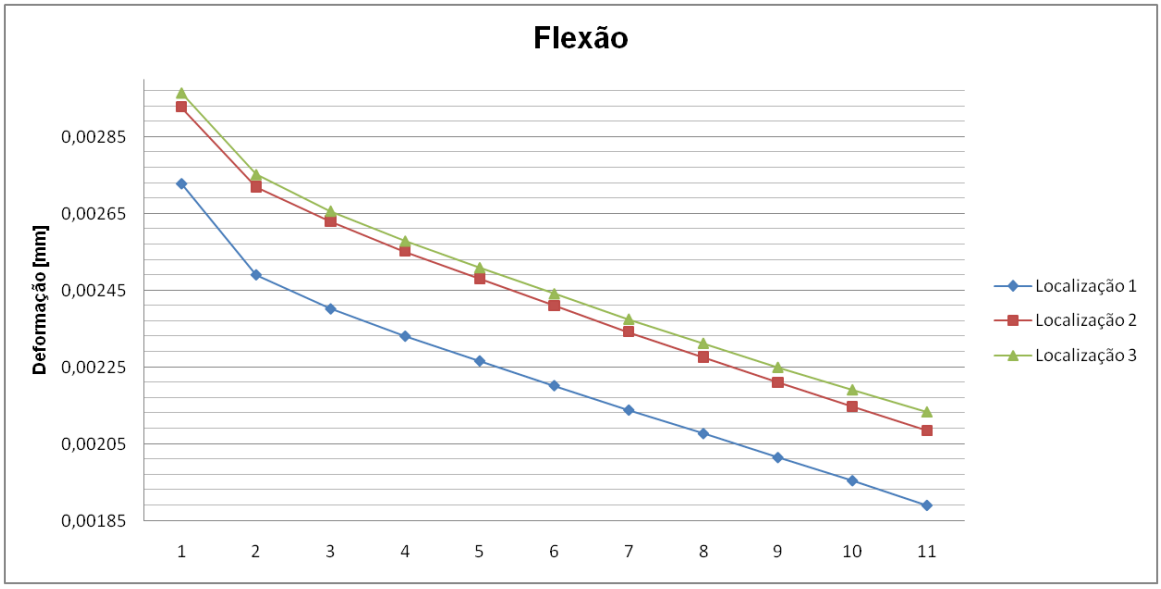


Gráfico 1 – Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para o 1º caso

Para esta disposição dos piezoeléctricos, as localizações 2 e 3 são as melhores em termos de eficácia de deformação à flexão. Assim pode-se concluir que para se obter uma maior autoridade de deformação à flexão na placa, os piezoeléctricos têm de estar dispostos na zona mais próxima do seu eixo de torção.

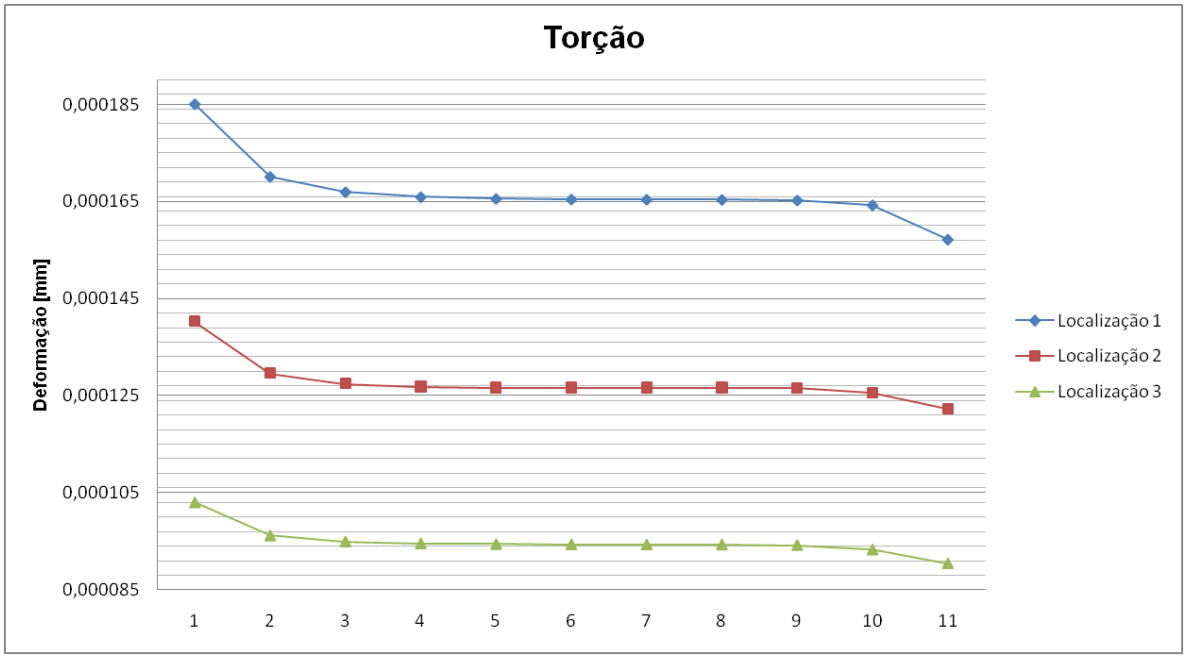


Gráfico 2 – Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para o 1º caso

No entanto, quando se fala da torção, as conclusões são já significativamente diferentes. Neste caso, pode ver-se que a posição 1 é a mais eficaz, contrariamente ao que foi verificado à flexão. Também se pode verificar que a posição 2 tem valores intermédios, tanto para a flexão como para a torção. A posição 3 tem valores da deformação à torção muito baixos, o que levará à exclusão desta configuração na análise das próximas variáveis de estudo.

Desta forma, pode-se concluir que para a deformação à torção, os piezoeléctricos são mais eficientes quando colocados o mais perto possível na extremidade da placa.

2ª Variável de Estudo:

Nos Gráficos 3 e 4 podem-se visualizar os novos valores para as deformações nos modos de flexão e torção, respectivamente.

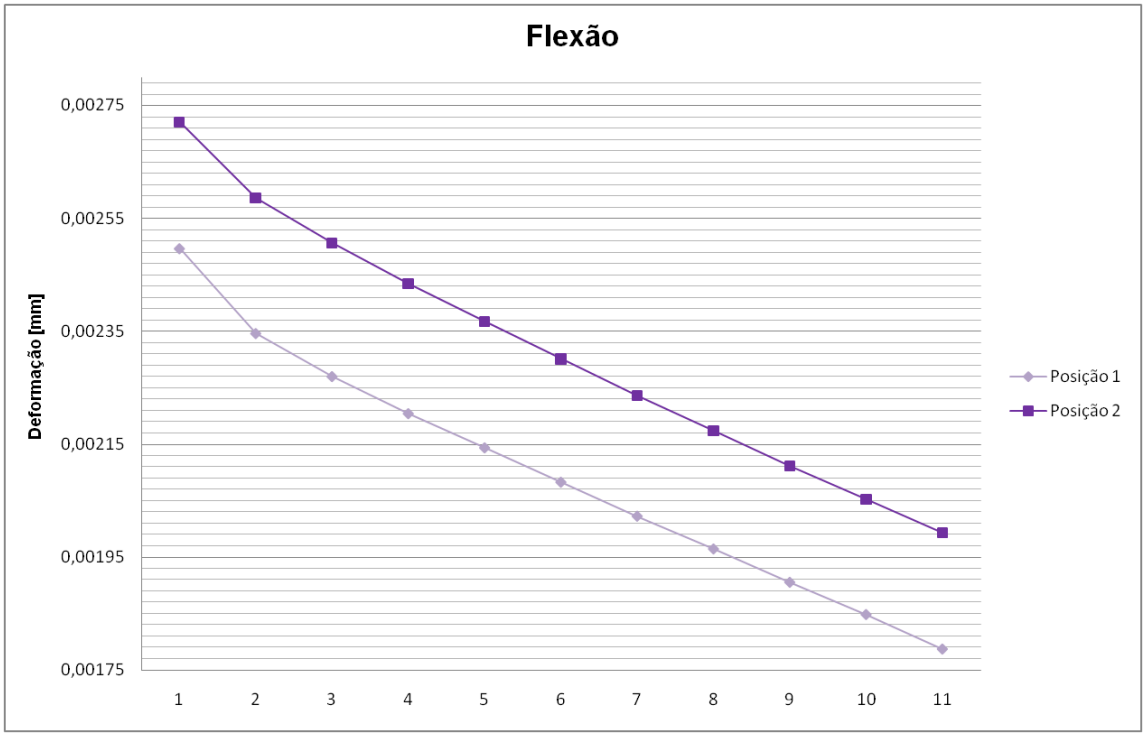


Gráfico 3 – Representação gráfica dos resultados à flexão das duas melhores posições para o 2º caso.

Nesta situação, pode-se verificar, desde logo, que os valores de deformação à flexão e à torção são menores (em relação à 1ª variável de estudo) quando se verifica um maior distanciamento entre os piezoeléctricos que estão localizados junto à extremidade lateral esquerda da placa. Esta simulação vem confirmar o que se esperava em relação aos resultados, pois verifica-se que embora as suas deformações tenham diminuído com o distanciamento, a posição 2 continua a ser a mais favorável em relação à flexão.

O mesmo se verifica em relação à torção, pois a posição 1 continua a ter valores mais elevados. Nota-se que, com o distanciamento dos piezoeléctricos, os valores máximos de deformação diminuem de forma mais notória quando comparados com a 1ª variável de estudo.

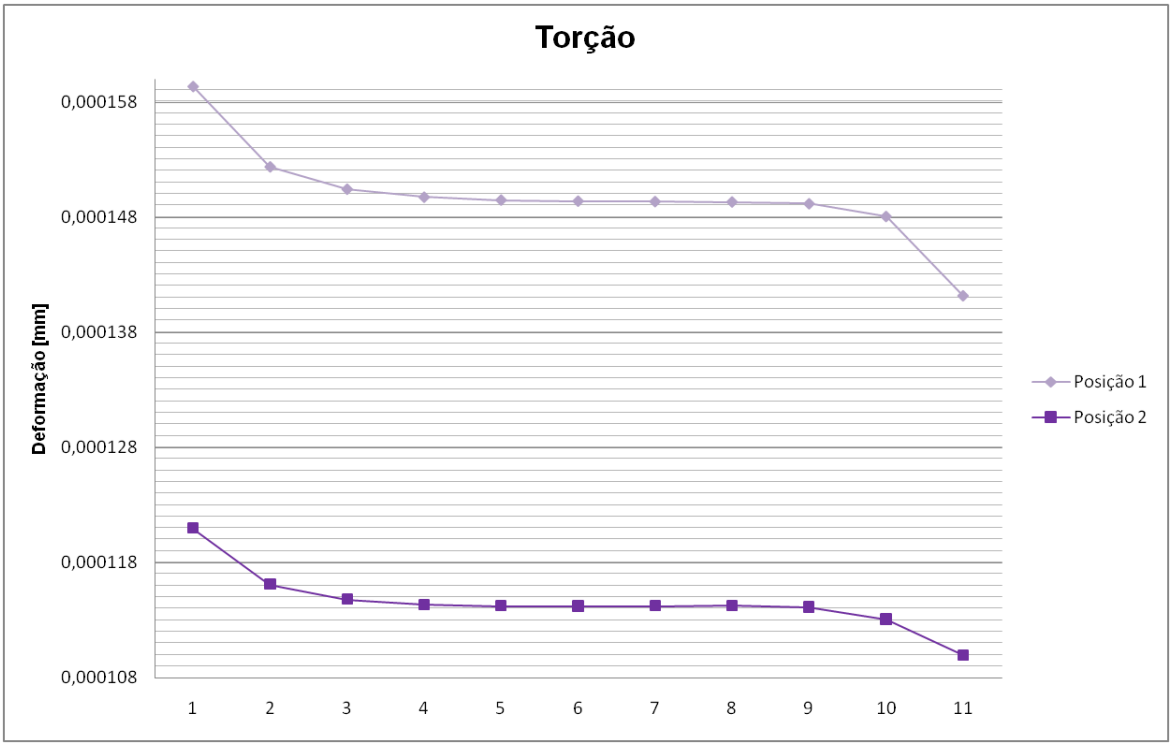


Gráfico 4 – Representação gráfica dos resultados à torção das duas melhores posições para o 2º caso

Baseando-nos nos resultados obtidos até agora, pode-se concluir que a melhor posição para a flexão será a 2 e para a torção a posição 1. Também se verificou que quanto mais próximos estivessem os piezoeléctricos, mais eficiência estes teriam.

3ª Variável de Estudo:

Pode-se verificar através do Gráfico 5 e 6, correspondente à influência da orientação dos actuadores, que há uma notória diminuição da eficácia dos actuadores orientados a 90º, particularmente quando se comparam as deformações máximas à flexão com aquelas obtidas no 1º caso. Este gráfico permite, também, concluir que parece não haver, neste caso, uma influência clara do número de actuadores na reposta à flexão e à torção. De facto, observando as curvas para as 3 configurações analisadas, verifica-se que a que apresenta menores valores de deformação é aquela que corresponde à utilização de 6 piezoeléctricos orientados a 90º.

Note-se que a configuração que apresenta uma maior autoridade à flexão é aquela que tem 6 actuadores, 4 dos quais orientados a 90º. Esta é a configuração que também permite atingir os melhores resultados na deformação à torção, cujos valores apresentam

níveis semelhantes aos obtidos nos casos 1 e 2. Porém, a utilização de apenas 2 actuadores a 90º leva a que a autoridade à torção seja grandemente afectada, pelo que esta configuração foi descartada de posteriores análises.

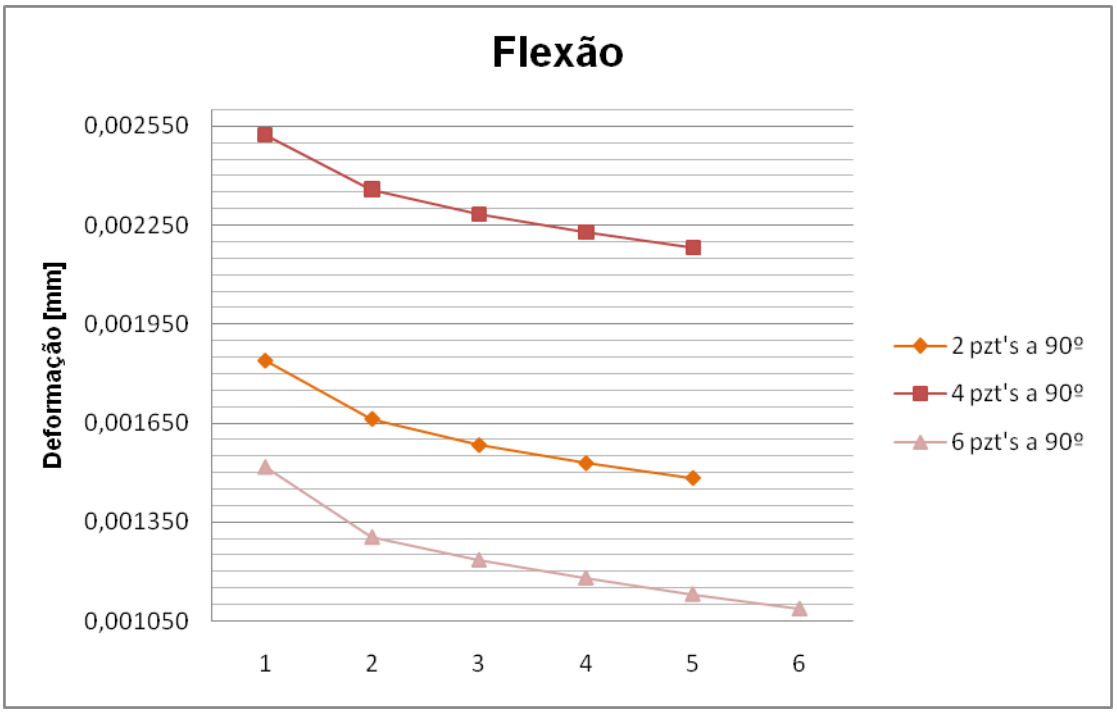


Gráfico 5 - Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para a 3ª variável

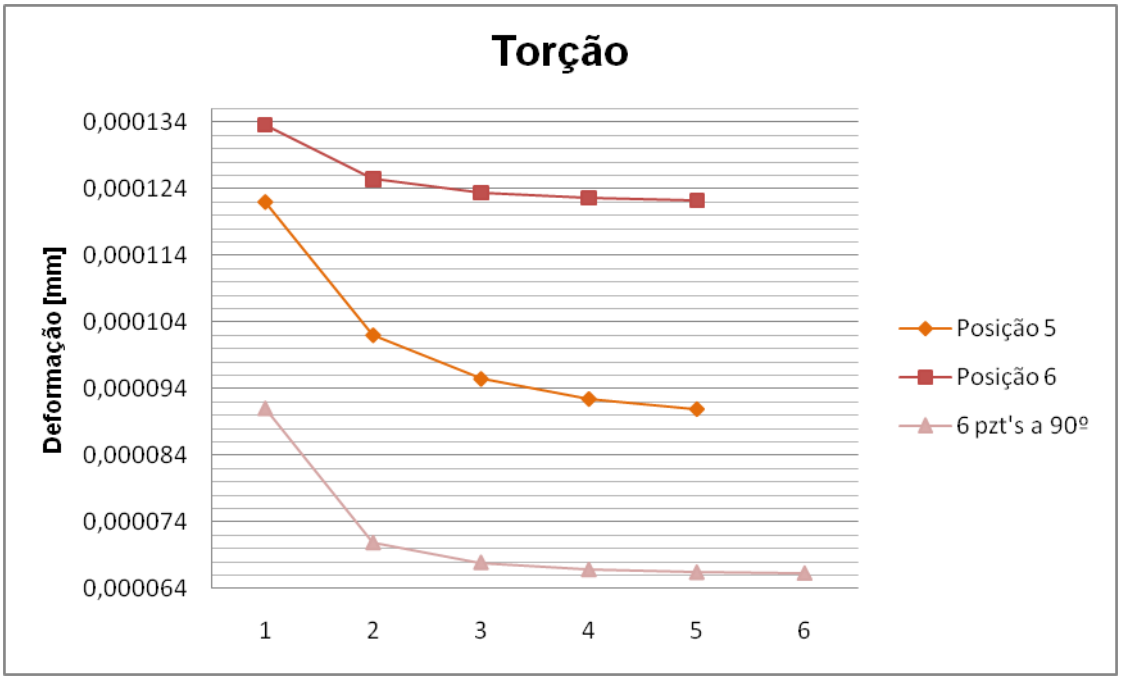


Gráfico 6 - Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para a 3ª variável

Caso adicional:

Os resultados relativos ao caso adicional que foi descrito no capítulo anterior encontram-se representados através dos Gráficos 7 e 8, respectivamente nos modos de flexão e torção. Através dos resultados obtidos, podemos concluir que o valor da deformação à flexão para a 1ª e 2ª posições dos actuadores (ao longo do eixo longitudinal) não foi significativamente diferente daquele obtido para os casos 1 e 2 já apresentados. No entanto, as restantes posições permitiram obter valores de deformação ligeiramente superiores, correspondendo, inclusivamente, aos melhores de entre o conjunto total obtido para todas as simulações efectuadas para todos os casos.

Ou seja, podemos concluir que esta configuração parece ser a mais favorável para o controlo da deformação à flexão de entre todas aquelas que foram analisadas no âmbito do presente trabalho.

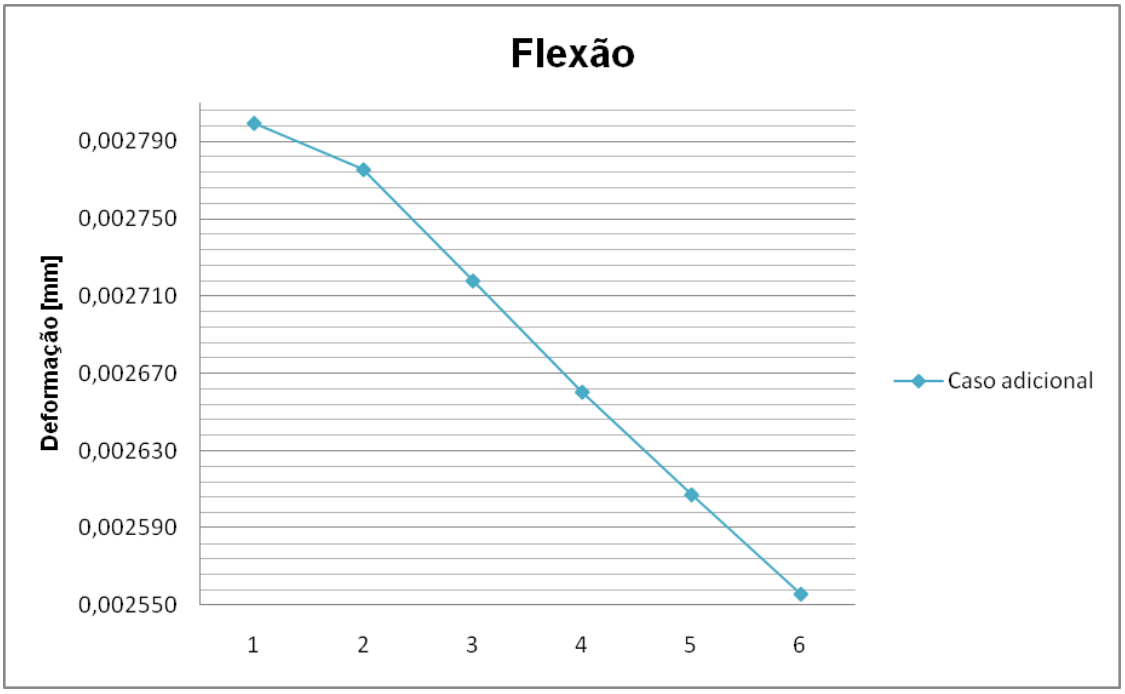


Gráfico 7 - Representação gráfica dos resultados à flexão das várias posições para o caso adicional.

No que diz respeito à deformação à torção obtida com esta configuração, também se registaram valores elevados quando comparados com os restantes casos. De facto, em termos absolutos, esta foi a configuração que levou à maior deformação para a primeira posição de localização dos actuadores. Todas as outras resultaram em valores de deformação à torção elevados, embora inferiores àqueles registados para a 1ª localização do caso 1.

Em súmula, podemos dizer que esta variável é uma boa escolha para a colocação dos piezoeléctricos, pois tanto à flexão como à torção mostra resultados satisfatórios.

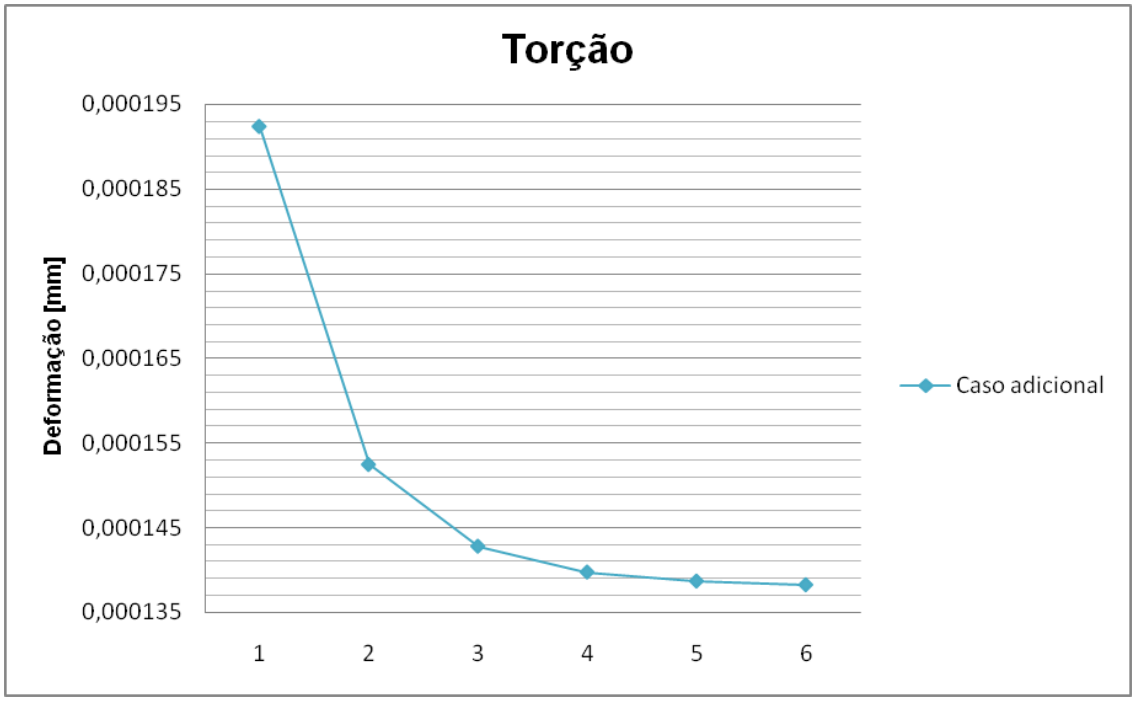


Gráfico 8 - Representação gráfica dos resultados à torção das várias posições para a 3ª variável

Finalmente, os Gráficos 11 e 12 reúnem todos os resultados obtidos para as simulações efectuadas, respectivamente para os modos de flexão e torção. A comparação directa dos diferentes perfis de deslocamento aqui representados permite concluir imediatamente quais as configurações limites em termos de desempenho de controlo da placa. Assim, para a flexão as melhores posições verificadas são a 2 e 3, que correspondem às posições que estão mais próximas do eixo longitudinal da placa. Inquestionavelmente, também se pode verificar que a posição 7 é a pior configuração considerada neste estudo, comprovando a relativa menor importância de utilização de actuadores orientados a 90º.

Quanto à torção, verifica-se que os melhores resultados são os que estão associados a uma localização dos piezoeléctricos mais próxima das extremidades superior e inferior da placa (posição 1 e 4), ou se quisermos, mais afastada do eixo de torção.

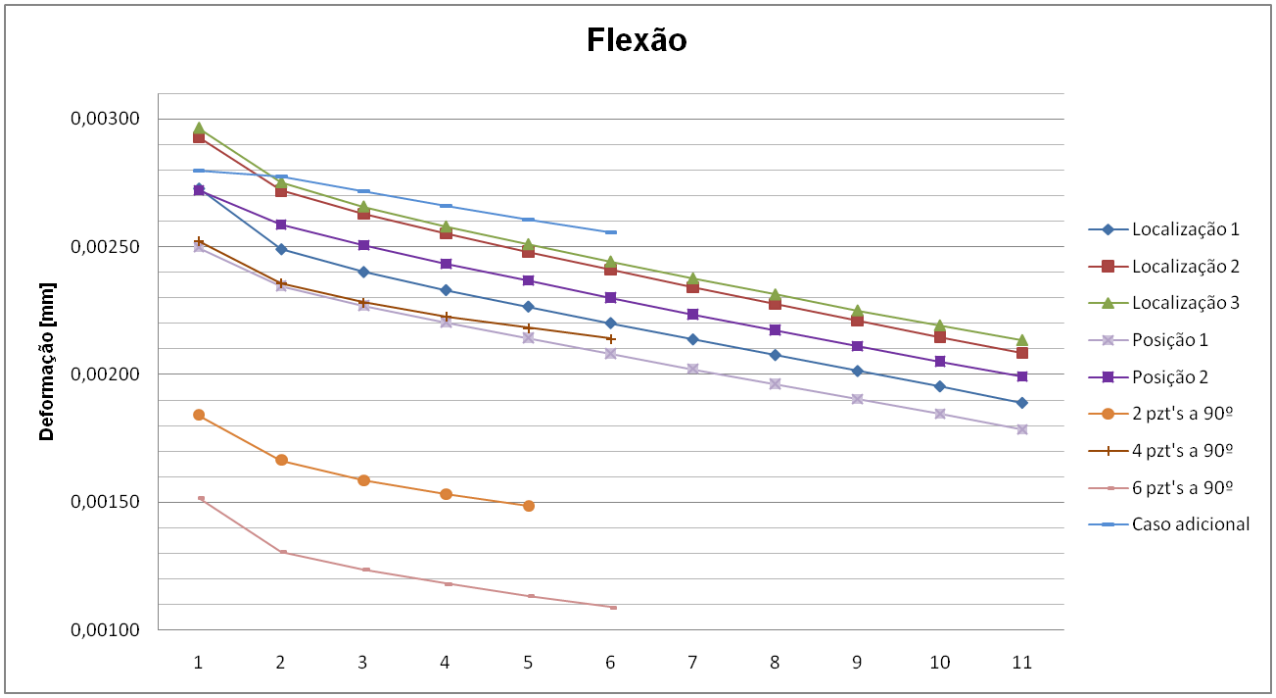


Gráfico 9 – Gráfico das deformações de todas as posições em estudo à flexão

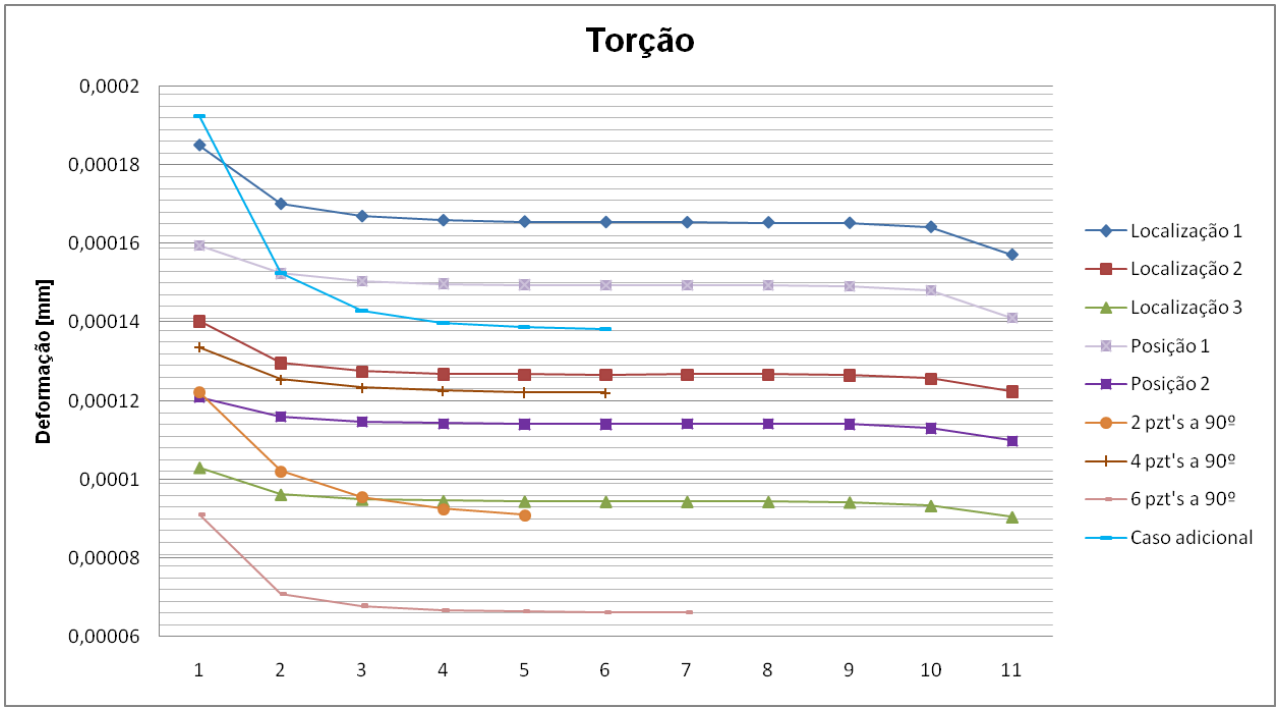


Gráfico 10 – Gráfico das deformações de todas as posições em estudo à torção

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu fazer uma análise computacional tendo em vista a definição da melhor localização e configuração de actuadores piezoeléctricos para controlo activo de *Flutter* numa placa de alumínio.

Dos resultados obtidos, podem destacar-se as seguintes conclusões:

- Considerando a distribuição de actuadores ao longo do eixo transversal da placa, concluiu-se que a sua localização junto das extremidades superior e inferior do componente permite a obtenção de um controlo com maior autoridade no modo de torção. No entanto, a localização dos piezoeléctricos junto ao eixo de torção (eixo longitudinal) é aquela que mostra melhor desempenho à flexão;
- Considerando a distribuição de actuadores ao longo do eixo longitudinal da placa, verifica-se que a maior autoridade de controlo à flexão e à torção é obtida quando os piezoeléctricos estão localizados junto à zona de encastramento da placa. Por outro lado, esta direcção de distribuição parece ser a mais sensível à distância verificada entre cada sensor, uma vez que os melhores resultados foram obtidos para as posições mais próximas;
- Em termos de orientação dos actuadores, existe uma clara vantagem em alinhar os piezoeléctricos numa direcção paralela ao eixo longitudinal da placa. Esta conclusão é corroborada pelo facto de se terem obtido os resultados mais desfavoráveis para a configuração relativa à utilização de actuadores orientados exclusivamente a 90º;
- A combinação de actuadores ao longo das duas direcções de referência da placa (longitudinal e transversal) é, em termos absolutos, a configuração mais eficaz para controlo do modo de torção para uma das posições consideradas. Esta alternativa de distribuição dos actuadores demonstra, também, um excelente desempenho à flexão, tendo correspondido ao segundo melhor conjunto de resultados de entre todas as configurações analisadas. Por isso, podemos afirmar que este tipo de configuração é a melhor solução de compromisso tendo em vista a maximização da autoridade de controlo, simultaneamente, à flexão e torção da placa, permitindo a minimização da probabilidade de ocorrência do fenómeno de *Flutter*.

Trabalhos Futuros:

- O trabalho aqui apresentado é baseado num número significativo de simulações computacionais obtidas para diferentes variáveis. No entanto, a obtenção da posição e configuração óptima dos actuadores piezoeléctricos beneficiaria com a utilização dum método específico de optimização, o qual possibilitaria estender os resultados a um maior número de variáveis;
- Os resultados obtidos deverão ser validados através de ensaios experimentais em túnel de vento, os quais permitirão comprovar a eficácia das configurações mais favoráveis no contexto das simulações computacionais.
- Numa fase posterior, este trabalho poderá ser útil para o desenvolvimento de um sistema de controlo activo de *Flutter* em superfícies com diferentes geometrias, sendo necessário, para tal, desenvolver um sistema de aquisição de dados acoplado a um controlador que permita a aplicação, em tempo real, de sinais de controlo que permitirão a minimização do fenómeno de *Flutter* e a garantia da preservação da integridade da estrutura.

CAPÍTULO 6 - BIBLIOGRAFIA

(1). Garrick, I. E., Reed, W. H.; "*Historical Development of Aircraft Flutter";* Journal of Aircraft, Vol. 18 nº11; 1981.

(2). Kehoe, M. W.; "*A Historical Overview of Flight Flutter Testing";* Dryden Flight Research Center Edwards; NASA - Scientific and Technical Information Program; Office of Management; California; 1995.

(3). Pereira, D. C.; "*Estudo da Aeroelasticidade em Aeronaves";* Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP; São Paulo; 2004.

(4). Wright, J. R., citado por Pereira, D. C.; *"Introduction to Flutter of Winged Aircraft"*; von Karman Institute for Fluid Dynamics; Lecture Series 01;*Elementary Flutter Analysis*;1992.

(5). Moniz, P. A. A.; *"Controlo Aeroelástico Experimental de Estruturas Adaptativas"; Tese de Mestrado;* Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa; 2000.

(6). Moniz, P. A. A.; "*Adaptive Aeroelastic Aircraft Structures"; Tese de Doutoramento;* Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa; 2004.

(7). Giurgiutiu, V.; "*Review of Smart Materials Actuation Solutions for Aeroelastic and Vibration Control";* Journal of Intelligent Material Systems and Structures; Vol.11; Colombia; South Carolina; 2000.

(8). Fung, Y. C.; "*An Introduction to the Theory of Aeroelasticity";* Dover Publications; New York; 1955.

(9). Junior, C. De M.; "*Identification of Flutter Parameters for a Wing Model";* University of São Paulo; . Vol. XXVIII, No. 3; ABCM; São Paulo; 2006.

(10). Schwartz, M.; "*Encyclopedia of Smart Materials";* John Wiley & Sons, Inc.; Canada; 2002.

(11). Carvalho, C. F., Martins, C. R., Nunes, M.; "*Circuitos, Sensores e Actuadores para Detecção Remota de Comboio";* ISEL / Esc. Náutica / IST / INESC-ID; Lisboa; 2005.

(12). Ferreira, I.; *"Engenharia dos Materiais"*; Guia de Divulgação; Departamento de Ciência dos Materiais - Universidade Nova de Lisboa; Lisboa.

(13). Costa, A. P. F.; *"Novel Concepts for Piezoelectric Actuated Adaptive Aeroelastic Aircraft Structures"*; Tese de Doutomento; Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa; 2001.

(14). Malgaca, L.; "*Integration of Active Vibration Control Methods with Finite Element Models of Smart Structures";* Graduate School of Applied Sciences - Dokuz Eylül University; Izmir; 2007.

(15). Huebner, K. H., Thornton, E. A., Byron, T. G; "*The Finite Element Method for Engineer";* John Wiley & Sons Inc.; Canadá; 1995.

(16). Pavanello, R.; "Notas de Aula - Introdução ao Método de Elementos Finitos"; Unicamp - Universidade Estadual de Campinas; São Paulo; 1997.

(17). Ottosen, N. S, Petersson, H.; "*Introduction to the Finite Element Method";* Prentice Hall International Ltd; United Kingdom; 1992.

(18). Costa, T. F. G.; "*Estudo numérico de uma asa com controle activo de flutter por realimentação da pressão medida num ponto";* Tese de Mestrado; Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos; São Carlos; 2007.

(19). Sánchez, C. A. A.; "*Estudo do Impacto usando Elementos Finitos e Análise Linea";* Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de São Paulo; São Carlos; 2001.

(20). Silva, J. M. A.; "*Análise da Propagação de Fendas por Fadiga-Fluência na Superliga de Níquel RR1000"; Tese de Doutoramento;* Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa; 2007.

(21). Gupta, K.K., Meek, J.L.; "*Finite Element Multidisciplinary Analysis*"; AIAA Education Series; Virginia; 2000**.**

(22). Silva, É. C.; "Usando o Data Explorer para Visualizar Dados Gerados pelo ANSYS" [Online] Agosto 1996. [Cited: Agosto 6, 2009.] http://www.research.ibm.com/dx/proceedings/dasilva/port.htm.

(23). Release 11.0 Documentation for ANSYS.

(24). Imaoka, S. ANSYS; "*Conversion of Piezoelectric Material Data"* [Online] Novembro 12, 1999. [Cited: Agosto 1, 2009.] http://ansys.net/tips/Week13_TNT_Conversion_of_Piezoelectric_Material_Data.pdf.

ANEXOS

Anexo 1 – Software do ANSYS® (completo)

```
/PREP7
x1=0
x2=0.15
y1=0
y2=0.5
z1=0
z2=0.00041
block,x1,x2,y1,y2,z1,z2
a=0.005
b=0.025
c=0.125
d=0.145
e=0.005
f=0.033
g=0.053
h=0.081
i=0.430
j=0.458
block,a,b,e,f,0.00041,0.000664
blocK,c,d,e,f,0.00041,0.000664
block,a,b,g,h,0.00041,0.000664
block,c,d,g,h,0.00041,0.000664
block,a,b,i,j,0.00041,0.000664
block,c,d,i,j,0.00041,0.000664
ET,1,SOLID45
ET,2,SOLID5
KEYOPT,2,1,3
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,68.9e9
MPDATA,PRXY,1,,0.33
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2800
tb,anel,2,1,0
tbdata,1,1.1799e11,6.9206e10,6.8966e
10
tbdata,7,1.1799e11,6.8966e10
tbdata,12,1.0345e11
tbdata,16,2.4390e10
tbdata,19,2.2222e10
tbdata,21,2.2222e10
tb,piez,2
tbdata,3,-7.5862
tbdata,6,-7.5862
tbdata,9,13.6207
tbdata,14,13
tbdata,16,13
emunit,epzro,8.85e-12
mp,perx,2,791
mp,pery,2,791
mp,perz,2,889
```

```
mp,dens,2,7650
vsel,all
type,1
vsel,s,loc,z,0,0.00041
vatt,1,,1
allsel
esize,0.001,0
vmesh,1
vsel,all
type,2
vsel,s,loc,z,0.00041,0.000664
vatt,2,,2
allsel
esize,0.001
vmesh,2,7,1
allsel
nplot
nummrg,node,,,,low
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,e,f
cp,1,volt,all
*get,baixo1,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,e,f
cp,2,volt,all
*get,cima1,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,e,f
cp,3,volt,all
*get,baixo2,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,e,f
cp,4,volt,all
*get,cima2,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,g,h
cp,5,volt,all
*get,baixo3,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,g,h
cp,6,volt,all
*get,cima3,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,g,h
cp,7,volt,all
*get,baixo4,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,g,h
cp,8,volt,all
*get,cima4,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,a,b
```

```
nsel,r,loc,y,i,j
cp,9,volt,all
*get,baixo5,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,a,b
nsel,r,loc,y,i,j
cp,10,volt,all
*get,cima5,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.00041
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,i,j
cp,11,volt,all
*get,baixo6,node,0,num,min
allsel
nsel,s,loc,z,0.000664
nsel,r,loc,x,c,d
nsel,r,loc,y,i,j
cp,12,volt,all
*get,cima6,node,0,num,min
allsel
d,baixo1,volt,0
d,baixo2,volt,0
d,baixo3,volt,0
d,baixo4,volt,0
d,baixo5,volt,0
d,baixo6,volt,0
allsel
d,cima1,volt,100
d,cima2,volt,100
d,cima3,volt,100
d,cima4,volt,100
d,cima5,volt,100
d,cima6,volt,100
allsel
da,3,all
allsel
/solu
antype,static
/status,solu
solve
*get,deflexao,node,75803,uz
/post1
plnsol,u,z
```

Anexo 2 – Tabelas Complementares dos Resultados das Variáveis

As tabelas seguintes demonstram numericamente os resultados obtidos através do ANSYS®. Assim sendo, estarão colocadas segundo as suas variáveis e as posições correspondentes.

1ª Variável de estudo:

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLEXÃO	0,00273	0,00249	0,00240	0,00233	0,00227	0,00220	0,00214	0,00208	0,00201	0,00195	0,00189
TORÇÃO	0,000185	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00016	0,00016

Tabela 11 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 1 dos piezoeléctricos

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLEXÃO	0,00293	0,00272	0,00263	0,00255	0,00248	0,00241	0,00234	0,00228	0,00221	0,00215	0,00209
TORÇÃO	0,00014	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00012

Tabela 12 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 2 dos piezoeléctricos

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLEXÃO	0,00296	0,002752	0,00266	0,00258	0,00251	0,00244	0,00238	0,00231	0,00225	0,00219	0,00213
TORÇÃO	0,000103	9,62E-05	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009

Tabela 13 – Resultados das várias posições para 1º caso para a localização 3 dos piezoeléctricos

2ª Variável de estudo:

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLEXÃO	0,00250	0,002346	0,00227	0,00220	0,00214	0,00208	0,00202	0,00196	0,00190	0,00185	0,00179
TORÇÃO	0,000159	0,000152	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00014

Tabela 14 – Resultados das diversas disposições para a 1ª posição para o 2º caso

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLEXÃO	0,00272	0,002586	0,00251	0,00243	0,00237	0,00230	0,00224	0,00217	0,00211	0,00205	0,00199
TORÇÃO	0,000121	0,000116	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011	0,00011

Tabela 15 – Resultados das diversas disposições para a 2ª posição para o 2º caso

3ª Variável de estudo:

Posição / Deformação	1	2	3	4	5
FLEXÃO	0,00184	0,001664	0,00158	0,00153	0,00148
TORÇÃO	0,000122	0,000102	0,00010	0,00009	0,00009

Tabela 16 – Resultados das várias posições para o caso de 2 pzt's orientados a 90º no 3º caso

Posição / Deformação	1	2	3	4	5
FLEXÃO	0,00252	0,002357	0,00228	0,00223	0,00218
TORÇÃO	0,000134	0,000125	0,00012	0,00012	0,00012

Tabela 17 – Resultados das várias posições para o caso de 4 pzt's orientados a 90º no 3º caso

Posição / Deformação	1	2	3	4	5
FLEXÃO	0,00152	0,001306	0,00124	0,00118	0,00113
TORÇÃO	9,1E-05	7,09E-05	0,00007	0,00007	0,00007

Tabela 18 – Resultados das várias posições para o caso de 6 pzt's orientados a 90º no 3º caso

Caso adicional:

Posição / Deformação	1	2	3	4	5	6
FLEXÃO	0,00280	0,002775	0,00272	0,00266	0,00261	0,00256
TORÇÃO	0,000192	0,000152	0,00014	0,00014	0,00014	0,00014

Tabela 19 – Resultados das várias posições para o caso adicional

Anexo 3 – Propriedades dos piezoeléctricos BM 500 fornecidas pelo fabricante, Sensortech

SENSOR — Sensor Technology Limited

BM500 - Lead Zirconate Titanate — **PIEZOELECTRIC MATERIALS**

Features

- High piezoelectric charge coefficient
- High coupling coefficient

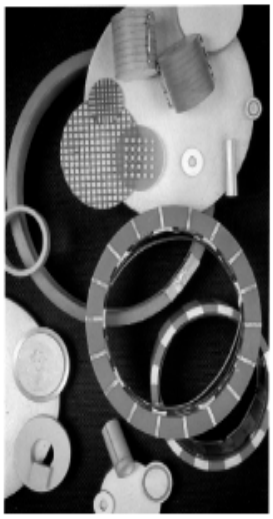
Applications

- Level, flow measurement
- Thickness measurement
- Low power resonators
- Flaw detection (NDE)
- Passive devices
- Accelerometers
- Communication
- Hydrophones
- Depth sounders
- Linear arrays
- Sonobuoys
- Transducers
- Actuators

Overview

BM500 series ceramics are lead zirconate titanates with high coupling coefficients and piezoelectric charge coefficient.These materials find application in passive devices and low-power resonators.

PROPERTY	SYMBOL	BM500	UNITS
Electrical [1]			
Relative Dielectric Constant	K_{33}^T	1750	—
Dissipation Factor	$Tan\ \delta$	1.6	%
Piezoelectric			
Coupling Factor	k_p	.62	—
	k_{31}	.37	—
	k_{33}	.72	—
Charge Constant	d_{31}	-175	10^{-12} C/N
	d_{33}	365	10^{-12} C/N
Voltage Constant	g_{31}	-11.5	10^{-3} Vm/N
	g_{33}	25	10^{-3} Vm/N
Mechanical Quality Factor	Q_M	80	—
Frequency Constants [2]	N_p	2050	Hz.m
	N_1	1400	Hz.m
	N_4	1800	Hz.m
Elastic Modulus			
Compliance	S_{11}^E	15.5	10^{-12} m²/N
	S_{33}^E	19.0	10^{-12} m²/N
Density	ρ	7.65	g/cm³
Curie Temperature	T_c	360	°C
Ageing Characteristics [3] (% change/time decade)			
Coupling Factor	k_p	-0.5	—
Dielectric Constant	k_{33}^T	-1.0	—
Frequency Constant	N_p	0.5	Hz.m



Notes:

1 Low field parameters; measured at 1kHz

2 N_P - Planar
N_1 - Longtitudinal
N_4 - Thickness

3 Reference point of time; 24 hours after polarization

ISO 9001:2000 REGISTERED

20 Steward Rd, Collingwood, ON, Canada L9Y 4K1
Tel: (705) 444-1440 Fax: (705) 444-6787
www.sensortech.ca techsupport@sensortech.ca