

Ricardo Cesare Román Amigo

**Otimização e Fabricação de Dispositivos
Piezelétricos com Gradação Funcional de
Material**

São Paulo
2013

Ricardo Cesare Román Amigo

Otimização e Fabricação de Dispositivos Piezelétricos com Gradação Funcional de Material

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

São Paulo
2013

Ricardo Cesare Román Amigo

Otimização e Fabricação de Dispositivos Piezelétricos com Gradação Funcional de Material

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de março de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Amigo, Ricardo Cesare Román

Otimização e fabricação de dispositivos piezelétricos com gradação funcional de material / R.C.R. Amigo. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.

91 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Métodos topológicos (Otimização) 2. Atuadores piezelétricos 3. Sensores 4. Sinterização I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

Agradecimentos

Ao orientador, Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, por sua contagiante dedicação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro a este trabalho, através de bolsa de mestrado (Processo 558411/2010-0).

À Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado, por me ajudar na prática.

Aos amigos do Laboratório de Ultrassom, Fausto, Marco, Nico, Timóteo e Wellington pela ajuda constante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos otimizadores Bencho, César, Douglas, Flávio, Lance, Luís, Ronny, Sandro e Teves, por serem os únicos que sabiam do que eu estava falando em boa parte destes últimos anos.

Aos vizinhos de laboratório, Barazani, Chaves, Erick, João e Lucas, pelos momentos de extensão acadêmica.

Ao Karatê Poli-USP, que tornou minha relação com a Escola Politécnica muito mais intensa.

À minha mãe e às minhas irmãs, Carolina e Cristina, por serem minha família.

Ao meu pai, que continua me inspirando a tentar deixar o mundo melhor do que eu recebi.

Resumo

Cerâmicas piezelétricas possibilitam posicionamento e sensoriamento de precisão ou captação de energia mecânica valendo-se do efeito piezelétrico, capaz de converter energia mecânica em elétrica ou o contrário. Para aprimorar ou estender as aplicações dessas cerâmicas, mecanismos flexíveis podem ser acoplados a elas, formando um Dispositivos Piezelétricos Flexionais (DPF). No projeto desse tipo de estrutura, o conceito de Material com Gradação Funcional (MGF) é interessante, já que esses materiais apresentam variações graduais de suas propriedades efetivas, permitindo a alternância entre um material mais flexível e um mais rígido de acordo com a intensidade de deslocamento desejada em cada região da estrutura. Assim, neste trabalho, implementa-se o Método de Otimização Topológica (MOT) no projeto de estruturas gradadas com o intuito de identificar as vantagens e desvantagens da utilização do conceito de MGF em DPF. Esse método combina algoritmos de otimização e o Método dos Elementos Finitos (MEF) para distribuir material dentro de um domínio fixo através de um modelo de material, que no caso estudado é o de Material Isotrópico Sólido com Penalização (MISP) adaptado a MGF. Na fabricação desses dispositivos otimizados, utiliza-se a Sinterização por Jato de Plasma (SJP) para a obtenção de tarugos gradados que são submetidos a processos de eletro-erosão e de corte a laser. Por fim, para a verificação dos resultados numéricos, utiliza-se um vibrômetro para aferir os deslocamentos dos protótipos de atuadores fabricados. Os resultados demonstram que o MOT é adequado ao projeto de dispositivos piezelétricos gradados e que, pela sua implementação, mecanismos com gradação funcional de material apresentam ganhos significativos em desempenho quando comparados aos análogos constituídos por materiais homogêneos. Além disso, o processo de fabricação proposto se mostra viável, possibilitando a obtenção de protótipos que se comportam conforme esperado.

Palavras-chave: Atuadores Piezelétricos. Materiais com Gradação Funcional. Método de Otimização Topológica. Sinterização por Jato de Plasma.

Abstract

Piezoelectric devices enable precision positioning and sensing or mechanical energy harvesting based on the piezoelectric effect. In flextensional piezoelectric devices, flexible coupling structures are attached to ceramics to improve or extend the application possibilities. On the design of this kind of structure, the concept of Functionally Graded Materials (FGM) can be interesting, since it allows gradual variations of its effective properties along some direction by mixing two or more materials. Thus, in order to identify the advantages and disadvantages of using FGM, graded flexible coupling structures that maximize the performance of piezoelectric devices are obtained by implementing the Topology Optimization Method (TOM). This method combines optimization algorithms and the Finite Element Method (FEM) to distribute material inside a fixed domain. In this work, the formulation is based on the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) material model adapted for the FGM concept, which can represent continuous change in material properties along the domain. Resulting optimal graded topologies of coupling structures are presented and compared with homogeneous structures. Finally, graded devices are manufactured through Spark Plasma Sintering (SPS) technique in order to be characterized, validating numerical results. The numerical results demonstrate the TOM efficacy in designing functionally graded piezoelectric devices and show, by its implementation, significant gains in graded mechanisms performance when compared with analogous homogeneous. Furthermore, the feasibility of proposed manufacturing process is confirmed, allowing the fabrication of prototypes with expected behavior.

Keywords: Piezoelectric Actuators. Functionally Graded Material. Topology Optimization Method. Spark Plasma Sintering.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

1	Introdução	1
1.1	Dispositivos Piezelétricos	1
1.1.1	Aplicações de Dispositivos Piezelétricos	1
1.1.2	Projeto de Dispositivos Piezelétricos com Gradação Funcional de Material	2
1.1.3	Fabricação de Peças com Gradação Funcional de Material	4
1.2	Objetivos	6
1.3	Justificativa	7
1.4	Organização do Texto	7
2	Projeto de Dispositivos Piezelétricos Gradados	8
2.1	Métodos de Otimização Estrutural	8
2.2	Método de Otimização Topológica	10
2.2.1	Modelo de Material	10
2.2.2	Escala de Cinza	11
2.2.3	Instabilidade de Tabuleiro e Dependência de Malha	12
2.3	Projeto de Dispositivos com Gradação Funcional de Material	14
2.3.1	Projeto de Atuadores Piezelétricos	15

2.3.2	Projeto de Sensores Piezelétricos	16
3	Implementação Numérica	18
3.1	Aspectos Numéricos da Implementação do MOT	18
3.1.1	Aproximação Contínua da Distribuição de Material	18
3.1.2	Linearização das Funções-Objetivo e das Restrições	18
3.2	Procedimento de Otimização	19
3.3	Otimização de Atuadores Piezelétricos	20
3.3.1	Formulação Discreta	20
3.3.2	Análise de Sensibilidades	21
3.4	Otimização de Sensores Piezelétricos	23
3.4.1	Formulação Discreta	23
3.4.2	Análise de Sensibilidades	24
4	Fabricação, Caracterização e Verificação Experimental	25
4.1	Sequência de Atividades para a fabricação de dispositivos piezelétricos gradados	25
4.2	Método Ultrassônico de Caracterização de Materiais	26
4.3	Estimativa das Propriedades Elásticas de Gradações Funcionais	28
4.4	Processo de Fabricação de Dispositivos com Gradação Funcional de Material	30
4.5	Método de Verificação Experimental de Atuadores Piezelétricos	32
5	Resultados Numéricos e Discussões	34
5.1	<i>Moonie</i> Piezelétrico	34
5.1.1	Otimização com Restrições de Volume e Manufatura	34
5.1.2	Otimização sem Restrições de Volume e Manufatura	37
5.1.3	Discussão	40
5.2	Garra Piezelétrica	41
5.2.1	Otimização com Restrições de Volume e Manufatura	41
5.2.2	Otimização sem Restrições de Volume e Manufatura	44

5.2.3	Discussão	47
5.3	Sensor de Força Piezelétrico	47
5.3.1	Otimização com Restrições de Volume e Manufatura	49
5.3.2	Otimização sem Restrições de Volume e Manufatura	50
5.3.3	Discussão	54
6	Resultados Experimentais e Discussões	57
6.1	Protótipos com Formas Arbitrárias	57
6.1.1	Fabricação	57
6.1.2	Discussão	58
6.2	Gradação Cobre-Níquel	58
6.2.1	Fabricação	59
6.2.2	Caracterização	60
6.2.3	Discussão	60
6.3	Protótipo de Atuador Piezelétrico	61
6.3.1	Fabricação	61
6.3.2	Verificação Experimental	63
6.3.3	Discussão	65
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	67
7.1	Conclusões	67
7.2	Trabalhos Futuros	68
	Referências	69
	Apêndice A – Piezeletricidade	75
	Apêndice B – Método dos Elementos Finitos Piezelétrico	78
B.1	Princípio Variacional Piezelétrico	78
B.2	Estado Plano de Tensões Mecânicas	80

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

