

HUMBERTO FERREIRA VINHAIS

PROJETO OTIMIZADO DE UM MICROMOTOR ELETROSTÁTICO

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

São Paulo
2005

HUMBERTO FERREIRA VINHAIS

PROJETO OTIMIZADO DE UM MICROMOTOR ELETROSTÁTICO

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

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Emilio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2005

*Em memória ao meu pai,
Manuel dos Santos Moura Vinhais.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Emilio Carlos Nelli Silva, por todo seu apoio, paciência e ajuda em todos os momentos deste trabalho e, principalmente, por ser um verdadeiro exemplo, como professor e como pessoa.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo apoio financeiro deste trabalho, através de uma bolsa de mestrado.

Ao LNLS (Laboratório Nacional Luz Síncrotron) pelo suporte dado na fabricação de protótipos em seu Laboratório de Microfabricação. Agradeço também aos seus funcionários e, em especial, à Maria Helena e ao Ângelo Gobbi, que ajudaram a conduzir todo processo de fabricação.

Ao CCS (Centro de Componentes Semicondutores) da UNICAMP, pelo auxílio na fabricação de fotolitos.

A todos os meus colegas do departamento, que me ajudaram a solucionar e corrigir vários problemas: Cícero de Lima, Fernando Stump e Ronny Carbonari. Agradeço especialmente ao Paulo Godoy, que pacientemente me ajudou e acompanhou todo o processo de fabricação dos protótipos.

À minha mãe e ao meu irmão, que tanto me ajudaram em momentos difíceis.

A todos os meus amigos da Escola Politécnica, que sempre estiveram do meu lado.

E, por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo o estudar e desenvolver um projeto otimizado de micromotor eletrostático. Esse projeto foi desenvolvido em três perspectivas: simulação computacional, microfabricação e desenvolvimento de um software em linguagem C para realizar o projeto otimizado de um micromotor eletrostático aplicado para MEMS usando o Método de Otimização Topológica (MOT). Em um motor eletrostático, essencialmente, as cargas elétricas induzidas no rotor são atraídas pelas cargas elétricas do estator, dando origem à força eletrostática que cria o torque do motor. A partir de 1980, com o advento da tecnologia de microfabricação de MEMS (do inglês *Microelectromechanical Systems*), esses motores ganharam uma nova perspectiva internacional. Os micromotores vêm sendo pesquisados atualmente em diversos campos da Engenharia (no desenvolvimento de micro-válvulas, micro-bombas, micro-sensores, etc), no entanto, existem poucos estudos na literatura quanto ao projeto desses motores através de meios computacionais e matemáticos, com o objetivo de otimizar aspectos de projeto, como, por exemplo, seu torque. Dessa forma, para o desenvolvimento do projeto otimizado de um micromotor eletrostático, primeiramente foram realizadas simulações computacionais usando o Método de Elementos Finitos (MEF) para caracterização do micromotor e para a análise da influência de seus parâmetros de projeto no torque desenvolvido, com o objetivo de se determinar configurações que geram torque máximo do micromotor. Em seguida, o resultado dessas simulações foi considerado para o planejamento e a fabricação de protótipos em micro-escala, usando técnicas de microfabricação. Por fim, técnicas de otimização foram usadas para se obter a geometria otimizada do rotor do motor eletrostático de forma a maximizar o torque final.

ABSTRACT

This work has the objective of studying and developing an optimized design of an electrostatic side-drive micromotor. This work is divided in three different steps: computational simulation, microfabrication and development of a software in C language to optimize a MEMS electrostatic micromotor design using the Topology Optimization Method (TOM). In an electrostatic side-drive motor, essentially, the induced electric loads in the rotor are attracted by electric loads of the stator, generating an electrostatic force that creates a mechanical torque in the rotor of the micromotor. After 1980, electrostatic motors have gained a new international perspective with the technology of micromanufacturing of MEMS (Micro-Electromechanical systems). Micromotors have become more popular in scientific researches in diverse fields of Engineering (developing micro-valves, micro-pumps, micro-sensors, etc), however, there are a few studies in literature about the design of these micromotors using computational and mathematical approaches, with the objective of optimizing quantities, such as, for example, its torque. Thus, to design an optimized electrostatic micromotor, computational simulations, using Finite Element Method (FEM), were performed to characterize the micromotor operation and to analyse the design variables influence in the final torque, with the objective of determining the optimum configurations that drive to the maximum torque in the micromotor. Then, the results of these simulations were considered to design and fabricate microscale prototypes using micromanufacturing techniques. At last, optimization techniques are used in this work to obtain the optimized topology of the rotor of the electrostatic micromotor that maximizes its final torque.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Introdução a MEMS.....	3
1.1.1. Processos de fabricação em MEMS.....	5
1.1.2. Micromotores eletrostáticos x eletromagnéticos para MEMS.....	8
1.2. Motores Eletrostáticos aplicados em MEMS.....	8
1.2.1. Aplicações Recentes para Micromotores Eletrostáticos.....	10
1.3. Objetivos.....	13
1.4. Justificativa.....	13
2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	15
2.1. Introdução ao Método de Elementos Finitos.....	15
2.2. MEF Eletrostático.....	16
2.3. Simulação computacional do micromotor.....	22
3. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	28
3.1. Principais Conceitos de Otimização.....	28
3.1.1. Tipos Básicos de Otimização.....	29
3.1.2. Conceitos de Otimização.....	30
3.1.3. Estrutura de Software de Otimização.....	32
3.2. Teoria de Otimização Topológica.....	33
3.2.1. Histórico da Otimização Topológica.....	34
3.2.2. Principais Conceitos da Otimização Topológica.....	37
3.2.3. Método das Densidades (ou SIMP).....	40
3.2.4. Problema da Instabilidade de Xadrez.....	42
3.2.5. Estrutura de Software de Otimização Topológica.....	44
3.3. Otimização Topológica aplicada ao projeto de micromotor eletrostático.....	44

3.3.1.	Solução do problema de otimização topológica	49
3.3.2.	Análise de sensibilidade.....	52
3.3.3.	Filtro para solução da instabilidade xadrez.....	58
4.	MICROFABRICAÇÃO APLICADA A MICROMOTORES	62
4.1.	Introdução à microfabricação de micromotores	62
4.1.1.	Princípios da Fotolitografia por UV	62
4.1.2.	Fotolitos de Emulsão por Fotorredução e Fotorrepetição.....	64
4.1.3.	Princípios da Eletrodeposição.....	65
4.2.	Processo de Microfabricação	66
4.3.	Estudo de projetos de micromotores.....	71
4.4.	Tecnologia de polisilício x eletrodeposição.....	74
4.5.	Aspectos construtivos que influenciam na dinâmica do micromotor	76
5.	IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA	80
5.1.	Estrutura do software de MOT	80
5.2.	Características do software de MOT	85
5.3.	Interface do software	87
6.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MICROMOTOR.....	91
6.1.	Primeiro Modelo de MEF	92
6.2.	Segundo Modelo de MEF	113
6.3.	Terceiro Modelo de MEF	124
6.4.	Quarto Modelo de MEF	153
6.5.	Conclusões Finais	166
7.	RESULTADOS DA MICROFABRICAÇÃO	171
7.1.	Projeto dos protótipos e desenho de máscaras da fotolitografia.....	171
7.2.	Fabricação dos protótipos de micromotor	175
8.	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	188
8.1.	Otimização de micromotor 16:4	191
8.2.	Otimização de micromotor 12:8	196
8.3.	Simulações do Resultado Final.....	201

8.3.1.	Simulação do Rotor com Potencial Elétrico Flutuante.....	202
8.3.2.	Simulação do Rotor com Potencial Elétrico Aplicado	204
9.	CONCLUSÃO.....	207
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209
	APÊNDICE A.....	215
	APÊNDICE B.....	217
	APÊNDICE C.....	220
	APÊNDICE D.....	222
	ANEXO A	223
	ANEXO B	224
	ANEXO C	225
	ANEXO D	226
	ANEXO E	228
	ANEXO F.....	229

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A “roda elétrica” de Benjamin Franklin, 1748.	1
Figura 2 - Interação e cargas eletrostáticas entre o rotor e o estator.....	1
Figura 3 - Menor motor eletrostático do mundo.....	3
Figura 4 – Exemplos de sistemas micro-eletromecânicos.	3
Figura 5 - Processos de fabricação.	6
Figura 6 – Exemplo de Micro-usinagem de superfície.....	8
Figura 7 - Alguns exemplos de motores encontrados na literatura.....	9
Figura 8 - Micromotor utilizado em <i>scanner</i> de alta precisão.....	11
Figura 9 - Esquema do micromotor utilizado no endoscópio.....	12
Figura 10 - Micromotor usado para armazenagem de informação.....	12
Figura 11 - Transformação de elemento isoparamétrico.	19
Figura 12 - Força eletrostática em 4 dentes do rotor.	24
Figura 13 - Situação das forças normais durante o funcionamento do micromotor.	25
Figura 14 - Força axial resultante no micromotor.	26
Figura 15 - Tipos de otimização estrutural: (a) otimização paramétrica; (c) otimização de forma; (e) otimização topológica.	29
Figura 16 - Possíveis variáveis de projeto.	31
Figura 17 - Estrutura lógica de um software de otimização.	33
Figura 18 – Modelo de material de microestrutura para o método da homogeneização.....	39
Figura 19 – Instabilidade xadrez para um exemplo de OT estrutural.....	42
Figura 20 - Arranjos de “tabuleiro de xadrez” e de material distribuído uniformemente.	43
Figura 21 - Estrutura lógica de um software de otimização topológica.	44
Figura 22 – Domínio de projeto do micromotor para a Otimização Topológica	45
Figura 23 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B.	45
Figura 24 - Comportamento da permissividade do material ϵ_i com a variação do expoente de penalização n (considerando $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ e $\epsilon_r=10$)......	48
Figura 25 - Exemplo de projeto de micromotor eletrostático usando o MOT.....	49
Figura 26 – Limites móveis.	51
Figura 27 - Raio de abrangência nos filtros espaciais.	60

Figura 28 - Exemplo de máscaras para projeto de micromotor (FRANGOULT, 1994): trilha (à esquerda) e estrutura do motor (à direita).	63
Figura 29 - Equipamento de fotorredução, à esquerda, e de fotorrepetição, à direita (LARA, 2001).	65
Figura 30 - Montagem da eletrodeposição do Níquel.....	66
Figura 31 - Seção transversal da estrutura da trilha, do eixo e do estator do micromotor durante o processo de fabricação.	67
Figura 32 - Exemplo de moldes de resiste SU8 do projeto de micromotor da referência CHIEN-HUNG (2002).	69
Figura 33 - Exemplos de problemas na remoção do molde de resiste (CHIEN-HUNG, 2002).	69
Figura 34 - Seção transversal da estrutura do rotor do micromotor durante o processo de fabricação.	70
Figura 35 - Esquema de corte transversal desse motor de MOURLAS (1996).	72
Figura 36 – Foto do micromotor de TAVROW (1991).	73
Figura 37 - Foto do motor fabricado em BART (1992).	73
Figura 38 - Formatos de <i>bushing</i> encontrados na literatura.	78
Figura 39 - Organograma das atividades e do funcionamento do programa desenvolvido.	81
Figura 40 - Janela do programa de interface com explicação de seus elementos gráficos.	89
Figura 41 - Transformação de coordenadas para a tela de visualização da interface.	90
Figura 42 - Esquema de entrada de dados na simulação.	91
Figura 43 - Defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator.	91
Figura 44 - Um modelo de MEF tridimensional com desalinhamento máximo.	93
Figura 45 - Distribuição de potencial elétrico nodal no modelo de MEF.	95
Figura 46 - Distribuição de campo elétrico nodal no modelo de MEF.	95
Figura 47 - Resposta vetorial do campo elétrico (à esquerda) e resposta vetorial da força eletrostática (à direita)	95
Figura 48 - Distribuição do campo elétrico vetorial em todos os casos de desalinhamento no modelo padrão antes de se completar o <i>switching</i>	96
Figura 49 – Nível P dos elementos entre o par pólo/dente no desalinhamento máximo.	97

Figura 50 - Distribuição do campo elétrico no alinhamento (à esquerda) e distribuição das forças eletrostáticas (à direita).....	97
Figura 51 - Gráfico do torque do motor do modelo padrão.....	98
Figura 52 - Gráfico do torque para variação do raio do rotor.....	99
Figura 53 - Torque máximo em função da variação do raio do rotor.....	100
Figura 54 - Gráfico do torque para variação do <i>gap</i> do motor.....	100
Figura 55 - Torque máximo em função da variação do <i>gap</i> entre rotor e estator.....	101
Figura 56 - Interações eletrostáticas entre pólos e dentes ativos e inativos.....	102
Figura 57 - Superposição angular no desalinhamento máximo.....	102
Figura 58 - Gráfico do torque para variação da largura do conjunto dente/pólo.....	103
Figura 59 - Torque máximo em função da largura do conjunto dente/pólo.....	104
Figura 60 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor.....	104
Figura 61 - Primeiro alinhamento de faces do micromotor com largura de dentes e de pólos diferentes.....	105
Figura 62 - Caso de defasagem máxima maior devido a problemas após o primeiro alinhamento.....	106
Figura 63 - Gráfico do torque para variação da espessura do motor.....	107
Figura 64 - Torque máximo do micromotor em função da espessura.....	107
Figura 65 - Curva de torque do modelo padrão para 10V, 50V e 100V aplicados.....	108
Figura 66 - Torque máximo do micromotor em função da voltagem aplicada.....	108
Figura 67 - Forças tangencial e normal em um dente ativo usando o modelo padrão..	109
Figura 68 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido.....	110
Figura 69 - Segundo modelo de elementos finitos (com aplicação de voltagem somente nos pólos).....	114
Figura 70 - Distribuição de potencial elétrico nodal no novo modelo de MEF.....	114
Figura 71 - Distribuição de campo elétrico nodal no novo modelo de MEF.....	115
Figura 72 - Curva padrão para o novo modelo de MEF do micromotor.....	115
Figura 73 - Torque máximo em função do raio do rotor no segundo modelo.....	116
Figura 74 - Torque máximo em função do <i>gap</i> entre rotor e estator.....	117
Figura 75 - Torque final em relação à largura do conjunto dente/pólo.....	118
Figura 76 - Região angular do campo elétrico gerado no segundo modelo de MEF. ..	118
Figura 77 - Torque máximo em função da espessura do modelo.....	119

Figura 78 - Torque máximo em função da altura do pólo do estator.....	120
Figura 79 - Torque final em função da voltagem aplicada.	120
Figura 80 - Curvas das resultantes das forças normal e tangencial no dente do rotor..	121
Figura 81 - Comparação das resultantes de forças nos dois modelos: força tangencial, à esquerda, e força normal, à direita.	121
Figura 82 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido para o segundo modelo.	122
Figura 83 - Nova geometria do micromotor.	124
Figura 84 - Parâmetros de projeto para nova geometria de micromotor.	125
Figura 85 - Definição do pólo do rotor e do dente do estator no terceiro modelo de MEF.	126
Figura 86 - Vista total do terceiro modelo de MEF para o micromotor.	126
Figura 87 - Terceiro modelo de MEF: vista da região do dente, à esquerda, e vista da região do pólo, à direita.	127
Figura 88 - Distribuição do potencial elétrico nodal no terceiro modelo: na vista da região do dente, à esquerda, e na vista da região do pólo, à direita.....	128
Figura 89 - Distribuição do campo elétrico vetorial, à esquerda, e distribuição das forças elétricas vetoriais no dente do rotor, à direita.	128
Figura 90 – Nível P dos elementos entre o par pólo/dente no desalinhamento máximo.	129
Figura 91 - Gráfico da curva padrão torque do motor do terceiro modelo.	130
Figura 92 - Curva da força axial no modelo padrão (do terceiro modelo).	132
Figura 93 - Gráfico do torque na variação do raio do rotor, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.	133
Figura 94 - Gráfico da força axial na variação do raio do rotor.	134
Figura 95 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do raio do rotor.....	134
Figura 96 - Gráfico do torque na variação do <i>gap</i> entre rotor e estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.....	136
Figura 97 - Gráfico da força axial na variação do <i>gap</i> entre rotor e estator.	136
Figura 98 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do <i>gap</i> entre rotor e estator.	137

Figura 99 - Gráfico do torque na variação da largura do conjunto dente/pólo, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.....	138
Figura 100 - Gráfico da força axial na variação da largura do conjunto dente/pólo. ...	139
Figura 101 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da largura do conjunto dente/pólo.	139
Figura 102 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor... ..	140
Figura 103 - Gráfico da força axial para variação da largura somente do dente do rotor.	141
Figura 104 - Gráfico do torque na variação da espessura do estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.....	141
Figura 105 - Gráfico da força axial na variação da espessura do estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.....	142
Figura 106 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da espessura do estator.	142
Figura 107 - Gráfico do torque na variação da espessura do rotor.	143
Figura 108 - Gráfico da força axial na variação da espessura do rotor, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.....	144
Figura 109 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da espessura do rotor.	144
Figura 110 - Gráfico do torque para variação da voltagem aplicada.....	145
Figura 111 - Gráfico da força axial para variação da voltagem aplicada.	145
Figura 112 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da voltagem aplicada.	146
Figura 113 - Gráfico do torque para variação do comprimento de superposição.....	147
Figura 114 - Gráfico da força axial para variação do comprimento de superposição. .	148
Figura 115 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do comprimento de superposição.	148
Figura 116 - Forças tangencial e normal do modelo padrão (com 80% de superposição).	149
Figura 117 - Gráficos da força tangencial, à esquerda, e da força normal, à direita, para cada caso de superposição.	150

Figura 118 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido no eixo do rotor.....	150
Figura 119 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido na superfície inferior do rotor.....	151
Figura 120 - Vista total do quarto modelo de MEF para o micromotor.	154
Figura 121 - Quarto modelo de MEF: vista da região do dente, à esquerda, e vista da região do pólo, à direita.	154
Figura 122 - Distribuição de potencial elétrico no quarto modelo de MEF.	155
Figura 123 - Distribuição do campo elétrico vetorial, à esquerda, e distribuição das forças elétricas vetoriais no dente do rotor, à direita.	155
Figura 124 - Nível P dos elementos do quarto modelo de MEF no desalinhamento máximo.	156
Figura 125 - Curva de torque desenvolvido no modelo padrão do quarto modelo de MEF.	156
Figura 126 - Curva padrão da força axial para o quarto modelo de MEF.	157
Figura 127 - Comparação do torque e da força axial entre o terceiro e o quarto modelos de MEF.	158
Figura 128 - Comparação do torque entre o segundo e o quarto modelos de MEF.	159
Figura 129 - Influência do raio do rotor no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.....	159
Figura 130 - Influência do <i>gap</i> entre rotor e estator no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.....	160
Figura 131 - Influência da largura do conjunto dente/pólo no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.....	161
Figura 132 - Influência da espessura do rotor no torque desenvolvido.	162
Figura 133 - Influência da voltagem elétrica aplicada no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.....	162
Figura 134 - Influência do comprimento de superposição no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para o quarto modelo.....	163
Figura 135 - Forças tangencial e normal do quarto modelo (com 80% de superposição).	164

Figura 136 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido no eixo do rotor.....	164
Figura 137 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido na superfície inferior do rotor.....	165
Figura 138 - Esquema de construção dos desenhos das máscaras.....	171
Figura 139 - Desenho dos 51 tipos diferentes de rotores propostos nesse projeto.	174
Figura 140 - Desenho dos 12 tipos diferentes de conjuntos eixo/estator propostos nesse projeto.	174
Figura 141 - Desenho da máscara das trilhas de circuito elétrico dos protótipos desse projeto.	175
Figura 142 - Equipamentos usados no LNLS para deposição do molde de resiste.	176
Figura 143 - Equipamentos usados no LNLS para eletrodeposição das estruturas metálicas do micromotor.	176
Figura 144 - Equipamentos usados no LNLS para monitoramento das estruturas.....	177
Figura 145 - Resultado de problema de descolamento do molde de resiste na placa da fabricação do rotor.	178
Figura 146 - Nova seqüência para microfabricação dos rotores.....	178
Figura 147 - Foto da etapa de remoção da camada de sacrifício na nova seqüência de fabricação dos rotores.	179
Figura 148 - Problema de dissolução do SU-8 na estrutura do estator s702025.	179
Figura 149 - Fabricação do protótipo de rotor r352020g4: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de Níquel.	180
Figura 150 - Fabricação do protótipo de estator s702525: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de Níquel finalizada sobre a trilha elétrica.	181
Figura 151 - Foto da placa final da estrutura do motor.	181
Figura 152 - Foto da estrutura do eixo e de <i>bushing</i> da trilha t5045 e do estator s501015.	182
Figura 153 - Foto da estrutura final do micromotor no caso de estator s501020se e rotor r401520.	182
Figura 154 - Foto de microscópio eletrônico do estator s501515.....	183
Figura 155 - Foto de microscópio eletrônico com dimensões do estator s501515.....	183
Figura 156 - Detalhes do eixo, à esquerda, e do pólo do estator, à direita.	184

Figura 157 - Foto de microscópio eletrônico do estator s501020.....	185
Figura 158 - Foto de microscópio eletrônico da montagem do estator s451520 e rotor r301020.	185
Figura 159 - Detalhes de construção do rotor r301020.	186
Figura 160 - Foto de microscópio eletrônico do modelo com estator s451520 e rotor r301020, sob vista superior.	186
Figura 161 - Foto de microscópio eletrônico da montagem do estator s451520 e rotor r301020, sob vista diagonal.	187
Figura 162 - Domínios de projeto discretizado para o MOT (à esquerda, de baixa resolução e, à direita, de alta resolução).	188
Figura 163 - Diferença do uso do filtro no processo de otimização.	191
Figura 164 – Formato do rotor do micromotor durante 50 iterações de otimização. ...	192
Figura 165 – Gráficos que mostram os resultados da otimização topológica do rotor com restrição de 50% de volume: a) o volume; b) a função objetivo; e c) a convergência.	192
Figura 166 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.	193
Figura 167 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.	193
Figura 168 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.	193
Figura 169 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.	194
Figura 170 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.	194
Figura 171 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.	194
Figura 172 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume.	195
Figura 173 - Domínio de MOT do micromotor 12:8.....	196
Figura 174 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B, para o micromotor 12:8.	196

Figura 175 - Gráficos que mostram os resultados do MOT do rotor do micromotor 12:8 com restrição de 50% de volume: a) o volume; b) a função objetivo; e c) a convergência.	197
Figura 176 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.	198
Figura 177 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.	198
Figura 178 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.	198
Figura 179 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.	199
Figura 180 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.	199
Figura 181 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.	199
Figura 182 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume para o micromotor 12:8.	200
Figura 183 - Montagem de um rotor com 8 dentes a partir do modelo otimizado com 70% de volume.	201
Figura 184 – Dimensões do rotor do micromotor 12:8 otimizado com 70% de volume.	202
Figura 185 - Modelo de MEF para o micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.	203
Figura 186 - Distribuição do campo elétrico no modelo de MEF do micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.	203
Figura 187 - Curva de torque do modelo otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.	204
Figura 188 - Modelo de MEF para o micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.	205
Figura 189 - Distribuição do campo elétrico no modelo de MEF do micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.	205

Figura 190 - Curva de torque do modelo otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.....	206
Figura 191 - Malha de MEF quadrada usada nessa comparação.....	217
Figura 192 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).....	218
Figura 193 - Malha de MEF circular usada nessa comparação.	218
Figura 194 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).....	219
Figura 195 - Modelo de finitos do ANSYS para interpretação dos eletrodos no programa desenvolvido.	220
Figura 196 - Imposição de voltagem e carga elétrica padronizada para o caso A (à esquerda) e para o caso B (à direita).....	221
Figura 197 - Mudança de coordenadas no plano $z=0$	222

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre o processo de fotorredução e fotorrepetição.....	65
Tabela 2 – Dimensões do micromotor de YASSEEN (1999a).....	72
Tabela 3 – Dimensões do micromotor de TAVROW (1991),.....	73
Tabela 4 – Dimensões do micromotor de BART (1992).....	74
Tabela 5 – Comparação entre a tecnologia de Polissilício e eletrodeposição de metais..	75
Tabela 6 – Comparação entre Polissilício e Níquel.	75
Tabela 7 – Valores dos parâmetros do modelo padrão nas análises.	94
Tabela 8 - Resumo dos resultados das simulações.	112
Tabela 9 - Resumo dos resultados das simulações para o segundo modelo.	123
Tabela 10 – Valores padrões dos parâmetros do terceiro modelo de MEF nas análises.	130
Tabela 11 - Resumo dos resultados de torque desenvolvido para o terceiro modelo...	152
Tabela 12 - Resumo dos resultados de força axial para o terceiro modelo.	152
Tabela 13 - Resumo dos resultados de torque desenvolvido para o terceiro modelo...	165
Tabela 14 - Resumo dos resultados de força axial para o terceiro modelo.	166
Tabela 15 - Variação dos valores dos parâmetros dos protótipos.....	172
Tabela 16 – Parâmetros usados no processo de Otimização Topológica.	189

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

12:8	12 pólos do estator e 8 dentes do rotor
16:4	16 pólos do estator e 4 dentes do rotor
ANSYS	Software Comercial de Elementos Finitos
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AutoCAD	Software Comercial de Engenharia
AutoLISP	Linguagem de Programação do AutoCAD
AZ-4620	Tipo de Resiste Positivo
C	Linguagem de programação
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM350	Software Comercial de CAE
CCS	Centro de Componentes Semicondutores
CI	Circuito Integrado
COBEM2005	Conferência Brasileira de Engenharia Mecânica de 2005
DSPLP	Rotina de programação linear que usa o método de Kamarkar
DWG	Extensão de Arquivos de projeto em CAD
Eq.	Equação
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GIF	<i>Graphics Interchange Format</i>
HD	<i>Hard Disk</i>
LIGA	<i>Lithographie, Galvanoformung, Abformung</i>
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
MATLAB	Software Comercial Matemático
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MEMS	<i>Micro-Electromechanical Systems</i>
MIS	<i>Minimally Invasive Surgery</i>
MOT	Método de Otimização Topológica
OT	Otimização Topológica

PCB	Extensão de Arquivos de projeto em CAE
PL	Programação Linear
PLANE121	Elemento eletrostático bidimensional do ANSYS
PLS	Programação Linear Seqüencial
PSG	<i>Phosphosilicate Glass</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SCREAM	<i>Single Crystal Silicon Reactive Etching And Metallization</i>
SIMP	<i>Simple Isotropic Material with Penalization</i>
SIMPLX	Rotina de Programação Linear que usa o método Simplex
SOLID128	Elemento eletrostático tridimensional do ANSYS
SU-8	Tipo de Resiste Negativo
TOM	<i>Topology Optimization Method</i>
TXT	Extensão de Arquivo Texto
UNICAMP	Universidade de Campinas
UV	Raio Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Vetor de campo elétrico
D	Vetor de deslocamento elétrico
ϵ	Matriz de permissividade elétrica
$\nabla \cdot$	Operador divergente
$\nabla \times$	Operador rotacional
N	Função de forma
V	Vetor de potenciais elétricos
(ξ, η)	Coordenadas relativas do elemento isoparamétrico
J	Matriz Jacobiana
det	Determinante
S	Superfície do elemento
ϵ_0	Permissividade do ar
\mathbf{F}_e^{MX}	Vetor da força eletrostática do elemento
$\mathbf{K}_{\bullet\bullet}$	Matriz de rigidez global do MEF
ϕ	Vetor de potenciais elétricos globais do MEF
Q	Vetor de carga elétrica global do MEF
C	Capacitância
T	Torque desenvolvido do micromotor
F_t	Força tangencial no dente do rotor
F_n	Força normal no dente do rotor
r	Raio do rotor
μ_{tor}	Coefficiente de atrito que gera o contra-torque no rotor
Ω	Domínio estendido fixo de projeto
Ω_D	Região onde há presença de material
$\chi(x)$	Função de distribuição discreta
q	Função qualquer contínua e diferenciável
$C(x)$	Tensor constitutivo do material
C_0	Tensor constitutivo do material base
A_n	Variável de projeto

$\rho(x)$	Função de distribuição contínua de densidades
p	Fator de penalidade
F	Função objetivo
W	Energia mútua do sistema
ν	Domínio do problema de MOT do micromotor
$\nabla\phi$	Potenciais elétricos distribuídos no domínio
$\varepsilon(x)$	Permissividade elétrica contínua
ε_r	Permissividade relativa do material distribuído no rotor
ε_i	Permissividade elétrica de cada elemento
ρ_i	Pseudo-densidade normalizada de cada elemento
N	Número de elementos finitos
n	Expoente de penalização
$F(\rho)$	Função não linear
$f(\rho)$	Função linear
ρ_{\min}^i	Limite móvel mínimo da variável ρ^i
ρ_{\max}^i	Limite móvel máximo da variável ρ^i
$\mathbf{K}_{\bullet\bullet}^*$	Matriz de rigidez modificada pelo método de Dirichlet
\mathbf{Q}^*	Vetor de carga elétrica modificado pelo método de Dirichlet
$\boldsymbol{\varphi}^*$	Vetor de potenciais elétricos modificado pelo método de Dirichlet
V_i	Volume do elemento i
w_i	Pesos filtragem
R_{\max}	Raio de abrangência do filtro
R_{ij}	Distância entre centróides (no filtro)
nv	Número de vizinhos determinados por varredura (no filtro)
Ni	Elemento químico Níquel
e^-	Elétron
G	Valor do <i>gap</i>
T_{visc}	Contra-torque gerado pelo atrito viscoso
η	Viscosidade absoluta do ar
R_0	Raio do rotor
$\dot{\theta}$	Velocidade angular do rotor

H_b	Altura da estrutura do <i>bushing</i>
$[x_M, y_M, z_M]$	Sistema de coordenadas da malha do ANSYS
$[x_1, y_1, z_1]$	Sistema de coordenadas do Flash
$[x_2, y_2, z_2]$	Sistema de coordenadas da Tela de Visualização gerada
$y(x)$	Função qualquer de primeiro ou segundo grau
c_1, c_2	Coefficientes de uma função de primeiro grau
p_1, p_2, p_3	Coefficientes de uma função de segundo grau

1. INTRODUÇÃO

Os motores eletrostáticos foram os primeiros motores elétricos a serem desenvolvidos. O primeiro motor eletrostático foi desenvolvido em 1742 (*Electric Bell*, por Gordon), no século 18. Em 1748, Benjamin Franklin completou seu projeto, chamado “roda elétrica”, que nada mais era que um motor eletrostático (que é mostrado na Figura 1 abaixo). Em seguida, até o começo do século 19, foram desenvolvidos outros modelos de motores eletrostáticos. Entretanto, esses motores exigiam altas voltagens para seu funcionamento, o que limitou muito seu uso prático.

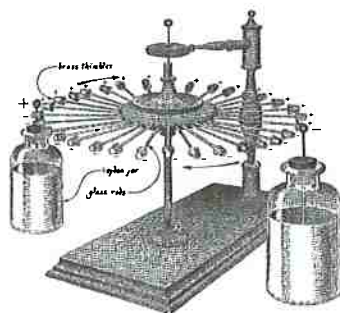


Figura 1 - A “roda elétrica” de Benjamin Franklin, 1748.

O funcionamento da “roda elétrica” de Franklin e de um motor eletrostático comum é basicamente o mesmo. Esse motor baseia-se na força eletrostática criada entre dois pólos opostos, que são representados pelo rotor e pelo estator, como mostra a Figura 2 abaixo.

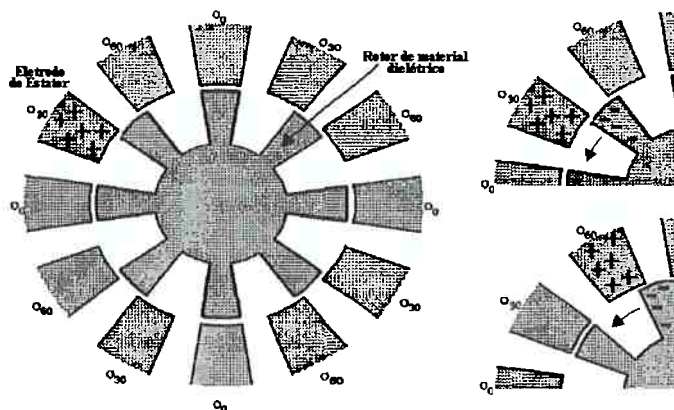


Figura 2 - Interação e cargas eletrostáticas entre o rotor e o estator.

O rotor normalmente é feito de um material dielétrico, no caso da “roda elétrica”, inúmeros “espetos” de vidro conectados entre si. Uma vez que um de seus dentes se aproxima de um dos eletrodos do estator, suas cargas internas se reorganizam, criando uma carga oposta que é atraída para o eletrodo. Em seguida, graças a um circuito elétrico equipado com um seqüenciador, o eletrodo deixa de ser ativo (sua voltagem cai a zero) e seu eletrodo adjacente passa a ser ativo, atraindo o dente do rotor e rotacionando o mesmo (DELFINO,2002 e KUCUKKOMURLER, 2000). Mais adiante esse funcionamento será melhor abordado, uma vez que na literatura existem muitas configurações diferentes de projeto e operação de motores eletrostáticos.

A partir de 1980 esses motores ganharam uma nova perspectiva no meio científico internacional. A atenção de muitos pesquisadores se voltou para a possibilidade de fabricação de micromotores eletrostáticos. Os motivos que levaram os pesquisadores a microfabricação de motores eletrostáticos em vez de outros tipos de motores foram porque os motores eletrostáticos poderiam ser fabricados em duas dimensões (enquanto outros tipos, como eletromagnéticos, precisariam ser fabricados em três dimensões, o que implica em maiores dificuldades de fabricação) e porque sua miniaturização não diminui a densidade de força gerada (enquanto que para motores eletromagnéticos isso acontece) (TAI, 1995).

Dessa forma, com o desenvolvimento de novas técnicas de microfabricação e com o surgimento dos MEMS (*Microelectromechanical Systems*), foram abertas grandes oportunidades para os motores eletrostáticos na microfabricação e na nanotecnologia.

Hoje em dia, essa área de micromotores anda expandindo seus horizontes e diminuindo suas dimensões cada vez mais. Tanto, que em julho de 2003, foi desenvolvido na Universidade da Califórnia o menor motor do mundo (mostrado na Figura 3 a seguir), um motor eletrostático de 500 nanômetros, 300 vezes menor que o diâmetro de um fio de cabelo humano, como encontrado no *site* da Universidade de Berkeley. Seu funcionamento é similar a um motor eletrostático comum: a peça situada no meio do desenho é o rotor e ao seu redor está posicionado o estator com seus eletrodos. De acordo com a ativação dos eletrodos, temos a rotação do rotor.



Figura 3 - Menor motor eletrostático do mundo.

1.1. Introdução a MEMS

MEMS, do inglês *Microelectromechanical Systems* (ou Sistemas Micro-eletromecânicos), são estruturas que possuem dimensões variando de centenas de micra a poucos milímetros, que combinam componentes mecânicos (com ou sem movimento), formando um sistema (ver Figura 4). Tais micro-sistemas podem estar integrados à micro-eletrônica (por exemplo, acelerômetros, sensores de pressão, etc.) ou não (por exemplo, micro válvulas, micro-estruturas como cabeças de impressão de impressoras a jato de tinta, cabeças de leitura de HD, dentre outros).

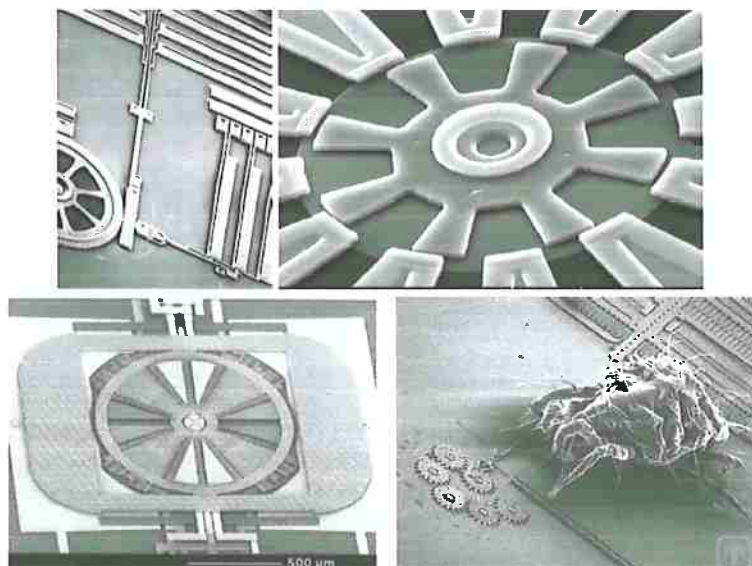


Figura 4 – Exemplos de sistemas micro-eletromecânicos.

O termo “micro-máquinas” (*micromachines*) é muito usado na Ásia, enquanto que os pesquisadores europeus preferem o termo “micro-sistemas” (*microsystems*). Nos EUA a sigla MEMS permanece o termo dominante para referenciar não apenas dispositivos eletro-mecânicos, mas também estruturas micro-usinadas de forma geral. O termo *micromachining*, por sua vez, refere-se às técnicas ou ao processo de micro-usinagem propriamente dito. Embora os micro-sistemas não sejam realmente novos (sensores de pressão miniaturizados datam da década de 60), a nomenclatura utilizada ainda não está padronizada.

No passado, a grande maioria das aplicações para MEMS se limitava ao desenvolvimento de micro-sensores. Recentemente, no entanto, houve um significativo aumento de pesquisas de MEMS relacionadas a micromotores e micro-atuadores envolvendo muitos mecanismos diferentes, como MEMS eletrostáticos, magnetostáticos, piezelétricos e termo-elásticos. Essas novas aplicações apresentam grande apelo comercial, como micro-atuadores aplicados em micro-válvulas e no micro-posicionamento para micro cirurgias (TAI, 1995 e XINLI, 2002).

O crescente interesse de pesquisadores e industriais sobre os micro-sistemas, nesses últimos anos, é facilmente justificado pelos inúmeros dispositivos e aplicações potenciais nas mais diversas áreas emergentes de telecomunicações, automobilística, médica e biomédica. O interesse nessa nova área de desenvolvimento é o mesmo que motivou a evolução dos CIs digitais nas últimas décadas, ou seja, redução de tamanho (peso), melhor desempenho, menor consumo, maior flexibilidade de projeto, além dos menores custos de fabricação para grande escala de produção (RIBAS, 2000).

O mercado mundial de micro-sistemas representava 12 bilhões de dólares e 1,3 bilhões de unidades em 1996, e passou para 34 bilhões de dólares e 5,4 bilhões de unidades no ano de 2002. Hoje o crescimento dos mercados de sensores de pressão e acelerômetros é de 18% e 15%, respectivamente. Sensores de pressão são uma das mais antigas aplicações para MEMS e são utilizados em diversas indústrias como automotiva (sensores de *airbag*), médica (sensor de pressão sanguínea) e aeronáutica (RAÍ-CHOUDHURY, 2000).

1.1.1. Processos de fabricação em MEMS

O grande desafio consiste em fabricar micro-sensores e micro-atuadores sobre um substrato (que é a substância sobre a qual são corroídas, ou depositadas, as micro-estruturas, dependendo do tipo de microfabricação) antes utilizado apenas para a construção de componentes eletrônicos (transistores, diodos, resistores, etc.). Estes dispositivos têm sido construídos principalmente através do uso de micro-estruturas suspensas ou micro-usinadas. As estruturas comumente encontradas são pontes, vigas e membranas, embora outras geometrias possam também ser realizadas para as mais diversas aplicações.

É possível dividir as técnicas de fabricação de micro-estruturas em dois grandes grupos: processos específicos para micro-sistemas e processos compatíveis com a microeletrônica. Os processos específicos para a construção de micro-sistemas, como, por exemplo, o LIGA e o SCREAM (NEUMANN, 2003). As técnicas compatíveis com os processos de fabricação de circuitos integrados (microeletrônica), por sua vez, poderiam ainda ser classificadas segundo as regiões ou camadas que são removidas (corroídas) para a liberação das estruturas suspensas:

- Remoção do substrato pela face anterior ou frontal (*front-side bulk micromachining*, ou Micro-usinagem em Volume do tipo *Front-Side*);
- Remoção do substrato pela face posterior (*back-side bulk micromachining*, ou Micro-usinagem em Volume do tipo *Back-Side*);
- Remoção de camadas sacrificiais da superfície do substrato (*surface micromachining*, ou Micro-usinagem de Superfície).

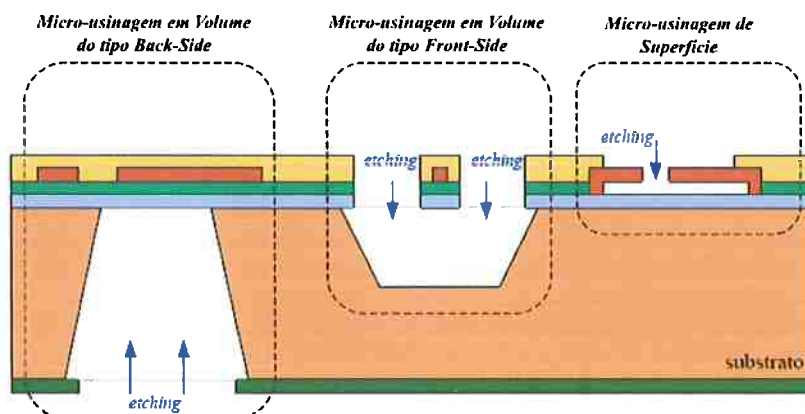


Figura 5 - Processos de fabricação.

Vale destacar que alguns processos, como a Micro-usinagem em Volume do tipo Back-Side, não permitem o uso de Alumina como substrato (que, como será visto mais adiante, é o substrato usado nesse trabalho), fazendo uso, portanto, de Silício como substrato.

A construção de tais estruturas é geralmente feita após a fabricação dos circuitos eletrônicos devido à complexidade dos processos de microeletrônica, enquanto que muitas vezes uma simples etapa de corrosão é suficiente para a liberação das estruturas suspensas. O ato ou etapa de corrosão do material é chamado de *etching*.

Micro-Usinagem em Volume (ou substrato):

Micro-estruturas suspensas são facilmente construídas a partir da corrosão da face anterior e/ou posterior do substrato, chamado de *front-* ou *back-side etching*, respectivamente. As diferenças entre essas duas técnicas de micro-usinagem são bastante acentuadas tanto no processo de fabricação quanto no tipo de estrutura desejada. No caso da usinagem pela face anterior, a suspensão da estrutura deve-se principalmente ao processo de corrosão lateral (*underetching*). Neste caso o alinhamento da máscara para a etapa de gravação é muito simples (convencional dos processos de microeletrônica), permitindo a obtenção de estruturas menores e refinadas. A geometria da estrutura é determinada pelo posicionamento das aberturas na máscara previstas para a corrosão do substrato. Esta técnica é eficiente em termos de custos e tempo de fabricação assim como em relação à compatibilidade com a

eletrônica. Porém, a quase inexistente liberdade de alteração das etapas do processo e as características das camadas existentes (espessura, resistividade, dopagem, etc.) comprometem a flexibilidade do projeto e limitam as aplicações alvejadas (NEUMANN, 2003).

A usinagem pela face posterior do substrato, por sua vez, é bastante utilizada para a realização de membranas. O objetivo principal é a realização de uma corrosão profunda e praticamente sem corrosão lateral significativa. Porém, neste caso, o alinhamento da máscara posterior geralmente representa uma dificuldade, assim como o controle da profundidade da corrosão, resultando conseqüentemente em estruturas maiores e mais grosseiras. As soluções químicas utilizadas na corrosão do substrato podem ser tanto úmidas (líquidas) quanto secas (gases, plasmas). Elas apresentam propriedades bastante particulares que fogem, porém do escopo deste texto. As soluções úmidas têm sido preferidas por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Uma característica importante da gravura úmida é a sua anisotropia, quando as direções de ataque do material são preferenciais segundo a disposição dos seus planos cristalográficos, e a seletividade do ataque entre diferentes materiais, onde o princípio é remover um material, chamado de camada sacrificial, sem atacar outros, denominados como camadas de parada de ataque (*etch stop layers*) (NEUMANN, 2003).

Micro-Usinagem de Superfície:

O termo em inglês *surface micromachining*, ou seja, a micro-usinagem de superfície refere-se exatamente aos processos de construção de micro-estruturas suspensas a partir da remoção ou corrosão de camadas presentes na superfície do substrato. Estas camadas podem ser tanto dielétricos quanto metais que quando utilizadas para tal fim são denominadas de camadas sacrificiais. Portanto, após a fabricação do CI, uma certa camada que esteja acessível externamente pode ser removida através de um ataque seletivo. O óxido de silício e o alumínio são bastante utilizados como camadas sacrificiais em processos de silício. Um problema que merece muita atenção durante a construção das estruturas é a colagem das camadas suspensas (*stiction effects*) devido às forças de capilaridade presentes nas soluções de corrosão líquidas (úmidas) (RIBAS, 2000).



Figura 6 – Exemplo de Micro-usinagem de superfície.

1.1.2. Micromotores eletrostáticos x eletromagnéticos para MEMS

Nesse ponto, é importante fazermos uma breve discussão a respeito de qual micromotor, eletrostático ou eletromagnético, é mais conveniente para aplicações em MEMS (mais detalhes sobre essa comparação podem ser vistos na referência XINLI, 2002).

Algumas propriedades físicas são sensíveis ao efeito de escala, vamos considerar como dimensão característica do micromotor o seu comprimento L , linear, como o comprimento do estator, diâmetro do núcleo e etc. Fazendo a análise das forças em ambos os tipos de motores, chega-se ao seguinte resultado:

Para o motor eletromagnético, se o comprimento característico for diminuído de um fator de 10, a força será reduzida de 1000. Portanto no domínio de MEMS a força eletromagnética é muito fraca para ser utilizada. Já para o motor eletrostático, a força eletrostática é independente da dimensão característica, segundo XINLI (2002). Assim a força eletrostática é forte o suficiente para atuar no micro-domínio.

Analisando a performance dos dois motores quanto aos critérios potência por unidade de volume e eficiência em ambos, o motor eletrostático se mostra superior (XINLI, 2002).

1.2. Motores Eletrostáticos aplicados em MEMS

Na literatura existem vários trabalhos envolvendo motores eletrostáticos aplicados a MEMS. Na Figura 7 a seguir apresentam-se vários tipos de motores eletrostáticos (A, B, C e D) encontrados na literatura. Esses motores eletrostáticos são

também chamados de *salinet-pole motors* e *step motors*. Segundo sua nomenclatura, o motor A é um motor 6:8, pois possui 6 eletrodos no estator e 8 dentes no rotor. Da mesma maneira, o motor B e D são motores 12:8 e o motor C é um motor 18:6.

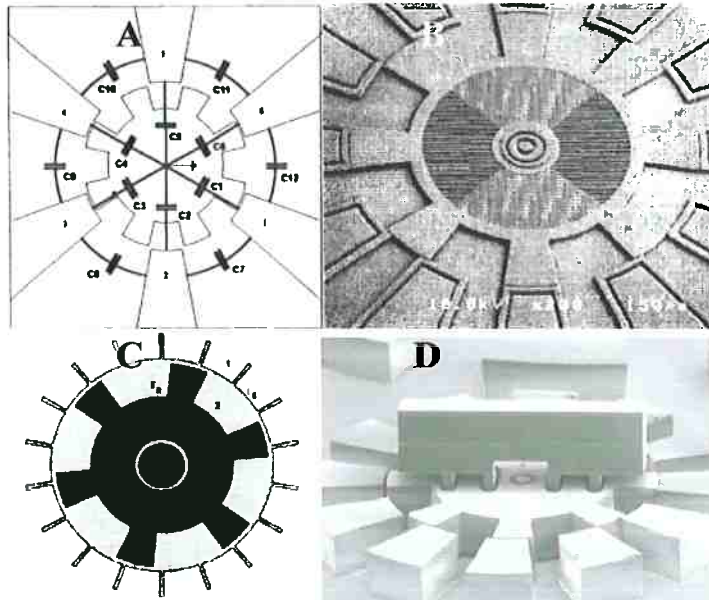


Figura 7 - Alguns exemplos de motores encontrados na literatura.

Como já mencionado, o funcionamento desses motores se dá por forças eletrostáticas entre os eletrodos ativos do estator e os dentes do rotor. O valor dessa força para cada dente é periódico de acordo com a rotação do rotor. Como o material do rotor é um material dielétrico, pode-se considerar que entre cada dente do rotor e um eletrodo do estator há uma relação que pode ser representada por um capacitor (como pode ser observado na parte A da figura acima). Devido à própria rotação do rotor, como alguns dentes ficam alinhados com determinados eletrodos de acordo com o passo percorrido, a capacitância entre esses dois componentes é variável (KUCUKKOMURLER, 2000). Por esse motivo, alguns autores se referem a esses motores como motores de capacitância variável. Assim, uma vez que essa capacitância, que define a diferença de voltagem entre os dois componentes, é variável, o torque também é variável. Por esse motivo, também existem alguns trabalhos na literatura que tentam estabilizar o valor do torque nesses motores (BYUN, 2002).

Motores eletrostáticos apresentam algumas limitações que devem ser levadas em consideração. Uma de suas grandes limitações é o fato das forças eletrostáticas envolvidas serem muito pequenas (da ordem de μN). Para se produzir forças maiores é necessário usar altas voltagens.

O uso de altas voltagens, isso inviabilizaria várias aplicações para esses motores, como, por exemplo, aplicações na medicina. Outra limitação desses motores é que a força eletrostática que movimenta o motor pode somente ser atrativa, por isso motores eletrostáticos não se aplicam quando também há a necessidade de forças repulsivas (TAI, 1995).

Na literatura também existem muitos trabalhos relacionados à simulação computacional desses motores eletrostáticos através do Método dos Elementos Finitos (MEF). DELFINO (2002) aborda uma metodologia de modelagem e simulação de um motor eletrostático para diminuir erros no resultado e utilizar uma malha de elementos (*mesh*) menos discretizada, o que implica em menor custo computacional. Também são reportados, na literatura, modos de operar os eletrodos do estator do motor, para se obter uma resposta mais rápida e estável na rotação do rotor (KUCUKKOMURLER, 2002). Outros trabalhos têm por objetivo simular e testar experimentalmente esses motores analisando sua dinâmica e sua resposta transiente no tempo (BART, 1999).

Alguns trabalhos encontrados focam a fabricação de micromotores 12:8 usando técnicas de microfabricação reportados na literatura (FRANGOULT, 1995 e CHIEN-HUNG, 2002). Esses trabalhos reportam as técnicas de microfabricação usadas e alguns problemas ocorridos na fabricação de protótipos, como deslocamento de partes do material final, que será melhor abordado no capítulo 4.

1.2.1. Aplicações Recentes para Micromotores Eletrostáticos

As linhas de pesquisa para micromotores vêm se expandindo em diversos campos da Engenharia. A seguir são listadas algumas das aplicações mais recentes e promissoras dessa área.

Uma aplicação de motores eletrostáticos em MEMS que vem crescendo bastante é seu uso em *scanners* de alta precisão (YASSEEN, 1999a). Basicamente, uma camada de níquel reflexivo é depositada em uma área poligonal na superfície do rotor do

micromotor, como mostrado na Figura 7-B. Dessa forma, o feixe de laser incidente nessa camada é difratado em múltiplos feixes que fazem a varredura do *scanner*. Uma figura dessa aplicação é apresentada abaixo.

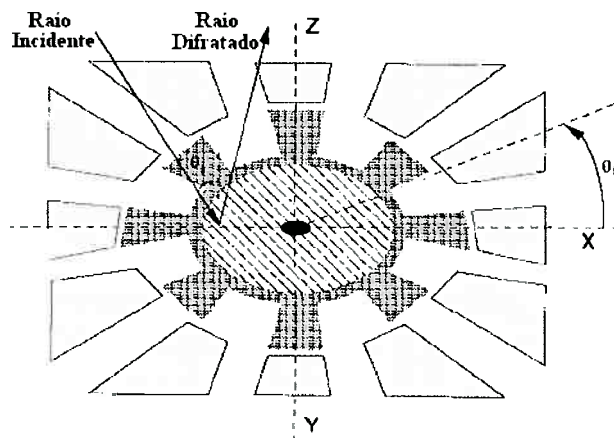


Figura 8 - Micromotor utilizado em *scanner* de alta precisão.

Uma das possibilidades de aplicação de micromotores eletrostáticos é na área de cirurgias minimamente invasivas, ou, no inglês, *minimally invasive surgery* (MIS), que utiliza como principal ferramenta o endoscópio. Este tipo de cirurgia é muito importante, pois reduz os custos de tratamento e de recuperação do paciente, além de reduzir o sofrimento do paciente e aumentar a probabilidade de sucesso da operação. Um endoscópio comum possui um campo de visão limitado, sendo necessário trocar de catéteres durante a operação para se obter outros ângulos de visão. Utilizando-se um micromotor eletrostático para girar um prisma na ponta do endoscópio, o campo de visão poderia alcançar 360° (DUFOUR, 1997, TENDICK, 1998 e KONTARINIS, 1995)

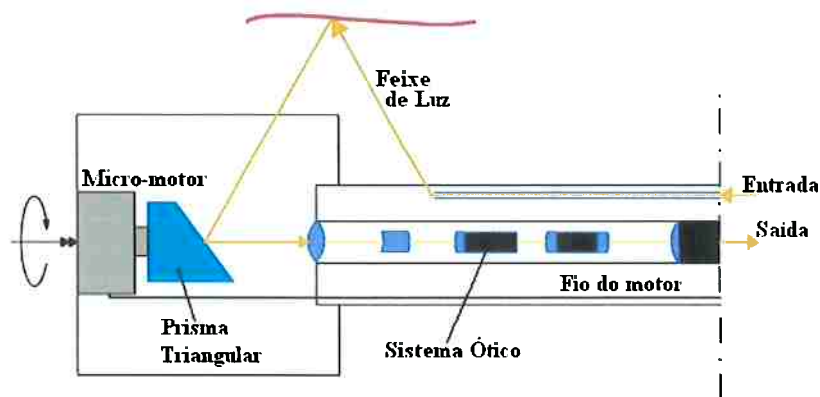


Figura 9 - Esquema do micromotor utilizado no endoscópio.

Outra aplicação para o micromotor é o de *switch* óptico, utilizado em redes de fibra óptica. A idéia desse atuador é que possa haver várias opções para se posicionar o *switch* de forma a obter várias interconexões para que se tenha uma rede independente de protocolos de comunicação, taxa de bits, comprimento de onda usado e comprimento de banda. Atualmente, muito está sendo feito nesta direção, como, por exemplo, o *switch* óptico 1x8, que consiste em um micromotor eletrostático que suporta um espelho (YASSEN, 1999b), mostrado na Figura 7-D.

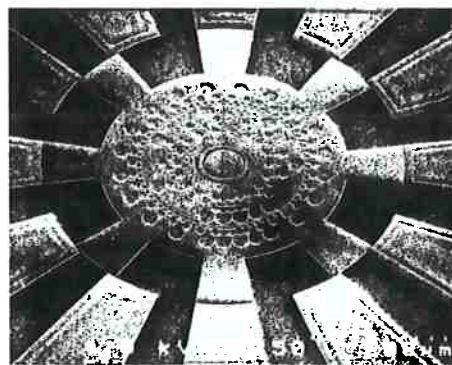


Figura 10 - Micromotor usado para armazenagem de informação.

Outra linha de pesquisa, nos Estados Unidos, vem tentando usar micromotores eletrostáticos para armazenagem de dados em bits impressos em seu rotor (MOURLAS, 1996), como se fossem micro-discos de armazenagem de dados. Isso gera a necessidade de se otimizar o controle desses micromotores para que se consiga uma velocidade de rotação constante para que não haja perda de dados na sua leitura.

No mesmo trabalho, discute-se também a possibilidade de se armazenar de 0,1 até 4000GB dependendo da arquitetura do rotor. Também se sugere que esse sistema de armazenagem pode ser usado não somente para leitura de dados, como também para leitura e escrita de dados (“read/writable”). A partir dessas opções, pode-se inferir que esse ramo da Engenharia é muito promissor para aplicações de micromotores eletrostáticos. A Figura 10 mostra um desses micromotores usados como micro-discos.

1.3. Objetivos

Esse projeto tem por objetivo desenvolver uma metodologia sistemática para o projeto otimizado de um micromotor eletrostático. Assim, esse projeto visa tratar do projeto otimizado de um micromotor eletrostático em três frentes: projeto e simulação computacional, microfabricação de protótipos e otimização topológica do rotor de um micromotor. Dessa forma, é necessário, inicialmente, o estudo de micromotores eletrostáticos, seu funcionamento e suas principais características, o estudo do Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado à análise de elementos eletrostáticos e o estudo do Método de Otimização Topológica (MOT) aplicado ao projeto de micromotores eletrostáticos. Após esses estudos iniciais, com melhor conhecimento do micromotor, serão feitas análises do projeto desses motores através de simulações computacionais em elementos finitos (usando o software comercial ANSYS), para poder se conhecer melhor a influência de seus parâmetros de projeto no torque desenvolvido do motor, através do levantamento da curva característica de torque para cada caso de variação dos parâmetros de projeto. Analisando os resultados das simulações, serão fabricados protótipos de micromotores utilizando técnicas de microfabricação. Em paralelo, pretende-se também otimizar o projeto de um micromotor buscando seu torque máximo. Para isso, será implementado um software em linguagem C para otimização do projeto de um micromotor usando o Método de Otimização Topológica (MOT).

1.4. Justificativa

A utilização de MEMS em diversos ramos de pesquisa, principalmente na Engenharia e Medicina, entre os principais, vem sendo amplamente empregada no

desenvolvimento de micro-sensores e micro-atuadores. Pesquisas nesta área vêm crescendo cada vez mais, possibilitando o surgimento de novas tecnologias de microfabricação, justificando o crescente interesse pela área que existe atualmente.

O projeto de micromotores aplicado em MEMS vem se tornando cada vez mais atrativo para pesquisadores envolvidos não somente na área de microfabricação, como também na Medicina, na Bioengenharia, na comunicação de dados e em muitas outras aplicações, como já descrito na introdução.

Muitos métodos de projeto de micromotores já existem e são reportados na literatura, no entanto, a grande maioria deles enfoca somente a fabricação ou a simulação, usando métodos analíticos (KUCUKKOMURLER, 2002) ou o Método de Elementos Finitos (DELFINO, 2002), sem apresentarem formas sistemáticas de projeto para esses motores, com o intuito de otimizá-lo, como é o objetivo desse trabalho. Assim, são poucos trabalhos na literatura que abordam tanto a simulação quanto a fabricação desse micromotores.

Devido à falta de métodos sistemáticos para o projeto de micromotores aplicados a MEMS, muitos dispositivos ainda são projetados usando a intuição, experiência e abordagens de tentativa e erro. Dessa forma, métodos de projeto sistemáticos, como a otimização topológica, têm muito a contribuir para melhorar consideravelmente os projetos existentes, bem como obter novos e mais eficientes dispositivos, ou dispositivos que possam realizar diferentes tarefas em diferentes aplicações. Uma abordagem similar pode ser encontrada em BYUN (2002) onde o rotor de um micromotor eletrostático foi otimizado buscando maximizar seu torque.

Portanto, trata-se de um projeto inovador e inédito no âmbito nacional, visto que, até onde se pode verificar, não foram encontrados trabalhos no Brasil que tratem de projeto sistemático e otimizado de micromotores eletrostáticos, abordando todo o projeto de um micromotor nas três frentes: simulação, microfabricação e otimização.

2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Nesse capítulo serão apresentados os principais conceitos usados para implementação do programa de MEF (usado no software de otimização do micromotor) e para simulação do projeto de um micromotor, que será apresentado no capítulo de resultados. Inicialmente será introduzida a formulação de MEF eletrostático, em seguida, são feitas considerações quanto a resolução de MEF eletrostático no ANSYS para se realizar as simulações propostas nesse projeto.

2.1. Introdução ao Método de Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico que pode ser usado para se obter soluções para uma abrangente variedade de problemas de Engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo, comportamento de fluidos, etc. (BATHE, 1996).

Em geral, problemas de Engenharia são modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos são equações diferenciais com condições de contorno e parâmetros iniciais definidos. Essas equações diferenciais são resultado de se aplicar Leis fundamentais ou Princípios da Natureza para sistemas ou volumes de controle e, dessa forma, representam um balanço de massa, força e energia da estrutura em estudo. As soluções exatas para essas equações possuem duas partes: uma parte homogênea e uma parte particular. Para se definir a solução da parte homogênea, são usados parâmetros do comportamento natural do sistema em questão e propriedades como o módulo de elasticidade, condutividade térmica, condutividade viscosa, etc. Em suma, são as propriedades físicas que definem esse comportamento natural. Quanto à parte particular da solução das equações diferenciais, cabem os parâmetros de distúrbio do sistema. Esses parâmetros podem ser expressos por forças externas, momentos, diferença de temperatura, diferença de pressão, etc. Assim, esses parâmetros compõem as matrizes que definem as equações diferenciais: os parâmetros de comportamento do sistema representam, por exemplo, as matrizes de condutibilidade e rigidez; enquanto os parâmetros de distúrbio geram a matriz de carregamento.

No entanto, existem muitos problemas de Engenharia em que não é possível obter a solução exata. Então, para resolver esses problemas, é preciso usar aproximações numéricas. Enquanto soluções exatas nos dão o exato comportamento do sistema em qualquer ponto, as aproximações numéricas apresentam o comportamento exato somente de pontos discretos, chamados de “nós”. Assim, o primeiro passo de um procedimento numérico é a discretização. Esse processo divide o domínio de interesse em pequenas sub-regiões (subdomínios) e nós (MOAVENI, 1999).

Hoje em dia, os métodos numéricos mais usados são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), (BATHE, 1996). Basicamente, pelas diferenças finitas, as equações diferenciais são escritas para cada nó através de diferenciações numéricas. Em oposição, o Método dos Elementos Finitos resolve as equações diferenciais na sua forma integral, definindo-as em subdomínios resultantes da discretização do domínio, o que possibilita sua aplicação em domínios irregulares.

Nesse projeto será usado o MEF para simulação computacional do protótipo do micromotor a ser construído e para implementar o software de MOT para micromotores eletrostáticos.

2.2. MEF Eletrostático

Para resolução de problemas de natureza eletrostática, considera-se que o campo eletrostático deva satisfazer às seguintes equações de Maxwell (BATHE, 1996):

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

onde $\nabla \times$ é o operador rotacional, $\nabla \cdot$ é o operador divergente, \mathbf{E} é o vetor de campo elétrico, \mathbf{D} é o vetor de deslocamento elétrico e ρ é a carga elétrica livre.

A partir de outra relação constitutiva para campos elétricos, temos:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (3)$$

onde $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a matriz de permissividade elétrica:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

As condições de contorno em uma interface dielétrica são dadas por:

$$E_{T1} - E_{T2} = 0 \quad (5)$$

$$D_{N1} - D_{N2} = \rho_S \quad (6)$$

onde E_{T1} e E_{T2} são as componentes tangenciais do vetor \mathbf{E} em ambos os lados da interface, D_{N1} e D_{N2} são as componentes normais do vetor \mathbf{D} em ambos os lados da interface e ρ_S é a densidade de carga elétrica na superfície da interface.

A partir das expressões anteriores, uma solução para o problema pode ser obtida introduzindo a variável de potencial elétrico (V) no problema, o que permite que o campo elétrico seja expresso por:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (7)$$

Essa equação nos assegura que o campo eletrostático é irrotacional, nos permitindo ignorar a equação (1). Dessa forma, basta resolver a equação de Maxwell (2) e a equação constitutiva (3). Assim, temos a seguinte equação diferencial, que deve ser resolvida levando em consideração as condições de contorno (5) e (6):

$$-\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} \nabla V) = \rho \quad (8)$$

Uma vez que o grau de liberdade de cada nó é a voltagem (potencial elétrico), considerando a matriz de função de forma \mathbf{N} , podemos expressar o potencial elétrico \mathbf{V} como sendo:

$$\mathbf{V} = \mathbf{N}^T \mathbf{V}_e \quad (9)$$

onde \mathbf{N} é a matriz de funções de forma (funções de interpolação do elemento) e \mathbf{V}_e é o vetor de potenciais elétricos nodais.

Para o elemento quadrilátero plano usado na rotina de MEF implementada nesse trabalho, utilizam-se como funções de forma, as funções de elemento quadrilátero, descritas abaixo:

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \quad (11)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \quad (12)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \quad (13)$$

Essas funções de forma derivam da formulação de MEF isoparamétrico (BATHE, 1996), que, além de ser muito usado na literatura, apresenta uma metodologia de fácil implementação computacional.

Usando o elemento isoparamétrico nesse caso, podemos transformar um elemento quadrangular qualquer em um elemento quadrado de lados que vão de -1 a 1 nas coordenadas relativas (ξ, η) , como mostra a Figura 11.

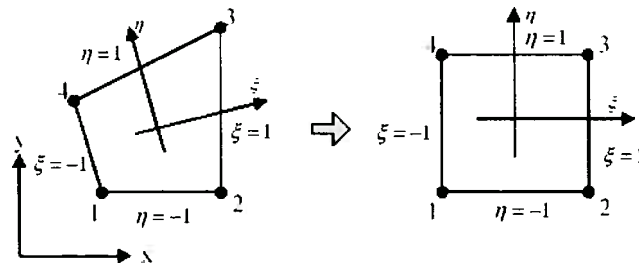


Figura 11 - Transformação de elemento isoparamétrico.

Dessa forma, podemos relacionar o valor do potencial absoluto dos nós com o novo valor de potencial parametrizado do elemento isoparamétrico, da figura anterior, usando as suas funções de forma, como é mostrado abaixo:

$$V = N_1V_1 + N_2V_2 + N_3V_3 + N_4V_4 \quad (14)$$

Dessa forma, pode-se montar a matriz de rigidez \mathbf{K}_e do elemento (BATHE, 1996):

$$\mathbf{K}_e = \int_{Vol} (\nabla \mathbf{N}^T)^T \boldsymbol{\varepsilon} (\nabla \mathbf{N}^T) dVol \quad (15)$$

No entanto, após a parametrização, a integração deve ser realizada em função das variáveis (ξ, η) . Para isso devemos observar a seguinte transformação:

$$dV = dx dy dz = t \det \mathbf{J} d\xi d\eta \quad (16)$$

onde t é a espessura do elemento e \mathbf{J} é a matriz Jacobiana, que no caso bidimensional pode ser dada por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Assim, adicionando o Jacobiano do elemento para transformar as coordenadas globais em locais, a equação anterior pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{K}_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\nabla \mathbf{N}^T)^T \boldsymbol{\varepsilon} (\nabla \mathbf{N}^T) h_e \det J d\xi d\eta \quad (18)$$

onde h_e é a espessura do elemento (considerando estado plano de tensão) e $\det J$ é o determinante da matriz jacobiana J , que já foi apresentada anteriormente.

Para resolução dessa integral, não é possível o cálculo analítico na maioria das vezes, portanto, a matriz de rigidez do elemento é calculada por métodos numéricos de integração, como por exemplo, a Quadratura de Gauss-Legendre (BATHE, 1996).

De forma análoga ao desenvolvimento da matriz \mathbf{K}_e , podemos obter a matriz de carga nodal \mathbf{Q}_e como:

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{Q}_e^c + \mathbf{Q}_e^{sc} \quad (19)$$

onde:

$$\mathbf{Q}_e^c = \int_{Vol} \rho \mathbf{N}^T dVol \quad (20)$$

$$\mathbf{Q}_e^{sc} = \int_S \rho_s \mathbf{N}^T dS \quad (21)$$

onde ρ , nesse caso, é o vetor de densidade de carga elétrica e ρ_s é o vetor de densidade de carga elétrica superficial, ambos dados como entrada pelo usuário.

A partir dessas expressões, podemos definir para cada elemento da nossa malha a equação de MEF que rege seu comportamento elétrico:

$$[\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]_e \{\mathbf{V}\}_e = \{\mathbf{Q}\}_e + \{\mathbf{Q}_i\}_e \quad (22)$$

onde $[K_{\bullet\bullet}]_e$ é a matriz de rigidez do elemento, $\{V\}_e$ é o vetor de potenciais elétricos do elemento, $\{Q\}_e$ é o vetor de carga elétrica externa ao elemento e $\{Q_i\}_e$ é o vetor de carga elétrica devido aos elementos vizinhos.

Essa equação representa o comportamento eletrostático de apenas um elemento. No cálculo de problemas de MEF, consideram-se vários elementos que apresentam alguns graus de liberdade em comum. Após montar as equações matriciais de cada elemento, obtém-se o que é chamada de equação global, dada por:

$$[K_{\bullet\bullet}]\{\phi\} = \{Q\} \quad (23)$$

onde $[K_{\bullet\bullet}]$ é a matriz de rigidez global, $\{\phi\}$ é o vetor de potenciais elétricos globais e $\{Q\}$ é o vetor de carga elétrica global.

A partir da resolução dessa equação, fornecendo alguns valores do vetor $\{Q\}$ (valores de carga elétrica de cada nó da malha), obtém-se os valores dos potenciais elétricos nos nós da malha de elementos finitos.

No entanto, no caso em que impomos os valores de potencial elétrico de alguns nós (em vez de impor valores de carga elétrica), devemos tratar matematicamente a eq.(23) para que possamos resolver o problema de MEF de maneira similar ao caso da imposição de carga elétrica. Esse tratamento matemático é conhecido como “Condições de Contorno de Dirichlet” (BATHE, 1996) e está melhor descrito no Apêndice A.

Para resolver a eq.(23), são usados métodos numéricos como o método de eliminação de Gauss e o método dos gradientes conjugados.

No modelo tridimensional do micromotor eletrostático, que é simulado em ANSYS, para se projetar os modelos de motor a serem fabricados, uma das principais características de projeto é a força eletrostática no dente do rotor para cada modelo de motor testado. Para entender melhor a obtenção dessas forças no modelo de MEF, devemos expressar sua formulação. Tais forças são determinadas usando o tensor de tensão de Maxwell nas superfícies do elemento (ANSYS, 2004), resultando na expressão abaixo:

$$\mathbf{F}_e^{\text{MX}} = \varepsilon_0 \int_S \begin{bmatrix} \frac{1}{2} E_x^4 E_y^2 & E_x E_y \\ E_x E_y & \frac{1}{2} E_x^2 E_y^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{Bmatrix} dS \quad (24)$$

onde ε_0 é a permissividade do espaço livre (no caso, o ar), S é a superfície do elemento, n_1 e n_2 são a componente na direção x e a componente da direção y , respectivamente, do vetor unitário normal à superfície S .

Essa formulação de elementos eletrostáticos será usada nesse projeto não somente para conhecer melhor o funcionamento do software comercial ANSYS, mas também para ser implementado em C uma rotina de MEF eletrostático. Como a eq.(23) mostra, deve-se entrar com os valores da carga elétrica em alguns pontos do domínio para se obter a resposta do problema. Dessa forma, devemos definir como encontrar a carga elétrica que deve ser aplicada para podermos simular o micromotor eletrostático.

Vale ressaltar que uma formulação mais completa sobre a natureza de fenômenos eletrostáticos é apresentada em SERWAY (1992).

Por fim, a resolução do MEF Eletrostático no software comercial ANSYS é similar a uma análise estática comum, com exceção de que os elementos envolvidos são elementos específicos para uma análise eletrostática e as propriedades dos materiais devem condizer com as características do elemento. A seguir será mostrado como fazer a análise eletrostática no ANSYS para o caso da simulação de um protótipo do micromotor. A resposta da rotina de MEF implementada deve ser igual à resposta do ANSYS, o que é melhor discutido no Apêndice B.

2.3. Simulação computacional do micromotor

Nesse item é discutida a metodologia usada para simulação do micromotor no software comercial ANSYS e, principalmente, para a interpretação dos resultados obtidos de forma a calcular o torque desenvolvido pelo motor através da simulação eletrostática e de forma a analisar a influência do atrito no seu funcionamento, que é mostrado no capítulo 6.

Essas simulações utilizam o módulo de análise de campo eletrostático no ANSYS (ANSYS, 2004). Nessa análise, pode-se ter como entrada potencial elétrico ou carga elétrica e a saída é geralmente a distribuição do potencial elétrico e o campo elétrico. O software assume que essa análise é linear para sua resolução, em que o campo elétrico é proporcional à voltagem aplicada. No ANSYS existem dois métodos de resolução de problemas eletrostáticos, o método P (“*p-method*”) e o método H (“*h-method*”).

Basicamente ambos os métodos oferecem o mesmo tipo de formulação com exceção do fato de que o método P utiliza funções de interpolação de alta ordem (níveis P) de acordo com a necessidade de cada elemento, para diminuir o erro e se aproximar do valor da resposta real do problema. Dessa forma, de acordo com os critérios de convergência (que podem ser padrão ou pré-estabelecidos pelo usuário), o método seleciona alguns elementos para aumentar o nível P de sua função de forma, diminuindo a necessidade de se melhorar a malha de elementos finitos (*mesh*). Assim é possível a obtenção de resultados precisos para campos elétricos e forças elétricas sem necessidade de um estudo maior quanto ao refinamento da malha por parte do usuário, o que por muitas vezes representa um grande problema para acurácia e, até mesmo, resolução do problema (ANSYS, 2004).

Também se deve destacar que para obtenção das forças elétricas do modelo de finitos, é preciso usar elementos tridimensionais, pois no cálculo dessas forças, como pode ser observado na eq.(24), é resolvida uma integral na superfície ortogonal ao vetor de força eletrostática, sendo necessário, portanto, o uso de elementos tridimensionais que representem essa superfície.

Portanto, nas simulações do projeto do micromotor nesse trabalho, serão usados elementos tridimensionais que utilizam o método P para análise eletrostática, usando o software ANSYS. Alguns testes foram realizados na tentativa de usar outros tipos de elementos no ANSYS que não dependem do método P e, portanto, são mais simples. Entretanto, ficou comprovado que esses elementos mais simples comprometem o resultado da simulação computacional, uma vez que a geometria a ser simulada apresenta alguns pontos de singularidade, como será visto no modelo de MEF mostrado no capítulo 6.

O elemento usado para resolução do problema foi o elemento SOLID128, com 20 nós por elemento e somente um grau de liberdade (a voltagem) em cada nó. A formulação desse elemento é similar à formulação já apresentada para MEF eletrostático, mas aplicada a um elemento tridimensional.

Para essa simulação eletrostática, pode-se simplesmente simular um dente do rotor sendo atraído por forças eletrostáticas de um pólo do estator. Como já foi discutido anteriormente, para um motor 12:8, que é o caso do modelo principal que será simulado e fabricado, teremos 4 dentes do rotor (diametralmente opostos) que estarão sendo atraídos ao mesmo tempo a cada mudança de fase, como mostra a figura abaixo.

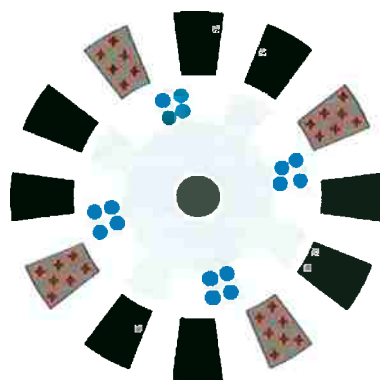


Figura 12 - Força eletrostática em 4 dentes do rotor.

Dessa forma, podemos observar na figura anterior que o posicionamento relativo entre dentes do rotor e pólos ativos do estator é igual para os 4 dentes que estão sob efeito de forças elétricas. Portanto, é válida a suposição de se analisar somente um par de pólos rotor/estator e multiplicar esse resultado por 4 para contribuição no cálculo do torque, ou seja, o valor da força encontrada para cada dente do rotor deve passar pela expressão abaixo para podermos encontrar o torque no motor.

$$T = 4rF_t \quad (25)$$

onde r é o raio do rotor, F_t é a força tangencial resultante e T é o torque do motor.

Assim, para simular essa interação eletrostática entre um dente do rotor e um pólo do estator (chamada de *switching*), devem-se impor diferentes ângulos de defasagem entre os dois, dentro da faixa de 0° (em que o dente está alinhado ao pólo do estator) até o ângulo máximo de desalinhamento de um dente, que no caso do motor 12:8 é de 15° . Seguindo esse método, pode-se analisar a influência da força eletrostática para configurações diferentes do motor 12:8.

Para análise do atrito no eixo do micromotor, devemos observar o comportamento das forças normais em cada dente do rotor. Temos, em cada *switching*, 4 dentes ativos no rotor (separados por 90°), como mostra na Figura 13(A).

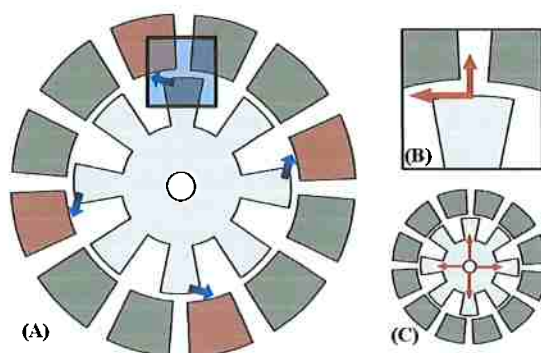


Figura 13 - Situação das forças normais durante o funcionamento do micromotor.

Como pode ser observado na parte B, essas forças atrativas se decompõe em uma força tangencial que gera o torque (como já foi discutido) e uma força normal que gera a força de atrito com o eixo. Portanto, como mostra a parte C da figura, podemos considerar a existência de 4 forças normais, defasadas espacialmente de 90° , que devem estar em equilíbrio no funcionamento do motor. No entanto, na prática, sempre há diferenças que podem gerar uma força resultante, ou mesmo, problemas de acionamento dos pólos do estator que podem criar atrasos entre o acionamento dos pólos e gerar um desbalanceamento das forças do micromotor.

Portanto, vamos analisar como pior caso possível, o caso em que 2 pólos adjacentes não são ativados, gerando a maior força axial possível no eixo do rotor, que seria composta das forças normais de cada um dos 2 dentes ativos do rotor, nesse caso, que são defasadas espacialmente de 90° , como mostra a Figura 14.

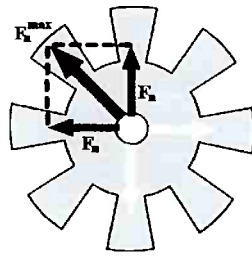


Figura 14 - Força axial resultante no micromotor.

Dessa forma, calculando a composição das forças, temos:

$$F_n^{\max} = \sqrt{2}F_n \quad (26)$$

onde F_n é a força normal em cada dente ativo do rotor e F_n^{\max} é a força axial que pode gerar o atrito máximo entre o rotor e seu eixo.

Conhecendo essa força axial máxima, podemos então analisar o atrito no eixo do micromotor através da seguinte fórmula para o caso de atrito:

$$F_t^{\text{atr}} = \mu_{\text{tor}} F_n^{\max} \quad (27)$$

onde F_t^{atr} é a força de atrito tangencial e μ_{tor} é o coeficiente de atrito que gera o contra-torque no rotor.

Substituindo a eq.(26) na eq.(27), obtemos a expressão final para obtenção do atrito torsional:

$$F_t^{\text{atr}} = \sqrt{2}\mu_{\text{tor}} F_n \quad (28)$$

Vale destacar que, mais adiante, o objetivo das análises será encontrar o coeficiente de atrito máximo que possa gerar um contra-torque igual ao torque final do motor. Nesse caso, a força que deve ser igualada a força de atrito tangencial é uma força tangencial equivalente, resultante da transferência do torque final para o ponto de análise. Essa transferência se dá dividindo o torque final pelo raio do ponto de análise, que no caso é o próprio raio do rotor. Assim, temos que a força equivalente será igual a força tangencial multiplicada por 4, segundo a eq.(25), modificando a expressão (28) para:

$$4F_t = \sqrt{2}\mu_{tor}F_n \quad (29)$$

Essas equações serão necessárias para análise do torque e do atrito no modelo de elementos finitos do protótipo do micromotor mais adiante.

Seguindo esses preceitos, foi implementado em MATLAB uma rotina (como será visto mais adiante) que desenvolve um arquivo de entrada para o software ANSYS usando a linguagem APDL (linguagem própria do ANSYS) para desenvolver o modelo de MEF no ANSYS. Essa rotina é apresentada no Anexo A.

3. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

O Método de Otimização Topológica (MOT) é uma das ferramentas usadas nesse trabalho para obtenção de um projeto otimizado para micromotores eletrostáticos, portanto, a seguir serão apresentados alguns conceitos importantes da otimização para o entendimento do projeto otimizado do micromotor, como características de otimização, parâmetros, formas, etc.

3.1. Principais Conceitos de Otimização

A otimização aplicada na Engenharia consiste em se utilizar métodos computacionais para obter as dimensões, forma ou topologia (parâmetros de projeto) ótimas de estruturas. A aplicação dessas técnicas de otimização é um passo adiante do uso de um software de CAE para somente a análise da estrutura em si. As reduções de peso, volume e aumento de desempenho das peças, para o caso de otimização de peças mecânica, por exemplo, obtidas com o uso de técnicas de otimização são significativas a ponto de atualmente o seu uso ser decisivo para definir a competitividade das indústrias da área metal mecânica (autopeças, aeronáutica, naval, etc.) dos EUA, Japão e Europa, sendo a sua importância inegável na redução de custos. É importante salientar que o impacto do uso dessas técnicas não se limita apenas à otimização do projeto mecânico da peça em si, mas se estende para toda a cadeia produtiva da empresa, pois uma peça com menor peso ou volume, economiza material usado, possibilita aumentar a produção, facilita o transporte (maior número de peças), além de outros fatores, e, portanto, permite reduzir o custo total final da peça.

A otimização vem se desenvolvendo com o passar do tempo e hoje em dia não se limita somente ao projeto de peças mecânicas. É possível melhorar o desempenho e inúmeros componentes eletrônicos e mecatrônicos que são dependentes de sua geometria (*design*). Esse campo é amplamente abordado nas pesquisas de MEMS, como já foi discutido na introdução. Dessa forma, métodos de otimização são usados para projetar inúmeras estruturas de MEMS (NEUMANN, 2003 e RAÍ-CHOUDHURY, 2000)

Assim, a otimização de estruturas MEMS se torna um ponto muito importante para esse projeto, uma vez que se pretende planejar um projeto ótimo de um micromotor eletrostático.

A seguir são apresentados os conceitos básicos da otimização e, logo em seguida, são definidos os principais conceitos da otimização topológica para o problema do projeto do micromotor.

3.1.1. Tipos Básicos de Otimização

A otimização que se pretende realizar nesse projeto, embora tenha atributos eletrostáticos, é uma otimização estrutural, uma vez que pretendemos otimizar o projeto de uma peça, no caso o rotor do micromotor. Assim, para entendermos melhor a otimização desse projeto, devemos conhecer diferentes formas de otimização estrutural existentes. A Figura 15 ilustra os 3 tipos de otimização estrutural mais conhecidos.

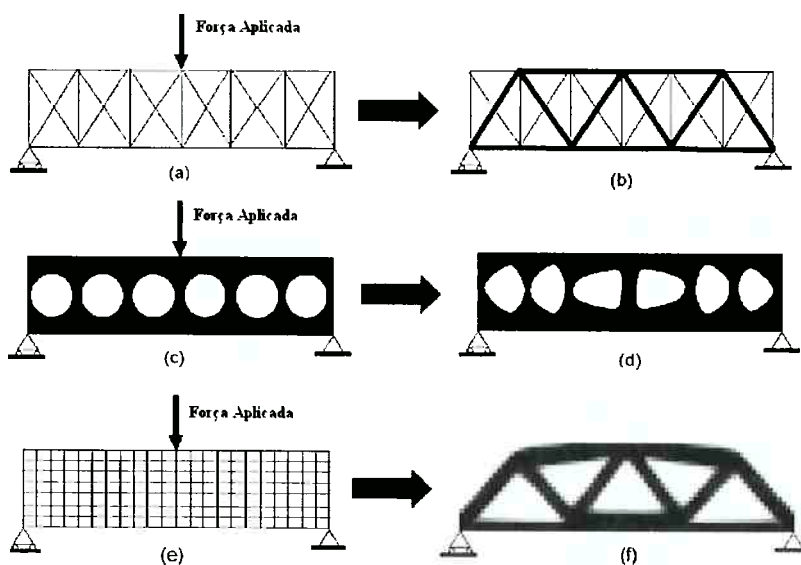


Figura 15 - Tipos de otimização estrutural: (a) otimização paramétrica; (c) otimização de forma; (e) otimização topológica.

Basicamente a otimização de estruturas busca a melhor configuração possível de maneira a atender uma função objetivo especificada. Dentro do projeto é necessário selecionar qual a melhor maneira de se obter a ótima configuração da estrutura. A

primeira categoria de otimização estrutural (Figura 15 (a)) consiste em assumir para a estrutura uma forma fixa previamente definida, neste caso, a estrutura está discretizada com elementos de treliça, onde as características geométricas, como, por exemplo, a área da seção transversal de cada elemento (Figura 15 (a)) são as variáveis de projeto do problema, ou seja, os parâmetros que podem ser alterados para otimizar a estrutura, como já foi definido. Essa abordagem é conhecida por otimização paramétrica (ou *size optimization*). Assim, utilizando um algoritmo computacional de otimização para encontrar as áreas individuais de cada elemento de treliça, que maximize um dado desempenho da estrutura, respeitando uma determinada restrição (por exemplo, volume final da estrutura) (Figura 15 (b)). A segunda categoria é a otimização de forma (ou *shape optimization*), onde os contornos externos e internos da estrutura são parametrizados por curvas *splines* e os parâmetros dessas curvas constituem as variáveis de projeto (Figura 15 (c)). Dessa forma, através de um algoritmo computacional de otimização são determinados os parâmetros ótimos das curvas *splines*, e, portanto, a forma ótima da estrutura (Figura 15 (d)) que otimiza o custo do projeto. A última categoria consiste em se obter a configuração ótima, buscando encontrar a distribuição de material no interior da estrutura (Figura 15 (e)), de tal forma a permitir a criação de “cavidades” nas regiões onde não houver a necessidade de material (Figura 15 (f)). Essa abordagem é chamada de Otimização Topológica (ou *topology optimization*). As variáveis de projeto podem ser, por exemplo, medidas que indicam a distribuição de material em cada ponto do domínio. A otimização topológica é mais genérica, sendo que a quantidade de material removida é maior que nos outros métodos de otimização e, conseqüentemente, obtém-se a estrutura mais leve e com melhor desempenho.

3.1.2. Conceitos de Otimização

A seguir são pré-definidos alguns parâmetros de otimização, apontando desde já algumas das possíveis características do projeto do micromotor que devem ser levadas em consideração durante sua otimização.

Variáveis de Projeto:

Essencialmente, as variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. As variáveis de projeto são classificadas em variáveis contínuas e discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor, já as variáveis discretas estão limitadas a valores isolados.

Muitos dos parâmetros do micromotor podem ser considerados como variáveis de projeto. Para um caso mais trivial de otimização, podemos citar, por exemplo, as seguintes propriedades geométricas do micromotor como variáveis de projeto contínuas: raio do rotor (caso este não seja um parâmetro pré-definido), altura dos dentes do rotor, ângulo de largura do dente do rotor e do pólo do estator, valor de *gap* entre estator e rotor, configuração do motor (12:8, 6:8, etc., como já foi mencionado), etc. Entretanto, nesse projeto a configuração de número de pólos já é definida (como será visto mais à frente), eliminando esse parâmetro da lista de possíveis variáveis de projeto.

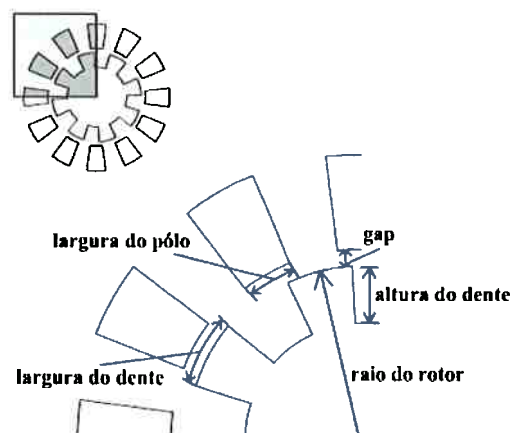


Figura 16 - Possíveis variáveis de projeto.

Mais adiante, nos resultados, esses valores, que podem ser considerados variáveis de projeto, são modificados na simulação computacional do protótipo do motor para se definir o torque de um modelo de micromotor, no entanto, isso não é considerado uma otimização, por se tratar somente de uma análise da influência de cada variável no valor do torque.

Função Objetivo:

A função objetivo deve quantificar o que queremos otimizar e será função das variáveis de projeto escolhidas. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência o projeto, ou seja, em um projeto de otimização a função objetivo é a função matemática que define o que queremos maximizar ou minimizar. Essa função pode ser classificada em simples ou multi-objetivo. A função é dita simples quando temos apenas um objetivo e é denominada multi-objetivo quando queremos otimizar vários objetivos de uma só vez.

Restrições:

Essencialmente, as restrições são as limitações impostas para se obter a solução otimizada. Para o projeto do micromotor, as restrições que podem ser consideradas, em sua grande maioria, restrições laterais tendo em vista um raio máximo para o rotor, ou uma largura máxima para os dentes do rotor de forma impedir interação eletrostática entre os dentes adjacentes do rotor, ou outras restrições. Para se obter restrições de igualdade ou desigualdade, deve-se impor condições de projeto, como um valor específico (ou máximo) para a área do rotor, por exemplo.

Domínio:

O domínio viável de soluções depende das restrições que são consideradas para o problema. Uma vez definidas as variáveis de projeto e suas restrições, o domínio da otimização se dá no intervalo definido pelas restrições em que são possíveis vários valores de variáveis de projeto. No caso do micromotor, podemos ter como domínio viável do raio do rotor, todos os valores de raios entre o raio mínimo e raio máximo, definidos pelas restrições.

3.1.3. Estrutura de Software de Otimização

Um dos objetivos desse projeto é implementar um software para o projeto otimizado de um micromotor eletrostático, portanto, é importante analisarmos a estrutura geral de um software de otimização.

A estrutura lógica de um software de otimização análogo ao que está sendo desenvolvido nesse projeto está descrita na estrutura da figura abaixo.

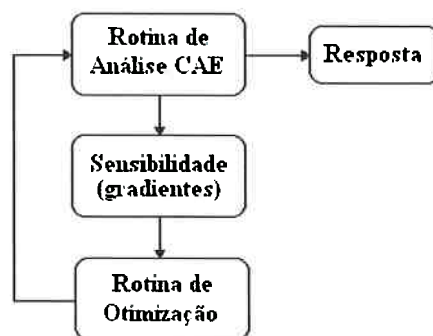


Figura 17 - Estrutura lógica de um software de otimização.

Basicamente, para um problema de Engenharia, temos: uma rotina de CAE que soluciona o problema, dado alguns parâmetros de entrada; a análise de sensibilidade do problema de otimização (que representa os gradientes do problema); e a própria rotina de otimização que normalmente é obtida da literatura e levemente modificada para cada caso. Como pode ser visto, a solução obtida na parte de CAE é melhorada na rotina de otimização e retorna à rotina de CAE para mais iterações. Assim, a partir desses 3 módulos é formado um ciclo que termina quando um critério de convergência pré-definido é atingido. Essa é a organização de um problema de otimização paramétrica, que representa a otimização de estrutura mais simplificada.

Para esse projeto o módulo relativo à rotina de CAE é exatamente uma análise de Elementos Finitos. Por esse motivo foi desenvolvida uma rotina em C, que está no Anexo B, para resolução do problema de MOT do micromotor, que será formulado logo a seguir, na seção 3.3. Mais adiante, na Figura 21, também é mostrada a estrutura lógica para o caso de um software de otimização topológica.

3.2. Teoria de Otimização Topológica

Esse projeto envolve também o desenvolvimento de um software para o projeto otimizado de um motor eletro-estático baseado no Método de Otimização Topológica

(MOT). Portanto, antes de prosseguirmos, deve-se introduzir alguns dos principais conceitos da otimização topológica.

Otimização topológica (OT) consiste num método computacional que permite projetar a topologia ótima de estruturas segundo um certo critério de custo (por exemplo, máxima rigidez e menor peso, ou toque máximo, como é o caso desse projeto). Basicamente, o método de otimização topológica distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função custo especificada (por exemplo, a rigidez). O material em cada ponto do domínio pode variar de ar (não há presença de material) até sólido (total presença de material) podendo assumir densidades intermediárias entre ar e sólido de acordo com um modelo de material definido (BENDSØE, 2003).

Um algoritmo de otimização é usado para encontrar de forma iterativa a distribuição ótima de material, o que torna o processo rápido, caso contrário milhões de análises seriam necessárias para encontrar a distribuição ótima. Na aceleração do processo de busca da distribuição ótima de material, os métodos de otimização utilizam-se da informação dos gradientes (ou derivadas) da função custo em relação à quantidade de material em cada elemento. A distribuição de material é representada, por exemplo, associando um valor de densidade a cada elemento (subdomínio), obtido da discretização do domínio inicial (BENDSØE, 2003).

Dessa forma, a MOT combina essencialmente métodos de otimização com um método numérico de análise, como por exemplo, o Método de Elementos Finitos (MEF). Outros métodos numéricos de análise podem ser usados, no entanto, devem ser genéricos o suficiente de forma a lidar com estruturas de formas complexas resultantes da otimização.

3.2.1. Histórico da Otimização Topológica

A otimização topológica surgiu da necessidade de se aprimorar a otimização de forma para permitir a viabilidade de uma distribuição de material mais acentuada no interior do domínio da estrutura. Em outras palavras, a otimização de forma permite a mudança no contorno, mas não é viável se quisermos, por exemplo, inserir alguns “buracos” no corpo da estrutura para reduzir o seu peso, sem violar as restrições de

projeto. A otimização de forma é um tema estudado desde a década de 70 e vários artigos sobre o assunto podem ser encontrados na literatura científica. Uma revisão sobre o desenvolvimento dos métodos que permitem a variação do contorno da estrutura na otimização de forma pode ser encontrada em HAFTKA (1986). Os métodos de variação do contorno da estrutura (otimização de forma) fundamentam-se em métodos de análise como o método dos elementos finitos (BATHE, 1996), métodos numéricos baseados na programação matemática, e análise de sensibilidades (CHOI, 1986), os quais possibilitam a implementação de algoritmos computacionais utilizados para encontrar a solução do problema de otimização. Mas, na otimização de forma encontramos sérias dificuldades quando pretendemos alterar a topologia (ou distribuição de material) de uma estrutura, pois a mudança da topologia implica na constante alteração, durante o processo de otimização, do modelo de elementos finitos associado à estrutura no início do processo. Para conseguir essa alteração o algoritmo de otimização deve prever esquemas que permitem a atualização constante da malha de elementos finitos a cada iteração do processo de otimização, o que inviabilizaria o caso tridimensional. O algoritmo de otimização pode usar um módulo gerador de malhas que os softwares comerciais de elementos finitos integram, mas ainda assim não é viável devido a grande distorção da malha quando introduzimos “buracos” na estrutura. No final da década de 80, Bendsøe e Kikuchi introduziram uma metodologia alternativa para a otimização de forma, que parte do princípio em se fixar o domínio inicial da estrutura e, portanto manter inalterado o modelo de elementos finitos utilizado no processo de otimização. Desta maneira, surge a metodologia para Otimização Topológica (OT) de estruturas mecânicas, baseada no conceito de domínio fixo estendido de projeto e, inicialmente, no método da homogeneização (BENDSØE, 1988).

A metodologia criada por Bendsøe e Kikuchi para a OT, foi fortemente inspirada nas conclusões obtidas nos trabalhos que lidam com otimização da distribuição de espessuras em placas e chapas (CHENG, 1981 e 1982). CHENG (1981) investigou a formulação matemática para o problema de maximização de rigidez (com restrição de volume) de placas delgadas, onde a variável de projeto é a espessura da placa, e concluiu que para este problema de otimização existem várias soluções ótimas locais. Ou seja, os resultados encontrados indicam que a solução ótima é uma placa que, ao

longo da espessura, é composta por regiões com infinitos reforços infinitesimais, cujo comportamento é similar a um material composto por infinitas microestruturas. As microestruturas constituem a base da OT e podem ser divididas em duas categorias como será visto logo adiante. Uma revisão sobre as características das microestruturas utilizadas no MOT pode ser vista em HASSANI (1998). Em termos matemáticos a introdução de uma microestrutura na formulação de um problema estrutural requer a relaxação do variacional (variação da função) do problema para permitir a otimização. BENDSØE (1989) descreve várias maneiras de se conseguir a relaxação mencionada através da introdução de um modelo de material baseado na distribuição de densidades na microestrutura, dentre eles o chamado de método de densidades, que será visto mais adiante. Esse método permite que a natureza discreta da função de distribuição de material seja aproximada por uma de natureza contínua, ou seja, o problema de otimização é definido de tal forma que os parâmetros desse modelo de material sejam as variáveis de projeto, sendo que essas agora são descritas por funções contínuas que permitem haver estágios intermediários ao se passar de uma condição extrema para outra (por exemplo, sólido para “vazio”), isso garante a relaxação do problema evitando mudanças bruscas de material ao longo da otimização.

A metodologia para OT foi definida em BENDSØE (1988) e SUZUKI (1991) que implementaram o método para resolver, com sucesso, vários exemplos de otimização estrutural cuja função objetivo do problema era a maximização de rigidez, sujeita à restrição de volume de material. Depois disso, BENDSØE (1991) e OLHOFF (1991) estudaram a possibilidade da integração do MOT aos sistemas de CAD (desenho assistido por computador). DÍAZ (1992a) apresentaram uma formulação para o problema de maximização de rigidez de estruturas elásticas submetida a várias cargas não simultâneas. THOMSEN (1992) e OLHOFF (1993) trataram numericamente uma extensão do método aplicada à otimização de estruturas compostas por mais de um material. Problemas de OT considerando frequência de ressonância em estruturas contínuas são descritos em DÍAZ (1992b). RODRÍGUEZ (1995) descreveram a OT de estruturas termoelásticas submetidas a cargas térmicas. A análise transiente em estruturas como problema de OT foi realizada por TURTELTAUB (2001). Além das aplicações na área estrutural clássica, a utilização do MOT expandiu-se para outras áreas de projeto como, por exemplo, problemas de maximização da condutividade

térmica na transferência de calor são resolvidos em PARK (1995). Atualmente a metodologia da OT está bem estabelecida, tornando-se evidente em várias linhas de projetos. Dentre eles, os projetos de transdutores piezelétricos (SILVA et al., 1999), projetos de micro-mecanismos flexíveis com atuação térmica e eletrotérmica (JONSMANN, 1999, SIGMUND, 2001a e 2001b), projetos de atuadores flexionais (SILVA et al., 2000), projetos de estruturas sob atuação de campos magnéticos (YOO, 2000), entre outros.

Também se encontram na literatura trabalhos de OT direcionados para otimização de estruturas eletromagnéticas (WANG, 2004) e eletrostáticas, com o desenvolvimento do problema de OT usando o conceito de energia mútua (BYUN, 1999), que será visto mais adiante. Por fim, BYUN (2002) descreveu um processo de otimização de micromotores, similar ao que é desenvolvido nessa dissertação.

3.2.2. Principais Conceitos da Otimização Topológica

A OT é baseada em dois conceitos teóricos principais que serão descritos a seguir: domínio fixo estendido e modelo de material.

O domínio estendido fixo de projeto (Ω) consiste num domínio de forma fixa, limitado pelos pontos de apoio da estrutura e pontos de aplicação de carregamento, que conterá a estrutura desconhecida. O objetivo da OT é determinar os espaços sem material (“vazio”) e a conectividade da estrutura através da remoção e adição de material nesse domínio. O problema de otimização consiste, portanto, em se encontrar a distribuição ótima de propriedades de materiais no domínio estendido fixo. Na implementação numérica o domínio estendido fixo é discretizado em elementos finitos. Portanto, o modelo de elementos finitos do domínio não é alterado durante o processo de otimização, sendo alterada somente a sua distribuição de material nos elementos. O que torna o processo de otimização bastante vantajoso, pois sendo o domínio fixo, as derivadas de uma função q são facilmente calculadas usando a expressão:

$$\frac{\partial}{\partial A_n} \int_{\Omega} q d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial A_n} d\Omega \quad (30)$$

onde A_n é uma variável de projeto, e q é uma função contínua e diferenciável.

O modelo de material é uma equação que define a mistura em micro-escala de dois ou mais materiais (um deles pode ser “vazio”) permitindo que haja estágios intermediários ao se passar da condição de zero material (“buraco”) a sólido em cada ponto do domínio.

De forma básica, a topologia a ser otimizada pode ser representada por uma função discreta $\chi(x)$, definida em cada ponto (x) do domínio (Ω), da seguinte maneira:

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in \Omega \\ 0 & \text{se } x \in \Omega \setminus \Omega_D \end{cases} \quad (31)$$

onde Ω_D é a região onde há presença de material, inserida no domínio (Ω). Sendo o material isotrópico, podemos escrever:

$$C(x) = \chi(x)C_0 \quad (32)$$

onde C_0 é o tensor constitutivo do material base. Ou seja, fisicamente a função discreta $\chi(x)$ define se o ponto (x) do domínio é preenchido totalmente com material (sólido) ou é um vazio (buraco), não havendo estágios intermediários.

Entretanto, a parametrização discreta da eq.(32), devido à alteração brusca do valor (0 ou 1) das variáveis de projeto, é um problema mal-posto, ou seja, não apresenta solução. O espaço discreto gera múltiplos mínimos locais que causam uma dependência da discretização, tornando difícil o tratamento numérico do problema. Uma maneira de contornar isso é relaxar o problema, ou seja, permitir que as variáveis de projeto assumam valores intermediários entre 0 e 1, definindo, portanto, um modelo de material para substituir a função discreta por uma contínua (CHENG, 1982 e BENDSØE, 1989). A princípio, os estágios intermediários não têm significado físico sendo apenas decorrentes de um recurso matemático para relaxação do problema. Segundo BENDSØE (2003) um modelo de material que fornecer uma função contínua e consistente das propriedades do material em cada ponto do domínio, garante o alcance

da solução. Existem vários modelos de material que podem ser utilizados, entre eles o método de densidades (BENDSØE, 1989) e o método da homogeneização (BENDSØE, 1988). Neste item será feita uma breve descrição sobre o método da homogeneização. No presente trabalho é utilizado o método de densidades, cujo detalhamento é feito mais a seguir.

O método da homogeneização se constitui num modelo de material complexo e robusto para a definição das propriedades efetivas de um material composto, uma vez conhecida a geometria e a composição de sua microestrutura (HASSANI, 1998). Assim, tomando-se como exemplo uma placa perfurada (como é mostrado na figura a seguir) podemos calcular as propriedades da composição dos materiais (sólido + “vazio”) a partir do material base da placa e conhecendo a distribuição dos furos na mesma. No MOT, cada ponto do domínio da estrutura é definido como sendo um material composto gerado pela repetição periódica de uma microestrutura, como é mostrado na figura abaixo.

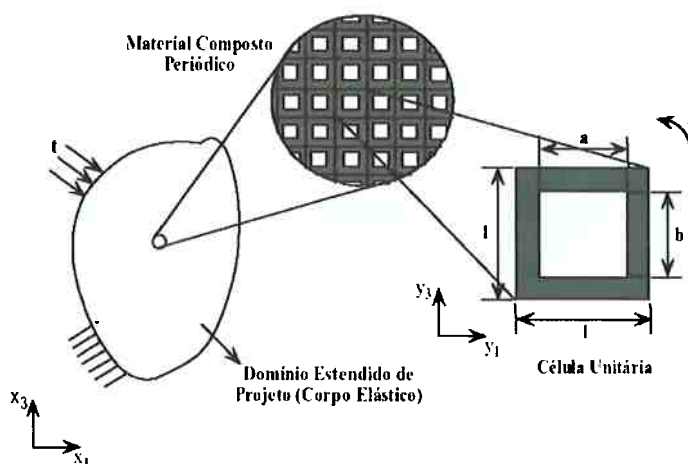


Figura 18 – Modelo de material de microestrutura para o método da homogeneização.

A microestrutura composta por material sólido com vazio interno, mostrada na figura acima, consiste numa célula unitária com um buraco retangular no seu interior (BENDSØE, 1988, SUZUKI, 1991), cujas dimensões são definidas pelas variáveis de projeto a e b e o ângulo θ . Assim, em cada ponto do domínio (Ω) define-se um material composto gerado pela repetição periódica de uma microestrutura de dimensões a , b , e θ

correspondente aquele ponto. Dessa forma variando-se os valores de a , b , e θ ao longo do domínio estendido fixo durante a otimização altera-se a distribuição de material nesse domínio, de maneira que ao final da otimização existirão pontos com ar ($a=b=1$), pontos com sólido ($a=b=0$) e alguns pontos com materiais intermediários. Nesse sentido o problema consiste em se otimizar a distribuição de material num domínio perfurado com infinitos micro-furos.

Esse método é mais difícil de implementar e apresenta um custo computacional maior, no entanto, seu modelo de material é mais realista, o resultado em geral apresenta pouca escala de cinza. Diante disso, o método de densidades vem conquistando a preferência dos pesquisadores da área de Otimização Topológica por ser um modelo mais simples de implementar e por utilizar somente uma variável de projeto: a densidade relativa do material em cada ponto domínio estendido fixo de projeto. Além de permitir obter um resultado muito semelhante ao obtido usando o método da homogeneização. O método de densidades é detalhado na seqüência.

3.2.3. Método das Densidades (ou SIMP)

Neste trabalho, é utilizado o modelo de material do tipo SIMP (*Simple Isotropic Material with Penalization*). O SIMP ou método de densidades (BENDSØE, 1989) consiste numa equação matemática que define o valor da densidade (variável de projeto que varia de zero a um valor máximo) em cada ponto do domínio (Ω) em função da propriedade efetiva do material base, essencialmente simulando uma microestrutura. Esta equação é dada por:

$$C(x) = \rho(x)C_0 \quad (33)$$

onde $\rho(x)$ é interpretada como uma função de distribuição (contínua) de densidades (variável de projeto), $0 \leq \rho(x) \leq 1, x \in \Omega$. Desta forma, podemos dizer que a densidade do material em cada ponto do domínio (Ω) pode variar de “zero” (não há presença de material) a “um” (total presença de material).

A relação linear produzida pela eq.(33) induz que, matematicamente qualquer valor de propriedade efetiva do material $C(x)$, variando de “zero” (ou um valor bem próximo de zero para evitar o problema de condicionamento numérico) até o valor da propriedade efetiva do material base C_0 , pode ser obtido e é viável. Porém, fisicamente isso não é verdade, pois como o valor da propriedade efetiva do material é definido pela sua estrutura molecular, nem todos os valores neste intervalo serão atingíveis. No entanto, do ponto de vista da Engenharia o interessante é que, através de uma função contínua, se possa alcançar uma solução para o problema de otimização em que a topologia ótima obtida seja composta praticamente por material base e vazios (buracos), ou seja, obter uma topologia constituída de materiais cujas propriedades efetivas (módulo de elasticidade, por exemplo) sejam possíveis de se construir.

Matematicamente, a ocorrência de valores intermediários para a variável de projeto $\rho(x)$ estabelece a relaxação do problema e permite a obtenção da solução do problema de OT (BENDSØE, 1995), embora implique em obter uma estrutura com regiões de diferentes propriedades de material. Como já mencionado, do ponto de vista prático, isto não é interessante, pois dificulta a interpretação final da topologia e torna inviável a fabricação.

Então, para evitar a ocorrência do excesso de densidades intermediárias (também conhecida como “escalas de cinza”), penalizam-se os valores intermediários da seguinte maneira (BENDSØE, 1989):

$$C(x) = \rho(x)^p C_0 \quad (34)$$

onde p é o fator de penalidade que reduz as densidades intermediárias no resultado final. O fator p pode ser ajustado para evitar o aparecimento das “escalas de cinza”. Uma discussão interessante sobre este ajuste é feita em BENDSØE (1999).

Em BENDSØE (1999) conclui-se que matematicamente o aparecimento das “escalas de cinza” é minimizado quando satisfaz-se $p \geq 3$. Embora matematicamente essa conclusão seja factível, na prática devemos tomar cuidado quanto a excessiva penalidade das densidades intermediárias (fator p muito alto), pois a medida que aumentamos o fator p , aproximamos cada vez mais o problema contínuo num problema

discreto, conforme observado em RIETZ (2001) retornando ao caso da não garantia da obtenção da solução do problema de OT, devido as instabilidades numéricas geradas pela variação brusca da variação de projeto no problema discreto.

Note que o aparecimento de muitos pontos com “escala de cinza” dificultam a interpretação do resultado da otimização, por isso existe a necessidade de mudar o valor do fator p para resolver esse problema. Outro problema que pode acontecer é o surgimento de regiões com elementos de cor escura e elementos de cor branca dispostos de forma seqüencial e alternada, como um “tabuleiro de xadrez”. Maiores detalhes sobre o problema da instabilidade xadrez serão vistos logo a seguir.

O método de densidades é um modelo de material que, comparado ao método da homogeneização, é menos complexo de ser implementado numericamente num algoritmo de otimização. Há vários artigos científicos que implementam o MOT utilizando esse modelo de material (SIGMUND, 2001a, JONSMANN, 1999, entre outros).

3.2.4. Problema da Instabilidade de Xadrez

Na maioria dos trabalhos sobre a aplicação do MOT observa-se uma certa complexidade para a eliminação de um aspecto comum a todos esses trabalhos: a formação de regiões com elementos de cor escura (presença de material) e elementos de cor branca (ausência de material), dispostos em forma análoga a tabuleiro de xadrez nos resultados obtidos. A figura abaixo ilustra um exemplo de um resultado de OT onde surge o “tabuleiro de xadrez” (ou “*checkerboard*” como é conhecido na literatura internacional).



Figura 19 – Instabilidade xadrez para um exemplo de OT estrutural.

O “tabuleiro de xadrez” é indesejável na solução do problema, pois não se configura numa ótima distribuição de material e sim num fenômeno que aparece devido à formulação (funções de interpolação) do elemento finito utilizado no processo de otimização. DÍAZ (1995) investigaram o comportamento local do arranjo de elementos finitos dispostos em forma de tabuleiro de xadrez. Segundo eles, a explicação para a ocorrência desse fenômeno nos resultados dos problemas de OT é que as aproximações numéricas introduzidas pelo método de elementos finitos (MEF) fazem com que o arranjo do material em forma de tabuleiro de xadrez seja mais rígido do que o arranjo uniforme (que é mostrado na figura abaixo), considerando o mesmo volume de material em ambos os arranjos.

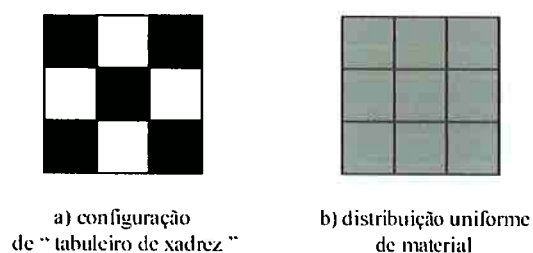


Figura 20 - Arranjos de “tabuleiro de xadrez” e de material distribuído uniformemente.

Vários trabalhos na literatura (BENDSØE, 2003) mencionam a formação do “tabuleiro de xadrez” em seus resultados de OT, mas poucos discutem profundamente o assunto, tanto que a sua solução ainda é um tema de estudo. Em suma, a maioria desses trabalhos, sugerem duas formas distintas para eliminação da formação do “tabuleiro de xadrez” nos problemas de OT. Uma delas é aumentar a ordem do elemento finito (PETERSSON, 1998) e a outra é utilizar métodos de filtragem ou de controle de gradientes (BOURDIN, 2001).

Neste trabalho é utilizado o filtro espacial proposto por CARDOSO (1999) cuja introdução teórica e implementação numérica serão vistos mais adiante.

3.2.5. Estrutura de Software de Otimização Topológica

De forma análoga ao que foi descrito sobre a estrutura lógica de um software de otimização, a figura abaixo mostra a mesma estrutura lógica apresentada na Figura 17

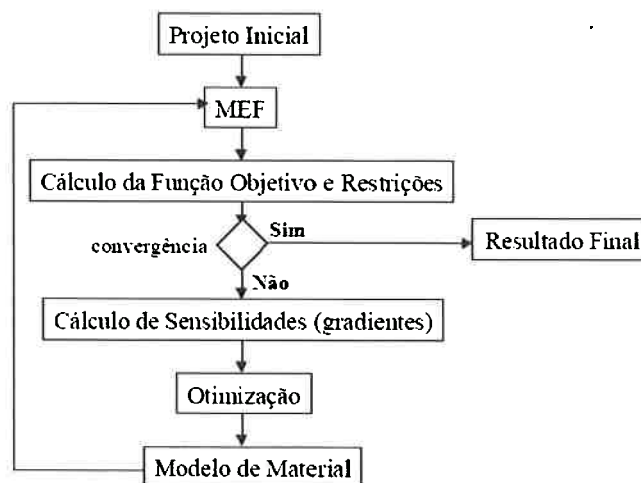


Figura 21 - Estrutura lógica de um software de otimização topológica.

Note que nessa estrutura a rotina de CAE (mostrada na Figura 17) já é considerada como uma rotina de elementos finitos (MEF), como já foi mencionado. Nesse caso, o problema se torna um pouco mais complexo exigindo uma parte específica do software para cálculo da função objetivo e das restrições para se analisar a resposta. Há também uma rotina para o modelo do material, que define as densidades dos elementos da malha de finitos antes que a resposta da otimização retorne para a rotina de MEF.

3.3. Otimização Topológica aplicada ao projeto de micromotor eletrostático

Nesse projeto, a obtenção da topologia ideal do rotor usando o método de otimização topológica (MOT), essencialmente, pode ser interpretada como o problema de encontrar a distribuição de material no interior de um domínio fixo, como já foi amplamente abordado, que resulte em torque final máximo.

O modelo de micromotor a ser otimizado inicialmente é um motor 16:4 e, portanto, seu domínio fixo pode ser representado como mostra a próxima figura.

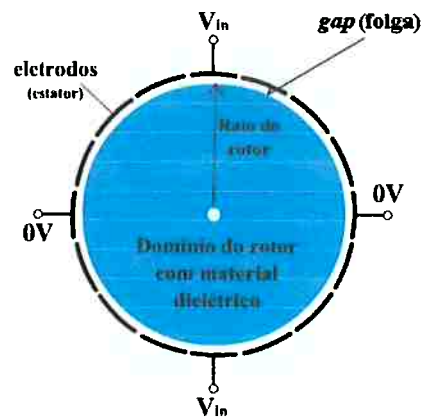


Figura 22 – Domínio de projeto do micromotor para a Otimização Topológica

Como descrito na literatura, a região de material dielétrico mostrado na figura acima é discretizada em uma malha de elementos finitos para se encontrar a disposição ótima de material dentro dessa região de forma a obter torque máximo em um *switching* (mudança de posicionamento do rotor na ativação consecutiva de pólos adjacentes do estator).

Vale destacar que o torque pode ser expresso como a variação, ou a derivada, da energia do motor. Desta forma, o problema de otimização buscando torque máximo no micromotor eletrostático, como proposto na literatura (BYUN, 2002), deve maximizar a diferença de energia de todo o sistema quando o rotor passa da posição A para a posição B, como mostra a figura abaixo para o caso de um micromotor 16:4.

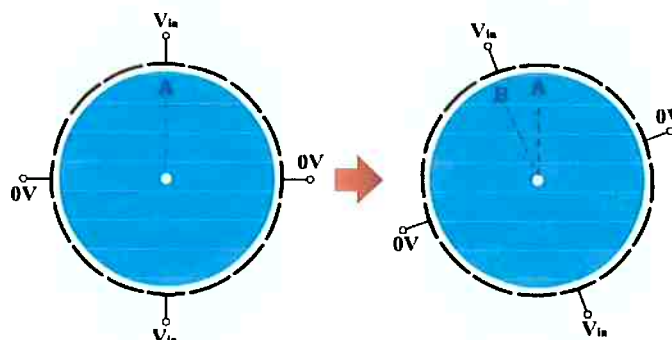


Figura 23 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B.

Assim, a função objetivo que queremos maximizar pode ser definida como (BYUN, 2002):

$$F = \frac{1}{2} \left[W_A^2 + (W_B - W_{B0})^2 \right] \quad (35)$$

onde F é a função objetivo, W_A e W_B são as energias totais do sistema para as posições A e B, respectivamente, e W_{B0} é a energia máxima possível do sistema na posição B, ou seja, a energia computada quando toda a região do rotor está completada com material dielétrico).

Assim, pode-se definir o problema de otimização como sendo:

$$\boxed{\begin{aligned} \text{Max } F = \text{Max } & \frac{1}{2} \left[W_A^2 + (W_B - W_{B0})^2 \right] \\ \text{tal que } & 0 \leq \rho \leq 1 \end{aligned}} \quad (36)$$

onde ρ é a variável de projeto, que representa a densidade normalizada do problema.

Para se obter os valores das energias totais do sistema, usam-se as seguintes expressões na formulação contínua:

$$W_A = \int_{\nu} \nabla \phi_A \epsilon \nabla \phi_A dV \quad (37)$$

$$W_B = \int_{\nu} \nabla \phi_B \epsilon \nabla \phi_B dV \quad (38)$$

onde ν é o domínio do problema (mostrado na Figura 22), $\nabla \phi_A$ e $\nabla \phi_B$ são os potenciais elétricos distribuídos no domínio ν para os casos A e B, respectivamente, e ϵ é a permissividade do material distribuído no domínio.

As mesmas expressões da eq.(37) e da eq.(38), na sua formulação discreta podem ser dadas por:

$$W_A = \{\Phi_A\}^T \left[\mathbf{K}_{\bullet\bullet} \right] \{\Phi_A\} \quad (39)$$

$$W_B = \{\Phi_B\}^T [K_{\bullet\bullet}] \{\Phi_B\} \quad (40)$$

onde $[K_{\bullet\bullet}]$ é a matriz final de rigidez elétrica do problema (como já foi descrito) e $\{\Phi_A\}$ e $\{\Phi_B\}$ são os vetores de potencial elétrico do problema para os casos A e B, respectivamente.

O modelo de material utilizado é o método das densidades, que na sua formulação contínua pode ser expresso por (BENDSØE, 2003):

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 \left(1 + (\varepsilon_r - 1) \rho(x)^n\right), \quad (0 \leq \rho(x) \leq 1, 2 \leq n \leq 4) \quad (41)$$

onde $\varepsilon(x)$ é a permissividade elétrica contínua, ε_0 é a permissividade do ar, ε_r é a permissividade relativa do dielétrico e n é o expoente de penalização do método que penaliza valores intermediários de densidade, ou seja, valores diferentes de 0 ou 1. Note também que esse intervalo de 0 a 1 para a densidade normalizada é a restrição do problema de otimização topológica.

Nesse problema o modelo de material utilizado é o método das densidades, em que, considerando que o domínio tenha sido discretizado em N elementos finitos, as propriedades de permissividade elétrica ε_i de cada elemento podem ser relacionadas com a pseudo-densidade normalizada ρ_i de cada elemento através da seguinte formulação (onde i é o índice que indica de qual elemento se trata, portanto, variando de 1 até N), como mostrado em BENDSØE (2003) e BYUN (2002):

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \left(1 + (\varepsilon_r - 1) \rho_i^n\right), \quad (0 \leq \rho_i \leq 1, 2 \leq n \leq 4) \quad (42)$$

Esse valor de permissividade deve substituir a permissividade de cada elemento, na eq.(18), influenciando, portanto, na matriz de rigidez elétrica do problema.

Quando se tem valores de n maiores que 1, densidades intermediárias são penalizadas e o resultado da densidade normalizada é forçado para ser 0 ou 1. Como o valor de n é no mínimo 2, as densidade intermediárias são penalizadas com maior

intensidade e elementos em “escala de cinza” (densidade normalizada entre 0 ou 1, como é descrito na literatura) são eliminados com maior eficiência. No entanto, valores muito altos de penalização podem retornar ao problema discreto (BENDSØE, 2003). Esse comportamento pode ser observado na Figura 24.

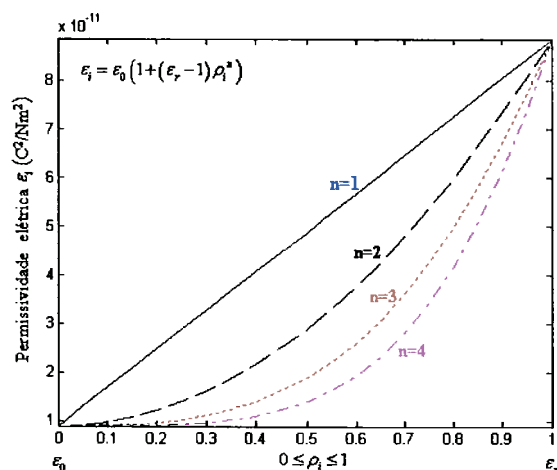


Figura 24 - Comportamento da permissividade do material ϵ_i com a variação do expoente de penalização n (considerando $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ e $\epsilon_r = 10$).

O processo de otimização topológica inicia-se com uma distribuição uniforme de ρ_i em todo o domínio, que é alterada ao longo das iterações até que ocorra a convergência do processo com a maximização da função objetivo F . Esse processo foi mostrado na Figura 21, em que foi estruturado o software de otimização desenvolvido nesse projeto. Os dados iniciais são fornecidos ao software com informação sobre a malha de MEF do domínio, como será descrito no capítulo 5. Mediante a análise de MEF, as voltagens são calculadas permitindo obter a função objetivo e restrições. A etapa seguinte consiste na otimização que exige a informação da sensibilidade do meio, ou seja, a derivada da função objetivo e restrições em relação às variáveis de projeto. Mais adiante será apresentado o desenvolvimento matemático dessas derivadas. O algoritmo de otimização fornece uma nova distribuição de material que é atualizada no modelo de MEF, fechando o ciclo.

No final desse processo, após a convergência, quando é obtida a topologia otimizada final, é necessária uma interpretação da topologia para desenho e fabricação

do rotor otimizado do micromotor. Esse processo todo é previsto na figura a seguir que demonstra através de ilustrações a seqüência de projeto do micromotor otimizado.

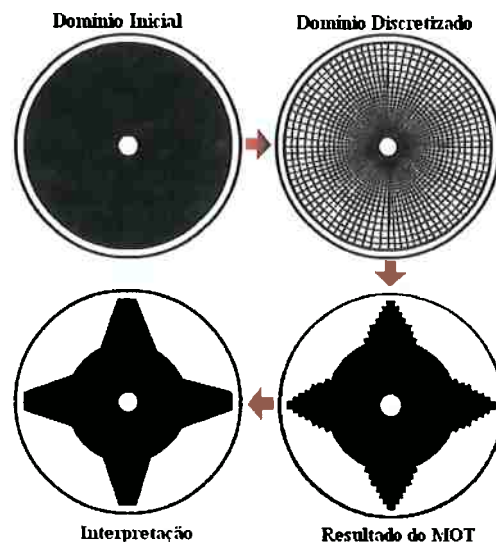


Figura 25 - Exemplo de projeto de micromotor eletrostático usando o MOT.

3.3.1. Solução do problema de otimização topológica

Existem vários algoritmos de otimização disponíveis para solução de problemas de otimização não-lineares com restrições. A maior parte deles é baseado nas chamadas técnicas de programação matemática e métodos de aproximação seqüencial (BENDSØE, 2003). Neste trabalho, o algoritmo de otimização inicialmente utilizado para resolver o problema da eq.(35), é conhecido como programação linear seqüencial (PLS). Classificada entre os algoritmos baseados em métodos de aproximação seqüencial, a PLS tem sido aplicada com sucesso na solução de problemas de otimização topológica. Entre as vantagens do PLS podemos citar o fato de permitir trabalhar com um grande número de variáveis de projeto e funções objetivo complexas, além disso é de fácil implementação (BENDSØE, 2003 e SILVA, 2004b)

A PLS resolve um problema de otimização não-linear dividindo-o em uma seqüência de problemas de otimização lineares que podem ser resolvidos com a técnica de programação linear (PL). A solução numérica da PL pode ser desenvolvida usando-se o método Simplex ou o método Kamarkar que buscam, dentro de um conjunto de

soluções possíveis para o problema, a solução que satisfaz a função objetivo e restrições (BENDSØE, 2003). Geralmente, as rotinas de PL podem ser encontradas na literatura como, por exemplo, a rotina SIMPLX que usa o método Simplex (DANTZIG, 1963), ou disponibilizadas gratuitamente pela rede mundial de computadores (Internet) e na literatura (PRESS, 1999), como é o caso da rotina conhecida por DSPLP que usa o método de Kamarkar (HAFTKA, 1996). Nesse trabalho, utiliza-se somente a rotina SIMPLX, como será visto mais adiante.

A técnica de programação linear (PL) resolve um problema de otimização em que a função objetivo e as restrições são funções lineares em relação às variáveis do problema. O problema de otimização aplicado neste trabalho, que queremos minimizar, é não linear em relação às variáveis ρ_i que representam a quantidade de material em cada elemento do domínio estendido fixo de projeto. No entanto, o problema pode ser linearizado expandindo-se a sua função objetivo numa Série de Taylor e aproveitando os termos com derivada de primeira ordem. Os termos com derivada de segunda ordem ou superior são desprezados, pois o que nos interessa é a representação linear da função objetivo, para ser utilizada na PL. Assim, a função linear a ser minimizada na PL é dada por:

$$F^{linear} = F^0 + \left(\rho_1 - \rho_1^0\right) \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right|_{\rho=\rho_0} + \left(\rho_2 - \rho_2^0\right) \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right|_{\rho=\rho_0} + \dots + \left(\rho_n - \rho_n^0\right) \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right|_{\rho=\rho_0} \quad (43)$$

Observe que o coeficiente das variáveis ρ_i é a derivada (ou sensibilidade) da função objetivo do problema de otimização em relação a variável do problema, no ponto $\rho = \rho_0$. Dessa forma, como pode ser visto no código fonte do software desenvolvido, que está no Anexo B, esses coeficientes são entradas para a rotina do SIMPLX poder atualizar o valor das densidades normalizadas do problema. O cálculo desses coeficientes (derivadas) é mostrado mais adiante.

Como mencionado acima, a idéia primária da PLS para solucionar o problema de otimização não-linear é fazer uma aproximação por sucessivos subproblemas lineares que são resolvidos por PL. Para que essa aproximação seja válida é necessário limitar a variação do valor das variáveis de projeto em cada subproblema linear através

dos limites móveis (BENDSØE, 2003, THOMAS, 1992). Para entender melhor este conceito, considere a função não-linear $F(\rho)$ mostrada na próxima figura.

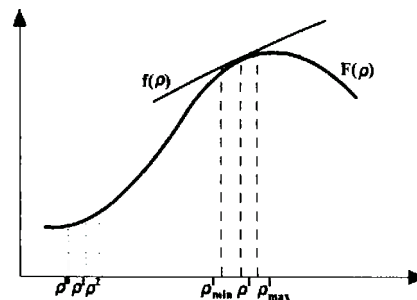


Figura 26 – Limites móveis.

Considere também a função linear $f(\rho)$ como uma aproximação da função não linear $F(\rho)$ em torno do ponto ρ^i . Observa-se que a aproximação linear $f(\rho)$ somente é válida em torno do ponto ρ^i , e se distancia muito do valor real da função não-linear a medida que se afasta desse ponto. Desta maneira defini-se os valores máximo e mínimo em torno de ρ^i , onde a aproximação linear é válida, de limites móveis da variável ρ^i (ρ_{\min}^i e ρ_{\max}^i). Portanto, a cada iteração a rotina de PLS minimiza a função linear $f(\rho)$ no intervalo dos limites móveis e encontra o valor ótimo para a variável ρ^i , que será utilizada na iteração seguinte. Assim as iterações seguem sucessivamente, substituindo-se como valor inicial da iteração posterior o valor ótimo de ρ^i encontrado na iteração anterior, até ocorrer a convergência da solução.

Os limites são considerados móveis pelo fato da variável ρ^i assumir um valor diferente a cada iteração da rotina de PLS. Esses limites são definidos como valores relativos em relação ao valor dessa variável. Porém é necessário observar que, se os valores utilizados para os limites móveis forem muito grandes, o erro da aproximação linear será grande, podendo causar inclusive a perda do ponto ótimo. Em contrapartida, se forem muito pequenos o custo computacional para obter a solução ótima será muito grande. Uma forma de tentar minimizar esse impasse e tornar mais rápida a convergência da solução é assumir valores grandes para os limites móveis na região em que a função não-linear $F(\rho)$ apresenta grande raio de curvatura, ou seja, valor baixo da segunda derivada (região do ponto ρ^0 mostrada na figura anterior), pois nessa região a função $F(\rho)$ tem praticamente o mesmo comportamento da aproximação linear $f(\rho)$. Já

na região em que a função apresenta um pequeno raio de curvatura (alto valor da segunda derivada) limites móveis devem ser pequenos. Além disso, à medida que nos aproximamos da convergência da solução (solução ótima) devemos reduzir bastante os valores dos limites móveis, caso contrário podemos "passar" pelo ponto ótimo gerando oscilação no valor da função não-linear. Na prática, em geral são utilizados valores em torno de 15% do valor de ρ^i para os limites móveis.

3.3.2. Análise de sensibilidade

As derivadas (ou gradientes) da função objetivo e restrições são chamados de sensibilidades do problema de otimização. Essas derivadas são utilizadas na PLS para a linearização da função objetivo em relação às variáveis do problema. Neste item, a formulação matemática para o cálculo da derivada da função objetivo do problema de otimização, eq.(35), é desenvolvida.

Vale salientar que esse desenvolvimento da sensibilidade do problema prevê a aplicação de carga elétrica, como mostrado na eq. (23). Mais a diante será desenvolvida a sensibilidade para o caso de aplicação de potencial elétrico, ou seja, potencial elétrico prescrito.

Assim, a sensibilidade da eq.(35) pode ser escrita como:

$$\frac{dF}{d\rho_i} = W_A \frac{dW_A}{d\rho_i} + (W_B - W_{B0}) \frac{dW_B}{d\rho_i} \quad (44)$$

onde $i=1,2,\dots,N$ e ρ_i é a i ésima variável de projeto (ou seja, a densidade normalizada do elemento i).

Usando a regra da cadeia, os termos $dW/d\rho_i$ da equação anterior podem ser reescritos como:

$$\frac{dW_A}{d\rho_i} = \frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} + \frac{\partial W_A}{\partial \phi_A} \frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \quad (45)$$

$$\frac{dW_B}{d\rho_i} = \frac{\partial W_B}{\partial \rho_i} + \frac{\partial W_B}{\partial \phi_B} \frac{\partial \phi_B}{\partial \rho_i} \quad (46)$$

Para satisfazer as equações de Maxwell, eq.(1), para qualquer distribuição de potenciais elétricos, os termos $\partial W/\partial \phi$ são iguais a zero, assim, as eq.(45) e eq.(46) podem ser reescritas como em BYUN (2002):

$$\frac{dW_A}{d\rho_i} = \frac{\partial W_A}{\partial \rho_i}; \quad \frac{dW_B}{d\rho_i} = \frac{\partial W_B}{\partial \rho_i} \quad (47)$$

Essa é a sensibilidade da energia própria do sistema em relação às variáveis de projeto. Assim, usando as eq.(39) e eq.(40), temos para o caso A e analogamente para o caso B:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\}' [\mathbf{K}_{**}] \{\Phi_A\} + \{\Phi_A\}' \frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} + \{\Phi_A\}' [\mathbf{K}_{**}] \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\} \quad (48)$$

Derivando a equação de equilíbrio do problema, eq.(23) aplicada ao caso A, temos:

$$[\mathbf{K}_{**}] \{\Phi_A\} = \{\mathbf{Q}_A\} \Rightarrow [\mathbf{K}_{**}] \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\} + \frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} = \frac{\partial \{\mathbf{Q}_A\}}{\partial \rho_i} \quad (49)$$

Tendo em vista que $\partial \{\mathbf{Q}_A\}/\partial \rho_i = 0$, pois $\{\mathbf{Q}_A\}$ não depende da variável de projeto ρ_i (se for uma excitação externa), a equação acima pode ser expressa por:

$$[\mathbf{K}_{**}] \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\} = - \frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} \quad (50)$$

Substituindo a eq.(50) na eq.(48), temos que a sensibilidade pode ser finalmente expressa por:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = -\{\Phi_A\}' \frac{\partial [\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} \quad (51)$$

Obtendo analogamente, portanto, o mesmo para o caso B:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = -\{\Phi_B\}' \frac{\partial [\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_B\} \quad (52)$$

Para obtenção da matriz $\partial[\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]/\partial\rho_i$ é necessário derivar a equação do modelo do material, eq.(42), que depende do valor de ρ_i , para obtermos o valor de $\partial\varepsilon/\partial\rho_i$ que deve ser substituído no lugar de ε na equação da matriz de rigidez elétrica, eq.(18). Derivando a eq.(42), obtemos, portanto:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_i} = n\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \rho_i^{n-1} \quad (53)$$

Por fim, derivando a eq.(18), obtém-se:

$$\frac{\partial [\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]}{\partial \rho_i} = \frac{\partial [\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]_e}{\partial \rho_i} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\nabla \mathbf{N}^T)^T \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_i} (\nabla \mathbf{N}^T) \mathbf{h}_e \det J d\xi d\eta \quad (54)$$

onde $[\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]_e$ é a matriz de rigidez do elemento, sendo $e = i$.

Dessa forma, substituindo a eq.(53) na eq.(54), temos:

$$\frac{\partial [\mathbf{K}_{\bullet\bullet}]}{\partial \rho_i} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\nabla \mathbf{N}^T)^T (n\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \rho_i^{n-1}) (\nabla \mathbf{N}^T) \mathbf{h}_e \det J d\xi d\eta \quad (55)$$

Análise de Sensibilidade com potenciais elétricos prescritos:

Para calcular a sensibilidade do mesmo problema no caso em que os valores de alguns potenciais elétricos são prescritos, deve-se obter os gradientes do problema seguindo as equações abaixo.

Primeiramente, deve-se derivar a equação de MEF, que pode ser dada pela eq.(23), supondo um caso em que temos algumas variáveis prescritas na matriz de potenciais elétricos. Assim, usando um exemplo de quatro graus de liberdade (usado na formulação das Condições de Contorno de Dirichlet, apresentada Apêndice A) obtemos a seguinte equação.

$$\frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi\} + [\mathbf{K}_{**}] \begin{Bmatrix} 0 \\ \partial \phi_2 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_3 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_4 / \partial \rho_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial q_1 / \partial \rho_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (56)$$

Note que a derivada da variável que tem o valor prescrito (do exemplo usado na introdução ao MEF eletrostático) é zero, uma vez que seu valor é constante. Assim, reorganizando a equação anterior, temos:

$$[\mathbf{K}_{**}] \begin{Bmatrix} 0 \\ \partial \phi_2 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_3 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_4 / \partial \rho_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial q_1 / \partial \rho_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} - \frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi\} \quad (57)$$

Supondo conhecido o termo $(\partial [\mathbf{K}_{**}] / \partial \rho_i) \{\Phi\}$ da igualdade acima (desenvolvido na sensibilidade anterior, no caso da imposição de carga elétrica, eq. (55)), temos uma equação matricial em que podemos aplicar o método de Dirichlet (já que temos um valor prescrito, zero).

Aplicando esse método, que pode ser visto no Apêndice A, obtemos a seguinte expressão.

$$[\mathbf{K}_{**}^*] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_i} \right\} = \{\mathbf{Q}^*\} \quad (58)$$

onde $[\mathbf{K}_{**}^*]$ é a matriz de rigidez modificada do método de Dirichlet da eq.(84), apresentada no Apêndice A, $\{\partial \Phi / \partial \rho_i\}$ é o vetor da derivada dos potenciais elétricos do problema e $\{\mathbf{Q}^*\}$ é o vetor composto dos elementos de $-(\partial[\mathbf{K}_{**}]/\partial \rho_i)\{\Phi\}$ da eq.(57) em que o elemento referente ao grau de liberdade prescrito é nulo, como mostra a equação abaixo.

$$\{\mathbf{Q}^*\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -(\partial[\mathbf{K}_{**}]/\partial \rho_i)\{\Phi\}_{i2} \\ -(\partial[\mathbf{K}_{**}]/\partial \rho_i)\{\Phi\}_{i3} \\ -(\partial[\mathbf{K}_{**}]/\partial \rho_i)\{\Phi\}_{i4} \end{Bmatrix} \quad (59)$$

onde os índices $i2$, $i3$ e $i4$ são, respectivamente, as linhas 2, 3 e 4 do vetor $-(\partial[\mathbf{K}_{**}]/\partial \rho_i)\{\Phi\}$ da eq.(57).

Vale observar que, na eq.(57), o valor prescrito é zero e esse valor é imposto na matriz $\{\mathbf{Q}^*\}$, na eq.(59).

Rearranjando a eq.(58), obtemos a expressão abaixo que será necessário posteriormente para o cálculo dos gradientes.

$$\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_i} \right\}' = \{\mathbf{Q}^*\}' [\mathbf{K}_{**}^*]^{-1} \quad (60)$$

Prosseguindo com o cálculo da sensibilidade para o caso do método de Dirichlet aplicado e retomando a eq.(39), de energia para o caso A de aplicação de voltagem elétrica juntamente com a eq.(23), do MEF eletrostático, temos:

$$W_A = \{\Phi_A\}' [K_{**}] \{\Phi_A\} = \{\Phi_A\}' \{Q_A\} \quad (61)$$

Derivando essa expressão, obtém-se:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\}' \{Q_A\} + \{\Phi_A\}' \frac{\partial \{Q_A\}}{\partial \rho_i} \quad (62)$$

Essa equação também pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\}' \{Q_A\} + \{\Phi_A\}' \frac{\partial [K_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} + \{\Phi_A\}' [K_{**}] \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\} \quad (63)$$

Para simplificar essa expressão, temos:

$$\{\Phi_A\}' [K_{**}] = \{Q_A\} \quad (64)$$

Dessa forma, a eq.(63) pode ser expressa novamente como:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2 \left\{ \frac{\partial \Phi_A}{\partial \rho_i} \right\}' \{Q_A\} + \{\Phi_A\}' \frac{\partial [K_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} \quad (65)$$

substituindo o termo $\{\partial \Phi_A / \partial \rho_i\}'$ pela eq.(60), temos:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2 \{Q^*\}' [K_{**}^*]^{-1} \{Q_A\} + \{\Phi_A\}' \frac{\partial [K_{**}]}{\partial \rho_i} \{\Phi_A\} \quad (66)$$

Nessa equação, podemos substituir alguns termos usando a equação abaixo.

$$[\mathbf{K}_{**}^*]^{-1} \{\mathbf{Q}_A\} = \{\boldsymbol{\varphi}^*\} \quad (67)$$

A eq.(67), por sua vez, pode ser obtida resolvendo o sistema abaixo, da mesma forma que se resolve o problema de MEF.

$$[\mathbf{K}_{**}^*] \{\boldsymbol{\varphi}^*\} = \{\mathbf{Q}_A\} \quad (68)$$

Por fim, essa substituição modifica a eq.(66) de forma a obtermos a seguinte expressão que representa a sensibilidade da energia mútua no caso A.

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2\{\mathbf{Q}^*\}' \{\boldsymbol{\varphi}^*\} + \{\boldsymbol{\varphi}_A\}' \frac{\partial [\mathbf{K}_{**}]}{\partial \rho_i} \boldsymbol{\varphi}_A \quad (69)$$

Substituindo essa expressão, juntamente com o seu análogo para o caso B, na eq.(47), obtemos a sensibilidade do problema no caso de imposição de voltagem elétrica.

3.3.3. Filtro para solução da instabilidade xadrez

Como já foi mencionado, o “tabuleiro de xadrez” (ou *checkerboard*) é a formação de regiões nas topologias obtidas pelo MOT, que possuem uma instabilidade de presença e ausência de material, cuja aparência é semelhante a um tabuleiro de xadrez. Essas regiões são indesejáveis e aparecem devido à formulação (funções de interpolação) do elemento finito utilizado no processo de otimização (DÍAZ, 1995).

Na literatura, constata-se que a solução para evitar a formação do “tabuleiro de xadrez”, nos resultados da Otimização Topológica, é aumentar a ordem do elemento ou utilizar um filtro que controle a variação das densidades (variáveis de projeto). No entanto, aumentar a ordem do elemento significa trabalhar com elementos finitos com

um número grande de nós (maior que 4), o que implica numa solução que produz alto custo computacional devido ao processamento da matriz de rigidez do modelo de MEF. Assim, a solução adotada neste trabalho para evitar a formação do “tabuleiro de xadrez” foi a utilização de um filtro espacial proposto por CARDOSO (1999). Esse filtro suaviza a distribuição espacial das variáveis de projeto ao longo do domínio estendido fixo, através de uma transformação matemática a cada variável do problema de otimização. Alguns trabalhos da literatura sugerem a aplicação do filtro sobre o campo de densidades (SIGMUND, 2001a), mas como essas densidades geralmente são as variáveis, atualizadas a cada iteração durante o processo de otimização, ao aplicarmos esse filtro modificamos os valores ótimos encontrados para essas variáveis, modificando um pouco a otimização realizada. No entanto, o filtro espacial com raio de abrangência variável, adotado neste trabalho, é aplicado sobre os limites móveis das variáveis do problema de otimização linearizado, ou seja, o problema resolvido por programação linear seqüencial (PLS).

A aplicação do filtro espacial sobre os limites móveis da variável permite um controle simplificado da complexidade da topologia ótima encontrada no processo de Otimização Topológica. Esse filtro é uma variação espacial do filtro originalmente proposto por SWAN (1997), que propuseram um esquema de filtragem de vizinhança fixa, em que a densidade de cada elemento depende das densidades dos elementos vizinhos, da seguinte maneira:

$$\rho_i = \frac{\rho_i V_i + w_1 \sum_j \rho_j V_j + w_2 \sum_j \rho_j V_j}{V_i + w_1 \sum_j V_j + w_2 \sum_j V_j} \quad (70)$$

onde V_i é o volume do elemento i no problema discreto, w_1 e w_2 são pesos atribuídos heurísticamente aos vizinhos de arestas e vizinhos de vértices, respectivamente.

Nos filtros espaciais são considerados os elementos que estão dentro de um determinado raio de varredura em torno do elemento central, como é mostrado na figura a seguir.

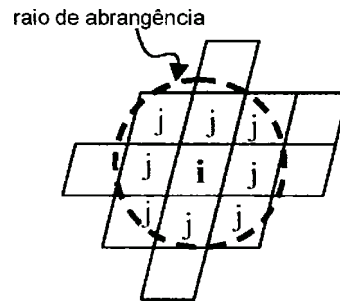


Figura 27 - Raio de abrangência nos filtros espaciais.

Os filtros espaciais minimizam a dependência do resultado final ao refino da malha de elementos finitos e permitem um controle da complexidade da topologia, ou seja, uma abrangência maior de elementos em torno do elemento central permite obter distribuições mais suaves da variável do problema e, portanto, topologias mais simples. O filtro espacial linear é o mais simples, nele são considerados os elementos vizinhos que se encontram dentro de um raio R_{\max} em torno do elemento central, cujos pesos da média ponderada são calculados conforme equação abaixo:

$$W_i = R_{\max} - R_{ij} \quad (71)$$

onde R_{ij} é a distância entre centróides (menor que R_{\max}) do elemento central i e do elemento vizinho j .

Baseado no conceito do filtro espacial linear, CARDOSO (1999) propôs a seguinte alteração para tornar o filtro de SWAN (1997) num filtro espacial:

$$\rho_i = \frac{\rho_i V_i + \overline{w} \sum_{j=1}^{nv} \rho_j V_j}{V_i + \overline{w} \sum_{j=1}^{nv} V_j} \quad (72)$$

com

$$\overline{w} = \frac{\sum_{j=1}^{nv} w_j}{nv} \quad (73)$$

onde

$$w_i = \frac{R_{\max} - R_{ij}}{R_{\max}} \quad (74)$$

e nv é o número de vizinhos determinados por uma varredura fixa em torno do elemento central i , sendo $j = 1, 2, \dots, nv$. Percebe-se que, dessa forma, os pesos fixos para vizinhos de aresta e de vértice não são mais considerados. O filtro proposto por CARDOSO (1999) combina as vantagens do filtro de vizinhança fixa, com os benefícios dos filtros espaciais, e como são aplicados diretamente sobre os limites móveis da programação linear, permite obter um controle sobre o gradiente da variável do problema sem impor uma mudança artificial sobre a distribuição das densidades, obtidas da otimização, no domínio de projeto. A desvantagem da aplicação do filtro sobre os limites móveis é a dependência do desempenho do filtro com métodos de determinação dos limites móveis. Se esses métodos permitirem uma variação muito brusca dos valores dos limites móveis, poderão causar uma atenuação do efeito do filtro. Porém, isso não se configura num grande problema, pois as variações dos limites móveis são limitadas a pequenos valores devido à aproximação linear realizada na programação linear do problema de otimização.

4. MICROFABRICAÇÃO APLICADA A MICROMOTORES

Esse capítulo é dedicado ao estudo de técnicas de microfabricação do tipo LIGA (MADOU, 1997, CHIEN-HUNG, 2002 e FRANGOULT, 1995), que foram genericamente abordadas no capítulo de introdução, de acordo com os recursos disponíveis no Laboratório de Microfabricação do LNLS (que ajudou e acompanhou esse projeto).

4.1. Introdução à microfabricação de micromotores

Atualmente, para a fabricação de MEMS são usados métodos estabelecidos pela indústria de semicondutores para a fabricação de componentes microeletrônicos. O processo de microfabricação disponível no LNLS e que é usado nesse trabalho é similar ao processo LIGA, descrito anteriormente, e apresenta basicamente 2 etapas: a primeira baseada na técnica de fotolitografia por UV (raio ultravioleta) e a segunda baseada na eletrodeposição de metais (ou também visto na literatura como “electroplating”), que serão melhor detalhadas a seguir.

4.1.1. Princípios da Fotolitografia por UV

A técnica de fotolitografia, basicamente, consiste em sensibilizar através de luz ultravioleta uma região numa camada de polímero foto-resiste, que cobre o material no qual se deseja construir o micromecanismo (por exemplo, níquel e cobre eletrodepositados, lâmina de aço inox), como em MADOU (1997) e em RIBAS (2000). O polímero define a área que não deve ter eletrodeposição posteriormente (ou em alguns casos, o oposto), ou seja, a topologia correspondente a geometria do molde da peça que se deseja fabricar (mais adiante o processo de microfabricação será explicado como um todo, para facilitar sua compreensão). Uma das etapas mais importante é a sensibilização da região na camada de polímero, pois a precisão de fabricação da peça depende da precisão com que se consegue iluminar a forma desejada do motor na camada de polímero e gerar o molde da micro-estrutura. Para isso é necessário fabricar máscaras (fotolitos no caso deste projeto) com precisão suficiente para definir as

regiões em que a luz ultravioleta pode passar e atingir o polímero (MADOU, 1997). Existem basicamente 2 tipos de foto-resistes: negativo e positivo. No foto resiste positivo, a região onde a luz (UV no caso) é bloqueada pela máscara, ele permanece intacto na revelação, já onde a luz incidiu diretamente, o resiste é removido na revelação. No caso do resiste negativo, acontece analogamente o oposto, ou seja, onde incide a luz é onde o resiste permanece intacto e onde a luz é bloqueada é onde o resiste é removido (MADOU, 1997). Durante o projeto de estruturas de MEMS deve-se levar em consideração o tipo de foto-resiste para poder se planejar a fabricação da estrutura.

Em muitos processos de microfabricação encontrados na literatura, existem vários fotolitos para várias camadas na construção do micromotor, gerando estruturas mais complexas. Para ilustrar esse processo, observe a figura abaixo que apresenta duas máscaras usadas em um projeto de micromotor encontrado na literatura (FRANGOULT, 1994). Embora a figura mostre somente as máscaras da trilha e do rotor e do estator, nesse caso, foram feitas quatro máscaras: uma foi usada uma máscara para a fabricação da trilha, outra para a fabricação do rotor e do estator, outra para deposição de uma camada de sacrificio (que será melhor discutido mais adiante) e outra para a fabricação do eixo.

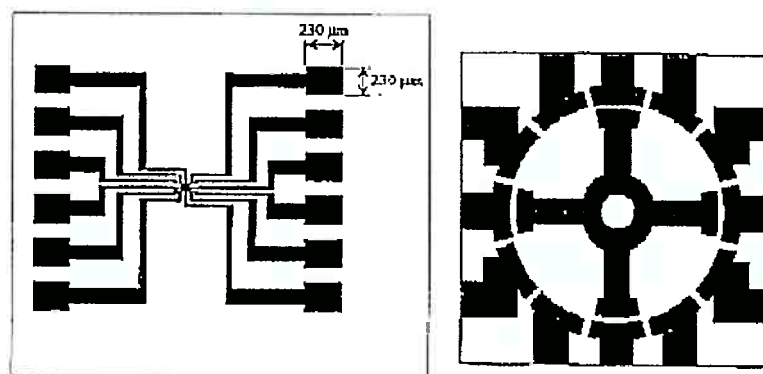


Figura 28 - Exemplo de máscaras para projeto de micromotor (FRANGOULT, 1994): trilha (à esquerda) e estrutura do motor (à direita).

Nesse caso, não é possível usar uma mesma máscara para o rotor e o estator, por causa da presença de uma camada de sacrificio. Entretanto, isso dificulta e encarece o

processo de fabricação do micromotor. Por isso, nesse projeto, no entanto, são gerados apenas 3 tipos diferentes de máscaras: para a trilha de circuitos elétrico de acionamento do micromotor, para a fabricação do rotor e para a fabricação do conjunto eixo/estator.

Por fim, vale destacar que o processo de construção do fotolito pode ser melhorado com o uso de técnicas de emulsão por fotorredução e fotorrepetição.

4.1.2. Fotolitos de Emulsão por Fotorredução e Fotorrepetição

Uma forma de aumentar a resolução do fotolito é, em vez de usar o processo de impressão da máscara, usar um processo químico de emulsão para construção do próprio fotolito. Na literatura e na prática, existem basicamente dois processos de confecção de máscaras de alta resolução: a fotorredução e a fotorrepetição.

O processo de fotorredução se baseia na projeção óptica do desenho de uma máscara sobre um anteparo de forma que esse desenho é reproduzido de forma reduzida. A repetição desse processo com a fabricação do fotolito por emulsão óptica ao final de cada redução. No laboratório do CCS (Centro de Componentes Semicondutores) da UNICAMP, que produz os fotolitos usados pelo LNLS (que por sua vez acompanha e ajuda esse projeto), o processo de fotorredução usa lentes ópticas de redução de 10x.

Já o processo de fotorrepetição, utiliza basicamente o mesmo processo, mas em uma escala menor ainda, usando lentes ópticas de redução de 5x a partir de uma máscara produzida no processo de fotorredução (LARA, 2001).

A figura a seguir mostra os equipamentos usados para realizar a fotorredução e a fotorrepetição no laboratório do CCS em Campinas.

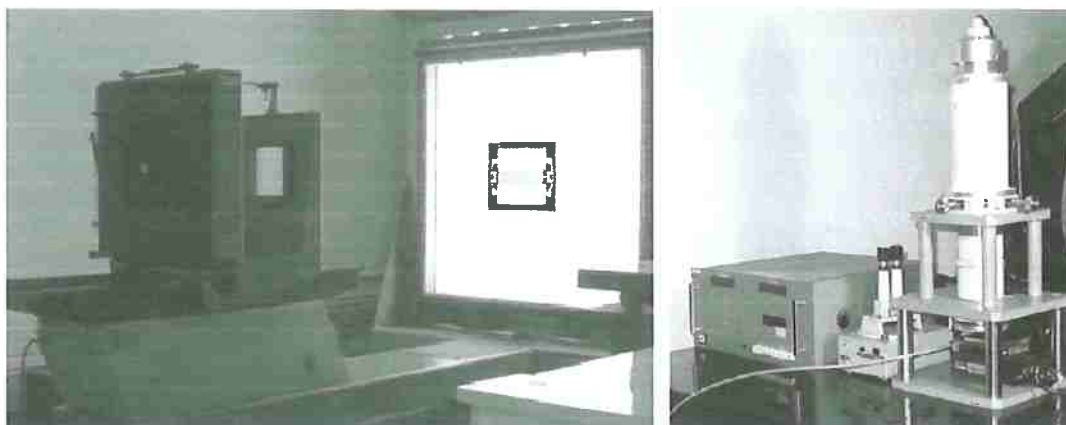


Figura 29 - Equipamento de fotorredução, à esquerda, e de fotorrepetição, à direita (LARA, 2001).

Por fim, a tabela abaixo destaca a resolução do processo de redução da máscara nos dois processos. Pode-se notar que o processo de fotorrepetição produz fotolitos de maior resolução que o processo de fotorredução. Isso será melhor abordado na seção de microfabricação dessa dissertação.

	Redução	Erro encontrado:
Fotorredução:	10X	1-3 μm
	20X	0,5 - 1,5 μm
Fotorrepetição:	50X	0,2 - 0,6 μm
	100X	0,1 - 0,3 μm

Tabela 1 – Comparação entre o processo de fotorredução e fotorrepetição.

4.1.3. Princípios da Eletrodeposição

A eletrodeposição de metais acontece como mostra a Figura 30, em que o anodo representa um eletrodo de níquel e o catodo é onde se localiza a estrutura do molde de MEMS (do micromotor) em que se pretende eletrodepositar níquel. Ambos os eletrodos são colocados em um banho de solução de níquel-sulfato com reagentes químicos (para melhorar e agilizar o processo), onde acontece a eletrodeposição (LARSEN, 2001).

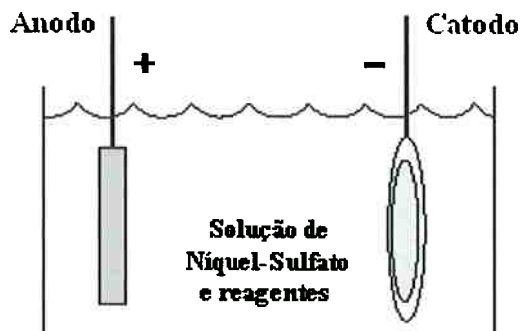


Figura 30 - Montagem da eletrodeposição do Níquel.

Os eletrodos são ligados a potenciais elétricos, como mostra a figura, e uma corrente elétrica atravessa a solução de Níquel-sulfato de forma a gerar um campo elétrico homogêneo sobre a superfície plana do catodo (como é mostrado na figura), promovendo uma deposição plana e uniforme dentro do molde posicionado no catodo. Essa corrente elétrica gera reações químicas nos eletrodos, promovendo o processo de eletrodeposição, da seguinte forma:



Dessa forma, como pode ser visto na expressão (76), o níquel é depositado no catodo e a taxa de deposição do níquel depende diretamente da intensidade da corrente elétrica, portanto, podendo ser controlada durante o processo de eletrodeposição. Esse assunto encontra-se melhor detalhado na referência BRAUNSTEIN (1973).

4.2. Processo de Microfabricação

O processo de microfabricação usado nesse projeto está esquematizado na Figura 31. Como já foi descrito anteriormente, esse processo utiliza técnicas de fotolitografia por exposição à UV e eletrodeposição de metais, que é o processo disponível no Laboratório de Microfabricação do LNLS e também usado em alguns trabalhos da literatura (CHIEN-HUNG, 2002).

Como pode ser visto na Figura 31, são basicamente 9 etapas que compõem o processo de microfabricação da trilha juntamente com o conjunto eixo/estator e 7 etapas que compõem a fabricação do rotor do micromotor. Na realidade, a fabricação de cada uma dessas peças que fazem parte do micromotor podem ser interpretadas juntas, por apresentarem várias etapas similares que são ordenadas de acordo com a construção física do micromotor, como será visto a seguir. Dessa forma, inicialmente vamos tratar do processo de microfabricação da trilha juntamente com o conjunto eixo/estator, mostrado na Figura 31.

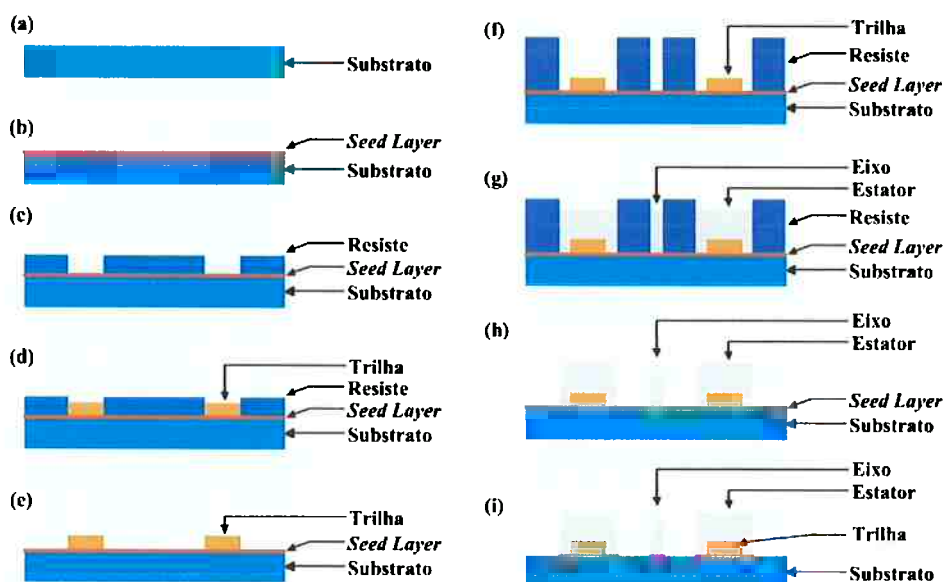


Figura 31 - Seção transversal da estrutura da trilha, do eixo e do estator do micromotor durante o processo de fabricação.

A primeira etapa (mostrada na Figura 31(a)) é basicamente a preparação do substrato. Como pode ser visto na literatura (o que será mostrado nesse capítulo), em vários projetos de micromotores é usado um substrato de silício (muito comum na indústria de micro-componentes), no entanto, nesse projeto é usado um substrato de alumina que é um material mais rugoso e sem problemas de aderência das estruturas, uma vez que o silício apresenta uma aderência a estruturas muito ruim. Em alguns trabalhos da literatura, faz-se micro-canais no substrato ou em uma camada superior a este, para começar o crescimento da estrutura de MEMS (por eletrodeposição), melhorando sua aderência, criando, portanto, um estrutura de raiz (*root construction*)

para a peça de MEMS (CHIEN-HUNG, 2002), por causa da baixa aderência do substrato. Nesse trabalho, isso não é necessário graças ao uso da alumina.

Na segunda etapa (mostrada na Figura 31(b)) é depositada uma camada chamada na literatura de *seed layer*. Essa camada, depositada por um processo chamado *sputtering* (CHIEN-HUNG, 2002), é comum nos processos de microfabricação e é a camada que permite a eletrodeposição e melhora a aderência de alguns metais ao substrato. Nesse projeto, essa camada é composta por 200 ângstrons de titânio e 600 ângstrons de ouro.

A terceira etapa (mostrada na Figura 31(c)) corresponde à deposição do molde de resiste através da técnica de fotolitografia por exposição à UV, já discutida. Na fabricação dos protótipos desse projeto, essa seqüência mostrada na Figura 31 se repete três vezes em todo processo de fabricação do motor (uma para cada máscara), como será discutido mais a seguir. Nesse caso, a aplicação do resiste visa criar um molde para a eletrodeposição da trilha elétrica, onde é usado o resiste AZ-4620 (que é um resiste positivo) com espessura de 10 micra.

Na quarta etapa (mostrada na Figura 31(d)), ocorre a eletrodeposição, já discutida. Na figura mostra o crescimento (eletrodeposição) da estrutura da trilha, mas isso ocorre similarmente para o conjunto eixo/estator e para o rotor. Essa estrutura cresce dentro do molde de resiste e é usado ouro para a eletrodeposição da trilha, inferior a 10 micra.

Na quinta etapa (mostrada na Figura 31(e)), o molde de resiste é removido, para a obtenção da estrutura final da trilha. Para remover o molde oriundo do resiste positivo, é usado acetona.

Na sexta etapa (mostrada na Figura 31(f)), se inicia a deposição da estrutura do eixo e do estator do micromotor. A mesma estrutura em que foi fabricada a trilha é usada na fabricação do conjunto eixo/estator, para que este sobreponha a trilha na mesma placa de substrato. Assim, seguindo o processo já discutido de fotolitografia, é aplicado o resiste do conjunto eixo/estator, o resiste SU-8 100 (que é um resiste negativo) com espessura de 60-100 micra. Para ilustrar essa etapa, a Figura 32 mostra fotos dos moldes de resiste de um rotor (à esquerda) e de um estator com eixo (à direita), que foram obtidos no trabalho reportado na referência (CHIEN-HUNG, 2002).

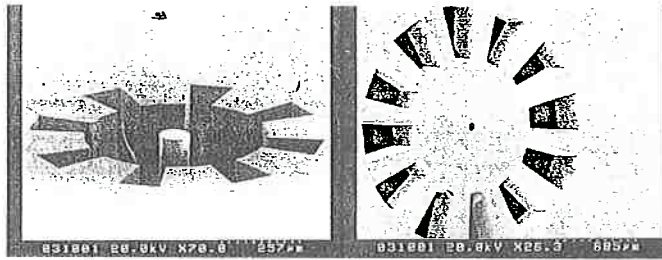


Figura 32 - Exemplo de moldes de resiste SU8 do projeto de micromotor da referência CHIEN-HUNG (2002).

Na etapa seguinte, a sétima etapa (mostrada na Figura 31(g)), é eletrodepositado níquel dentro do molde de resiste para formação do conjunto eixo/estator, sendo aconselhável na literatura que atinjam uma altura de $2/3$ da altura do molde, para minimizar as tensões internas que podem prejudicar a fixação da estrutura na remoção do molde (próxima etapa) (CHIEN-HUNG, 2002). Note que a estrutura do estator fica sobreposta a estrutura da trilha, garantindo contato elétrico.

Na oitava etapa (mostrada na Figura 31(h)), a camada de resiste é removida quimicamente usando um removedor próprio, disponível no LNLS. Como já mencionado, essa etapa de remoção de molde é uma etapa delicada, pois existe pouca informação na literatura sobre técnicas de remoção de moldes de resiste que removam o molde sem danificar o resto da estrutura, tornando essa etapa muito delicada (CHIEN-HUNG, 2002). Também é reportado na literatura problemas na remoção do molde, como é mostrado na figura a seguir. Como pode ser observado, na primeira foto, não houve remoção por completo do resiste na estrutura do rotor e na segunda foto, a remoção do resiste causou o descolamento de parte da estrutura do estator.

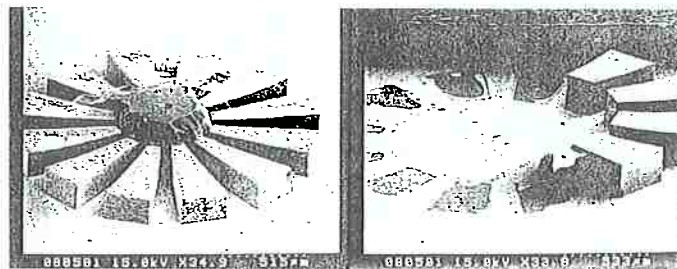


Figura 33 - Exemplos de problemas na remoção do molde de resiste (CHIEN-HUNG, 2002).

Na nona e última etapa da fabricação das estruturas de trilha, eixo e estator do micromotor (mostrada na Figura 31(i)), a camada *seed layer* é removida quimicamente para evitar que haja contato elétrico entre o estator, o eixo e a superfície de apoio do rotor. Vale ressaltar que essa camada é, em parte, composta por ouro, portanto, em sua remoção, uma pequena camada da trilha (também de ouro) é removida junto. No entanto, essa camada é insignificante para a estrutura final da trilha elétrica do micromotor.

Como já foi mencionado, o processo de fabricação do rotor é similar ao mostrado anteriormente, no entanto, cabe uma explicação de suas diferenças. A figura a seguir mostra a microfabricação da estrutura do rotor.

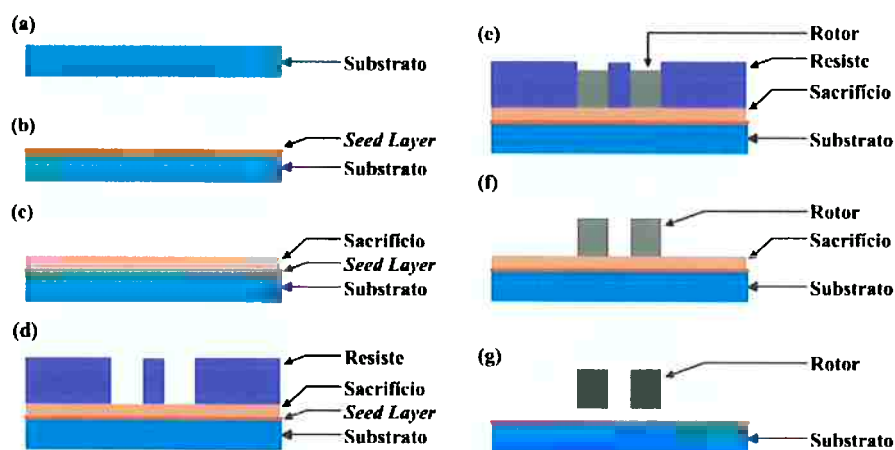


Figura 34 - Seção transversal da estrutura do rotor do micromotor durante o processo de fabricação.

A primeira e a segunda etapas do processo de fabricação do rotor (mostradas nas Figura 34(a) e Figura 34(b)) são iguais às duas primeiras etapas do processo mostrado anteriormente.

Na terceira etapa (mostrada na Figura 34(c)) é depositada (usando a técnica de eletrodeposição) a camada sacrificial de Cobre. Essa camada serve para a microfabricação da estrutura, mas é removida no final do processo, como será visto mais adiante, para que o rotor seja solto do substrato e possa ser posicionado livremente na estrutura final do micromotor.

Na quarta etapa (mostrada na Figura 34(d)), é aplicado o resiste para criar o molde do rotor da mesma forma que já foi discutido.

Na quinta etapa (mostrada na Figura 34(e)), a estrutura do rotor é eletrodepositada sobre a camada de sacrifício de cobre. Nesse processo de eletrodeposição também é usado níquel para a estrutura do rotor. Na etapa seguinte, a sexta etapa (mostrada na Figura 34(f)), o resiste é retirado com um removedor próprio, disponível no LNLS.

Por fim, na sétima e última etapa (mostrada na Figura 34(g)), a camada de sacrifício é removida quimicamente e a estrutura do rotor fica livre. Para concluir a construção do micromotor, basta colocar manualmente a estrutura do rotor sobre a placa que contém as estruturas da trilha, do eixo e do estator.

4.3. Estudo de projetos de micromotores

Antes de se prosseguir com o projeto do protótipo de micromotor eletrostático desse projeto, foi realizada um estudo na literatura dos modelos de micromotores similares reportados, para poder estimar as dimensões do protótipo do micromotor baseando-se em projeto já discutidos na literatura. Embora existam muitas referências quanto ao uso, aplicação e fabricação desses motores, poucas delas fornecem sua geometria detalhada com os valores de seus parâmetros geométricos. Essas são descritas logo abaixo.

Abaixo são apresentados alguns modelos de motores encontrados na literatura e contidos nas referências bibliográficas desse trabalho. Para cada caso, mostram-se os principais parâmetros construtivos e figuras do motor e de seu projeto, encontrados nos artigos pesquisados. A partir desse levantamento de informações, foram estabelecidas um protótipo de um projeto de um micromotor eletrostático para posterior análise e comparação com o motor otimizado desse projeto.

Em YASSEEN (1999a) temos a aplicação de um micromotor para *scanners* de alta-precisão, como já discutido. A Figura 7(b) mostra uma foto desse motor e a tabela abaixo mostra suas dimensões.

Parâmetros do micromotor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	5,5
diâmetro do rotor	500
<i>gap</i> entre rotor e estator	1 e 2
diâmetro do eixo (<i>bearing</i>)	50
folga do eixo (<i>clearance</i>)	0.5

Tabela 2 – Dimensões do micromotor de YASSEEN (1999a).

Na fabricação desse motor é mencionada uma camada de isolamento elétrica de 4500 ângstrons de nitreto de silício em um substrato de silício, em seguida a deposição de uma camada de sacrifício de 3,5 μm de PSG e por fim a deposição do estator e do rotor de Polissilício.

Em MOURLAS (1996) é discutido o armazenamento de dados em bits impressos no rotor de micromotores eletrostáticos. A foto desse motor é mostrada na Figura 10.

Esse motor apresenta 500 μm de diâmetro do rotor e um espaçamento (*gap*) entre estator e rotor de 1 μm . Na próxima figura é mostrado um esquema de um corte de seção transversal desse motor. De acordo com a referência, as espessuras mostradas na figura são: camada de isolamento elétrica de 4500 ângstrons de nitreto de silício; camada de sacrifício de 3,5 μm de PSG; camada do estator e do rotor de 5 μm de Polissilício com alta porosidade; e camada de 1 μm de Polissilício para o eixo (*bearing*), como mostra a figura abaixo.

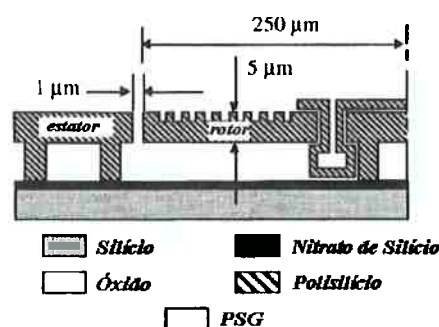


Figura 35 - Esquema de corte transversal desse motor de MOURLAS (1996).

Em TAVROW (1991), também é projetado e fabricado um micromotor eletrostático. Trata-se de um motor 6:4 de 3 fases, como mostra a figura a seguir.

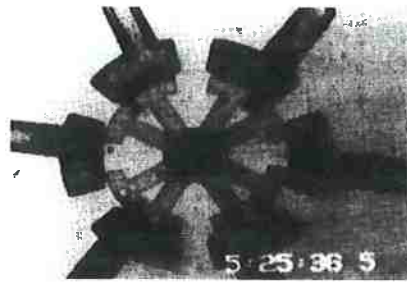


Figura 36 – Foto do micromotor de TAVROW (1991).

As dimensões desse motor estão na tabela abaixo. Para esse mesmo modelo de motor, foram fabricados 3 dimensões diferentes de eixo, como mostra a figura abaixo.

Parâmetros do micromotor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	2,55
raio do rotor	50
<i>gap</i> entre rotor e estator	1,65
raio do eixo (<i>bearing</i>)	5,9; 7,3; 8,8
folga do eixo (<i>clearance</i>)	0,35

Tabela 3 – Dimensões do micromotor de TAVROW (1991),

Em BART (1992) temos um projeto mais detalhado de motor eletrostático. Nesse artigo a dinâmica desses motores é estudada, principalmente quanto à influência do atrito. É mencionada a fabricação de um motor 12:8 de 3 fases com 50 μm de diâmetro do rotor e 1,5 μm de *gap* (mostrado na figura abaixo).

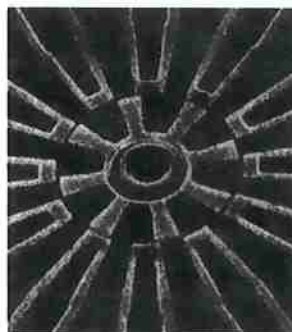


Figura 37 - Foto do motor fabricado em BART (1992).

Para fabricação desse motor foi usada uma camada de isolamento elétrica de nitreto de silício, uma camada de sacrifício de dióxido de silício e para a estrutura do estator e

do rotor foi usado Polissilício com alta porosidade. As dimensões desse motor são dadas por:

Parâmetros do micromotor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	2,3
raio do rotor	50,0
<i>gap</i> entre rotor e estator	1,5
raio do eixo (<i>bearing</i>)	5,0
folga do eixo (<i>clearance</i>)	0,3

Tabela 4 – Dimensões do micromotor de BART (1992).

Nos motores mostrados nessa seção, as dimensões são menores que as dimensões usadas nos protótipos desse projeto, como será visto mais adiante. Os principais fatores que ocasionam essa diferença de tamanho entre os micromotores descritos na literatura e os protótipos desse trabalho é que esse projeto fez uso de materiais mais simples e técnicas de fabricação e máscaras litográficas de menor custos (que é o caso da tecnologia de eletrodeposição), como será discutido logo a seguir.

4.4. Tecnologia de polissilício x eletrodeposição

Como pôde ser observado em todos os motores mostrados, o material que compõe suas estruturas de rotor, eixo e estator é o Polissilício, diferente do que é proposto nesse projeto, com o uso de níquel eletrodepositado. O uso do Polissilício é um reflexo do tipo de processo aplicado na fabricação destas estruturas: a microfabricação de superfície, discutida no capítulo 1, que é o mesmo processo empregado nas linhas de fabricação de CIs (circuitos integrados). No processo de microfabricação de superfície, a fabricação de estruturas complexa é extremamente facilitada, pois os materiais envolvidos (no caso o Polissilício e o PSG) são facilmente removidos por ataque químico seletivo. Outro fator importante a ser considerado no uso do Polissilício é a reprodutibilidade das características estruturais do material no processo. Para a eletrodeposição, os ataques químicos para remoção seletiva são mais complexos e muito raros (o maior uso fica na seletividade do cobre em relação ao níquel empregando-se solução química específica), além do fato de que a reprodutibilidade

estrutural do material é mais complexa devido a muitas influências do processo sobre o material. Outros fatores poderiam advir de suas propriedades mecânicas e eletrônicas para algumas aplicações (material deriva do silício, que é a base da microeletrônica).

Para se compreender melhor essa diferença de técnicas, observe a Tabela 5 (LARSEN, 2001).

Propriedades	Tecnologia de Polissilício	Tecnologia de Eletrodeposição
material estrutural	Polissilício	metais e ligas metálicas
propriedades magnéticas	nenhuma	baixa
técnica de deposição	<i>Physical Vapor Deposition</i> (PVD)	eletrodeposição
taxa de deposição	~80Å/min	~1µm/min
altura máxima da estrutura	~2-4µm	~30-100µm
Tmax durante o processo	600-900°C	100°C
preço	caro	barato

Tabela 5 – Comparação entre a tecnologia de Polissilício e eletrodeposição de metais.

Como pode ser observado na tabela acima, existem grandes diferenças entre as duas tecnologias. Uma das principais diferenças está na taxa de deposição e na altura máxima. Como se pode observar, a tecnologia de Polissilício fabrica estruturas mais finas. No entanto, apresenta temperaturas de processo muito elevadas o que restringe seu uso, principalmente no caso da compatibilidade com tecnologias de CIs. Tendo em vista essas diferenças, a tecnologia de Polissilício é muito mais cara e menos disponível que a tecnologia de eletrodeposição. Outro fator restritivo quanto ao uso do Polissilício é que a fabricação requereria o uso de *foundries* (empresas que fazem confecção de chips de silício) de microeletrônica para a produção em larga escala. No caso da eletrodeposição, a infra-estrutura existente poderia ser empregada para a fabricação com poucas adaptações.

O Níquel é o metal mais usado em técnicas de eletrodeposição. Dessa forma, cabe uma comparação entre o Polissilício e o Níquel usado na eletrodeposição, como mostra a tabela abaixo.

Propriedades	Polissilício	Níquel
ductibilidade	muito baixa	alta
tensão residual	~200MPa	~10MPa
técnica de deposição	PVD	eletrodeposição

Tabela 6 – Comparação entre Polissilício e Níquel.

Como se pode notar na tabela acima, o Níquel apresenta todas as propriedades de um metal e o Polissilício apresenta propriedades de cerâmica. Para componentes de MEMS, alta ductibilidade são características importantes dependendo de suas aplicações. Como também pode ser visto, o Níquel também apresenta menor valor de tensão residual (por causa da própria tecnologia de eletrodeposição), o que é uma boa característica para aplicação da técnica de microfabricação desse trabalho, como já discutido. A alta tensão residual observada no polissilício requer o uso de etapas de alívio de tensão que se caracterizam por deixar a estrutura sob temperaturas que podem chegar a 1100°C.

Por fim, vale ressaltar que a tecnologia disponível para microfabricação no LNLS é a eletrodeposição de Níquel e alguns estudos mostram que essa técnica quando usada na fabricação de micromotores oferecem rotores com alta razão de aspecto e estatores com maior área capacitiva, características que ajudam a aumentar o torque final dos micromotores eletrostáticos fabricados.

4.5. Aspectos construtivos que influenciam na dinâmica do micromotor

Esta seção é dedicada ao estudo e análise de aspectos da dinâmica do micromotor eletrostático e de alguns de seus aspectos práticos a partir da revisão bibliográfica do assunto. Essa análise é de grande importância para experimentação prática dos protótipos de micromotores desenvolvidos nesse trabalho.

Abaixo são relatados experimentos da literatura com micromotores eletrostáticos construídos de maneira similar à usada nesse projeto. Os aspectos práticos relatados estudam a variação de torque em relação a algumas variáveis de projeto, indicam a configuração ideal para obtenção do torque máximo e estudam como a geometria do micromotor pode influenciar diretamente no seu funcionamento estático e dinâmico.

Antes de tudo, deve-se ter em vista que esse projeto procura otimizar o projeto de um micromotor eletrostático, o que abrange também a seleção de parâmetros que ajudem a se projetar um micromotor visando máximo torque, considerando também aspectos de seu processo de microfabricação, alguns dos quais, já foram descritos na seção anterior.

Primeiramente, é aconselhável que se fabrique micromotores que tenham a proporção de pólos do estator para dentes do rotor de 3:2, pois essa configuração é que apresenta maior torque desenvolvido (TAVROW, 1991). Podemos ilustrar esse argumento com o fato de que a maioria de motores de passo (que, embora sejam governados por forças magnéticas, apresentam funcionamento similar) fabricados segue essa mesma proporção, visando maximizar seu torque (TAI, 1995).

Outro aspecto abordado na literatura é que o *gap* entre estator e rotor e a folga do rotor no eixo (*clearance*) devem ser minimizado no projeto, para assegurar menor distância entre o dente do rotor e o pólo do estator, o que proporciona maior força de atração, de maneira segura, que evite possível interferência mecânica entre o eixo e o rotor ou mesmo entre rotor e estator (TAVROW, 1991). Vale lembrar que existe um limite para se diminuir o *gap* e a folga no eixo que é definido pela resolução de microfabricação.

A proporcionalidade do torque com relação aos parâmetros de projeto representa um estudo de grande importância na análise dinâmica e predição do funcionamento do micromotor. Segundo estudos de micromotores da literatura, o torque desenvolvido do micromotor é proporcional a $G^{-1,7}$ (onde G é o valor do *gap*), diretamente proporcional ao raio do rotor e proporcional ao quadrado da voltagem aplicada nos pólos do estator (TAVROW, 1991).

Por fim, o principal fator que influencia diretamente no funcionamento do motor e que representa um problema a ser vencido para obtenção de um torque máximo é a questão do atrito no micromotor.

Uma das primeiras atitudes que podem ser tomadas a fim de se reduzir as forças de atrito no micromotor é a construção de uma estrutura abaixo do rotor que diminui a área de atrito do rotor com a superfície da placa de alumina. Essa estrutura é chamada da literatura de *bushing*. A Figura 38 mostra os formatos de *bushing* mais comumente encontrados na literatura.

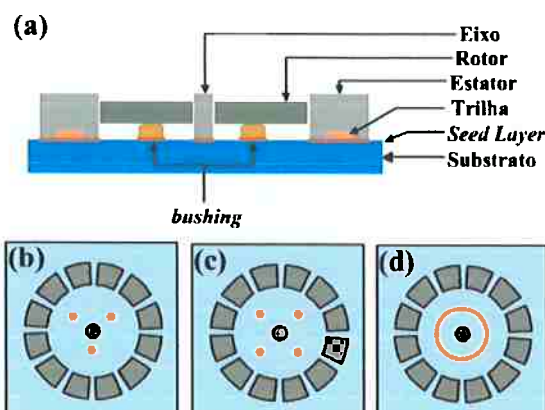


Figura 38 - Formatos de *bushing* encontrados na literatura.

Na figura anterior, a parte (a) representa um corte transversal na estrutura do micromotor e mostra que o rotor fica em contato somente com o *bushing*, que apresenta uma pequena área de contato com o rotor. Nas partes (b), (c) e (d) são mostrados três modelos de *bushing* na estrutura do motor sem o rotor, apresentados na literatura (BART, 1992): três pontos, quatro pontos e anel circular, respectivamente.

Com o uso do *bushing*, estudos comprovam que a influência da gravidade no atrito do rotor é desprezível, para modelos de micro motores que apresentam tamanho similar aos apresentados na seção anterior, e a influência da área de contato do *bushing* no atrito estático e no atrito dinâmico é de ordem de grandeza pequena com relação ao torque desenvolvido (TAVROW, 1991).

Dessa forma, podemos concluir que o atrito no micromotor sofre grande influência: do atrito viscoso com o ar (dada à micro-escala de toda estrutura); das forças de atração que possíveis cargas elétricas (ou mesmo voltagem) desenvolvidas no rotor entre este e a base de substrato de alumina; e, principalmente, atrito entre o eixo e o furo do rotor.

Para partida do rotor, a influência do atrito com o eixo representa um grande problema, que pode prejudicar ou mesmo impedir seu funcionamento. Na dinâmica do motor, a influência desse atrito é relatada na literatura somente para casos específicos e o valor de sua influência apresenta uma faixa relativamente grande de variação, como, por exemplo, de 25% a 10% (BART, 1992 e TAVROW, 1991).

Para análise da influência do atrito viscoso, a partir de conceitos da teoria de escoamento de fluidos, foi desenvolvida uma expressão que pode prever o valor do contra-torque gerado por esse atrito viscoso (TAVROW, 1991):

$$T_{\text{visc}} = \frac{\pi\eta R_0^4}{H_b} \dot{\theta} \quad (77)$$

onde T_{visc} é o contra-torque gerado, η é a viscosidade absoluta do ar ($1,83 \cdot 10^{-5}$ kg/ms), R_0 é o raio do rotor, $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do rotor e H_b é a altura da estrutura do *bushing*.

Essa expressão é para casos de escoamento laminar do ar, que representa o escoamento do ar no movimento do rotor, dadas sua micro-escala e as velocidades máximas alcançadas em experimentos encontrados na literatura. A influência desse atrito no torque desenvolvido do micromotor é considerada pequena, variando de 15% a 8% (BART, 1992 e TAVROW, 1991).

5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Nesse capítulo, são apresentadas considerações e características do funcionamento do software de MOT do micromotor eletrostático. Na seção 5.1 é apresentada a estrutura de arquivos necessários para o funcionamento do software de otimização desenvolvido, além dos arquivos de saída que permitem a visualização do resultado final do MOT. Além disso, essa seção trata também da seqüência lógica do software de otimização. Na seção 5.2, são apresentadas as principais características do software desenvolvido, bem como as opções permitidas ao usuário para obtenção de resultados por diferentes formas matemáticas, e considerando o uso de diferentes parâmetros de otimização. Por fim, a seção 5.3 trata da interface gráfica desenvolvida para visualização dos resultados da otimização.

5.1. Estrutura do software de MOT

O primeiro aspecto do programa de otimização de micromotor eletrostático que deve ser analisado é a entrada do programa. Para simplificar o funcionamento do programa e sua operação por parte do usuário suas entradas são intermediadas por uma rotina escrita em MATLAB, ou seja, o programa em C lê um arquivo *.txt que é escrito por uma rotina de MATLAB. Dessa forma basta o usuário entrar com os dados direto na rotina de MATLAB que todos os dados são reorganizados para serem facilmente interpretados pelo programa desenvolvido. Essa rotina do MATLAB (que está apresentada no Anexo C) escreve dois arquivos *.txt que são entradas para o programa de MEF. Um desses arquivos contém somente as características da otimização (que nessa etapa do projeto ainda não apresenta muitos dados) e o outro arquivo tem todas as informações sobre a malha de elementos finitos, casos de carga e condições de contorno. Para construção desse arquivo da malha de finitos, é necessário que haja uma interação com o ANSYS para formação da malha de elementos finitos através do próprio *mesh* do ANSYS. Dessa forma, além de dados inseridos pelo usuário, a rotina de MATLAB tem como entrada um arquivo de saída do ANSYS que cede todas as informações necessárias para se reconstruir a malha de elementos finitos. Toda essa interação entre as rotinas está representada na Figura 39.

Como pode ser observado no organograma, o software possui várias saídas. A maioria dessas saídas é opcional e tem somente a função de controle e verificação do funcionamento do programa. A saída indicada na figura como “Arquivo de Controle” apresenta a data da última vez que o programa foi rodado e o tempo e duração de cada iteração e as características e opções que foram usadas. Na saída de arquivos de verificação, são criados vários arquivos *.txt que informam o valor de algumas variáveis e matrizes do sistema para um controle mais detalhado por parte do programador. As informações mais importantes e fundamentais para o software, como o número de elementos e nós e valores da função objetivo do MOT também aparecem na janela do programa. A janela também informa por quais partes a rotina o programa está passando, para que se possa saber quando há um possível *bug* ou travamento.

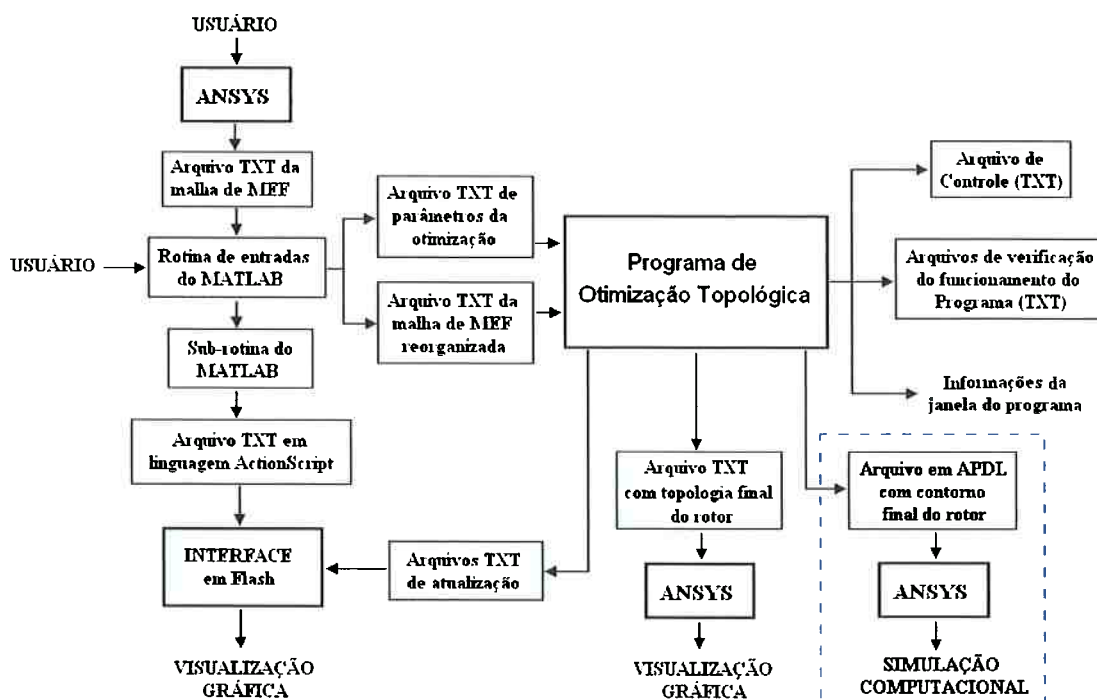


Figura 39 - Organograma das atividades e do funcionamento do programa desenvolvido.

O principal arquivo de saída do programa apresentado na Figura 39 anterior mostra a solução do problema de MOT. Esse arquivo mostra a malha de finitos e a densidade de cada elemento que forma a nova topologia do rotor do micromotor. Essa

saída é um arquivo *.txt e não pode ser interpretada sem antes passar pelo ANSYS. Portanto essa saída está escrita em linguagem APDL (a linguagem do ANSYS) para servir de arquivos de entrada para o ANSYS para poder ser visualizada pelo usuário. Entretanto, a visualização dos resultados pelo ANSYS é lenta, custosa do ponto de vista computacional e não permite a identificação imediata e simultânea dos progressos da otimização pelo usuário.

Outra saída do programa que apresenta grande importância nesse trabalho está denominada como “Arquivo em APDL com contorno final do rotor” e está circulada com um retângulo de linha pontilhada na Figura 39 (pois esse arquivo representa um interligação entre a parte de Otimização Topológica, capítulo 8, e a de Simulação Computacional, capítulo 6). Essa saída é o resultado de um algoritmo (desenvolvido nesse trabalho) que interpreta o contorno final de toda estrutura otimizada. Esse arquivo é lido no software ANSYS a fim de se simular o modelo otimizado. Vale ressaltar que esse mesmo algoritmo, usando o mesmo resultado, pode gerar um arquivo de CAD para projeto e eventual microfabricação do modelo otimizado.

Na figura anterior também se podem notar outros arquivos de saída do programa de otimização, intitulados de “Arquivos TXT de atualização”, e um fluxo de arquivos que saem da rotina de MATLAB e entram no bloco que representa a Interface do programa em Flash. Esses arquivos, juntamente com a Interface em Flash, serão melhor explicado mais adiante, que substitui a necessidade da visualização gráfica do resultado no ANSYS.

Quanto ao código fonte do programa de otimização, ele pode ser dividido em 14 partes e chama outras 7 funções externas. As 7 funções são:

- `elemel.c` – Essa função monta a matriz de rigidez de cada elemento através dos cálculos das funções de forma, do jacobiano, das derivadas do jacobiano, entre outros.
- `dsprsin.c` – Essa função trabalha com matriz esparsa e reorganiza a matriz de rigidez de forma a agilizar a resolução do problema, para resolução do problema usando o método dos Gradientes Conjugados.
- `linbcg.c` – Essa função resolve o problema matricial $A.X=B$, onde, nesse caso, A seria a matriz de rigidez do problema, X é a matriz de respostas do problema

(potenciais elétricos) e B é a matriz de carga elétrica – para resolução do problema usando o método dos Gradientes Conjugados.

- `skyline.c` – Essa função faz o mesmo que a função `dsprsin.c`, mas para o caso do uso do método de Gauss.
- `gauss.c` - Essa função faz o mesmo que a função `linbcg.c`, mas para o caso do uso do método de Gauss.
- `útil.c` – Essa matriz ajuda na alocação e liberação da memória. Essa função apresenta grande utilidade uma vez que o programa é rodado várias vezes, assim, não corre-se o risco de falta de memória.
- `simplx.c` – Como já foi mencionado, essa função realiza a solução numérica da programação linear através do método Simplex.

Como destacado no próprio código fonte no Anexo B, as 14 partes em que se divide o programa de otimização e definem a seqüência lógica do programa (que está simplificada na Figura 21) são:

- Inicialização do *main* e das variáveis:

Nessa parte inicial se faz a declaração de todas as variáveis usadas no programa.

- Leitura de dados:

Nessa parte o arquivo de entrada com as informações da otimização é interpretado.

- Leitura da malha de finitos:

Como já foi mencionado, a malha de finitos é gerada pelo ANSYS e passada para um arquivo TXT simplificado através de uma rotina de MATLAB, para, por fim, ser lida e interpretada nessa parte do software, onde são montadas várias matrizes que serão usadas na parte do MEF como a matriz de conectividade, a matriz de coordenadas dos nós, a matriz de carga, a matriz de condições de contorno, etc.

- Alocação de memória:

Nessa parte são declarados as matrizes e vetores que serão usados na parte de MEF e na parte de MOT.

- Início do *loop* de otimização:

Zera ou atualiza variáveis que são usadas na otimização além de definir a condição de parada do *loop*, quando se atinge a convergência pré-definida depois do número mínimo de iterações ou caso seja atingido o número máximo de iterações permitidas (esses números também são pré-definidos nos arquivos de entrada e interpretados na parte de leitura de dados).

- Resolução do MEF:

Nessa etapa é realizado o MEF propriamente dito. De acordo com a conectividade a matriz de rigidez global é construída (chamando a função `elemel.c`), em seguida é reorganizada com a função a matriz esparsa e por fim o problema de MEF é resolvido com a função `linbcg.c`.

- Cálculo da função objetivo:

Nessa parte são calculados os valores de energia do sistema, como já descrito, necessários para o cálculo da função objetivo.

- Cálculo da sensibilidade:

Nessa parte do programa é calculado o vetor gradiente da função objetivo (a sensibilidade do problema de otimização), como descrito no capítulo 3.

- Definição dos limites móveis:

De acordo com o valor da função objetivo os limites móveis são definidos para cada iteração.

- Ativação do filtro:

Essa parte da rotina ativa o filtro que modifica os limites móveis para evitar problemas de “instabilidade xadrez” (ou checkerboard, como é conhecido na literatura internacional), em que elementos com densidades muito diferentes são formados lado a lado na estrutura otimizada, lembrando a imagem de um tabuleiro de xadrez (BENDSØE, 2003).

- Uso da rotina Simplex:

Nessa parte do programa, é chamada a função `simplx.c` que roda a programação linear usando o vetor gradiente da função objetivo, como já descrito.

- Verificação do *loop*:

Por fim, atualiza-se o vetor que guarda o desvio do novo valor da função objetivo em relação ao anterior, para se avaliar a convergência no início do próximo *loop*.

- Construção dos arquivos de saída:

A partir da matriz de respostas, escrevem-se os dois arquivos de saída que devem ser interpretados pelo ANSYS fazendo uso da linguagem APDL para definir nós, elementos e cores.

- Algoritmo de interpretação do contorno final:

Uma vez obtido o modelo otimizado, esse algoritmo analisa os elementos finitos com densidade 1 (ou seja, que representam o material do rotor) para definir o contorno final do rotor, de forma que não haja a necessidade da interpretação visual do modelo otimizado (como foi mostrado na Figura 25), uma vez que o próprio software fornece o contorno final. Ao final desse processo de interpretação, o algoritmo cria um arquivo de saída com o contorno final do rotor para ser simulado no ANSYS.

- Liberação de memória:

Usando novamente a rotina `util.c`, as variáveis usadas no programa são desalocadas na memória, para poder liberar memória.

5.2. Características do software de MOT

Essa seção explica algumas características do software de otimização desenvolvido como sua flexibilidade para variação dos parâmetros de entrada do usuário e padronização de alguns parâmetros para funcionamento correto do software (considerando somente o arquivo executável feito em linguagem C que representa o núcleo do software de otimização).

Como mencionado anteriormente, as entradas do software vêm de uma rotina de MATLAB (visto que o MATLAB apresenta uma linguagem simples e de rápida manipulação, possibilitando que este seja intermediário em várias etapas desse projeto). Essa rotina reorganiza algumas informações do ANSYS e do usuário, padronizando tudo para 2 arquivos TXT de fácil leitura para o programa em linguagem C. Dessa

forma, como também já foi mencionado, um dos arquivos TXT tem a estrutura da malha de elementos finitos criada no ANSYS (e reescrita pelo MATLAB) e o outro apresenta os parâmetros que podem ser variados pelo usuário como entrada do programa desenvolvido. Assim, esses parâmetros representam a flexibilidade do programa e serão descritos abaixo para melhor compreensão de como o usuário pode interagir com o programa de otimização do rotor de micromotor eletrostático.

Os primeiros parâmetros que podem ser variados dizem respeito às características físicas do micromotor, que são: sua espessura, a voltagem elétrica de excitação (ou a carga elétrica de excitação, como será visto mais adiante), valor da permissividade elétrica do vácuo e o valor da permissividade elétrica relativa do material que compõe o rotor.

Outro parâmetro de entrada é a definição de qual modelo matemático (que é chamado na literatura como *solver*) deve ser usado para resolução da equação final de MEF, mostrada pela eq.(22). Nesse item, o programa apresenta duas possibilidades, o uso do método de Gradientes Conjugados ou do método de Gauss.

Outra possibilidade de interação da resolução do problema de MEF com o usuário é a definição da forma de imposição das condições de contorno. Há duas formas de impor as condições de contorno no MEF Eletrostático: imposição de carga elétrica ou imposição de potencial elétrico através do método das condições de contorno de Dirichlet, como já abordado.

Também é dada ao usuário a opção de definir a restrição de volume da otimização como uma restrição de desigualdade de limite superior (menor igual) ou de limite superior (maior igual). Isso facilita testes no software para se obter a melhor configuração de parâmetros para a otimização do rotor do micromotor.

Os últimos parâmetros que podem ser alterados pelo usuário são os parâmetros da otimização topológica do problema. Entre esses valores, tem-se a definição de três níveis de limites móveis para atender à necessidade do programa de otimização de mudança de limite móvel de acordo com o raio de curvatura da curva da função objetivo (ver capítulo 3 sobre o MOT). Outra opção do usuário é a mudança do valor relativo da restrição de volume do problema que é imposto à função SIMPLX. O usuário também pode escolher o valor do chute inicial do problema, que é a densidade normalizada inicial do modelo do elemento no ciclo de otimização, e o valor da

densidade normalizada máxima permitida para atender à restrição do problema. O usuário também pode definir a aplicação de um filtro matemático, como já foi mencionado, para impedir o problema conhecido como *checkerboard*. Por fim, o usuário pode definir o número de iterações que o programa deve rodar ou se este deve rodar até atender a um critério de convergência, como já foi mencionado.

O outro arquivo TXT define a malha de elementos finitos dada pelo ANSYS. Para que a rotina de MATLAB (apresentada no Anexo C) possa interpretar corretamente a malha de finitos cedida pelo ANSYS, o modelo de finitos do ANSYS deve ser padronizado de uma forma específica. Essa padronização é necessária por causa de três fatores principais: definição dos eletrodos (pólos ativos do estator) para o caso A e para o caso B, como foi mostrado na definição do problema de otimização topológica na introdução; e definição da camada de elemento que representam o *gap* entre o estator e o rotor (isso é necessário, pois os elementos do *gap* participam do problema de MEF, mas não tem suas densidades normalizadas modificadas pela rotina *simplx.c* e, portanto, esses elementos precisam ser diferenciados para que o programa de otimização possa identificá-los). A definição dessa padronização é apresentada no Apêndice C.

5.3. Interface do software

Nessa seção, é mostrado como foi implementada a interface do software de otimização desenvolvido. Essa interface foi implementada de forma totalmente independente do programa de otimização, para que não houvesse propagação de erros entre os dois, visto que não é necessário correr esse risco, uma vez que a parte da interface e o programa de otimização tem funções totalmente diferentes. A interface para o programa de otimização foi desenvolvida em Flash.

O Flash é um programa desenvolvido pela Macromedia para criação de páginas e ou componentes gráficos e interativos para Internet, como, por exemplo, imagens, botões, menus e *banners*. O Flash gera gráficos vetoriais que são menores e mais ágeis que os arquivos *bitmap* e não perdem resolução quando ampliados, o que sempre foi problema nas figuras *bitmap*. Os gráficos e animações em Flash são construídos através de equações matemáticas, ou seja, são vetoriais, quando um computador abre

uma animação em Flash ele processa uma série de cálculos para construir a imagem. Um arquivo contendo uma série de informações matemáticas é muito menor do que um arquivo de *Bitmap* que contém todas as informações de uma figura, pixel a pixel. O *plugin* de Flash já está mais popular em *sites* e navegadores da Internet que o próprio Java. Pesquisas informam que o *plugin* já atingiu mais de 100 milhões de navegadores, abocanhando 77% do mercado. O primeiro lugar fica com as GIFs animadas, com 99%, e o Java na terceira posição, com 62%.

Uma das principais vantagens de criar a interface desse programa em Flash é que o *plugin* de Flash que permite a visualização dos gráficos da interface em ambiente Windows e em ambiente Linux (muito usado no departamento). Outra grande vantagem é a possibilidade de integração dos gráficos da interface em um ambiente de Internet, facilitando, dessa forma, a divulgação e expansão do conhecimento científico de forma mais direta. Não são conhecidas muitas aplicações do Flash como interface direta para programas de desenvolvimento científico, o que fortalece o fator de inovação desse trabalho, além do fato de que essa experiência contribui muito para agilizar a visualização de trabalhos de outras pesquisas de otimização do departamento.

Para implementação da interface foi usada a linguagem *ActionScript* que é a linguagem própria de programação orientada ao objeto para criação de interatividade e modelagem do Flash. Juntamente com o código em *ActionScript*, também foram usados alguns componentes gráficos como botões e campos de texto dinâmicos (campos de texto que têm seu conteúdo extraído de uma variável de programação), cuja explicação mais detalhada foge do escopo desse trabalho.

A Figura 39 mostra a lógica de entrada para o programa de interface, o que ajuda na compreensão de seu funcionamento básico. Primeiramente, a partir da rotina de MATLAB que gera as entradas para o programa de otimização, é usada uma sub-rotina de MATLAB que é especializada em usar os valores das coordenadas dos nós e da conectividade de MEF para criar um arquivo TXT em linguagem *ActionScript* que servirá de entrada para compilação da interface em Flash (essa sub-rotina está apresentada no Anexo F). Esse arquivo de entrada e todo o código em *ActionScript* são necessários para que o programa de interface possa recriar a malha de elementos finitos e toda interatividade que a interface oferece, como será discutido mais adiante. A outra entrada do programa de interface são arquivos de atualização no formato TXT que vêm

do programa de otimização. Esses arquivos têm a informação básica da evolução da otimização que é a iteração que o programa está realizando e o valor das densidades normalizadas atualizada para cada iteração.

A figura a seguir mostra os principais componentes da interface (que é composta de outras telas também, com maior interatividade, principalmente com o software de otimização). A figura mostra a situação inicial do programa de interface, quando não há nenhum resultado da otimização e todas as densidades são iguais.

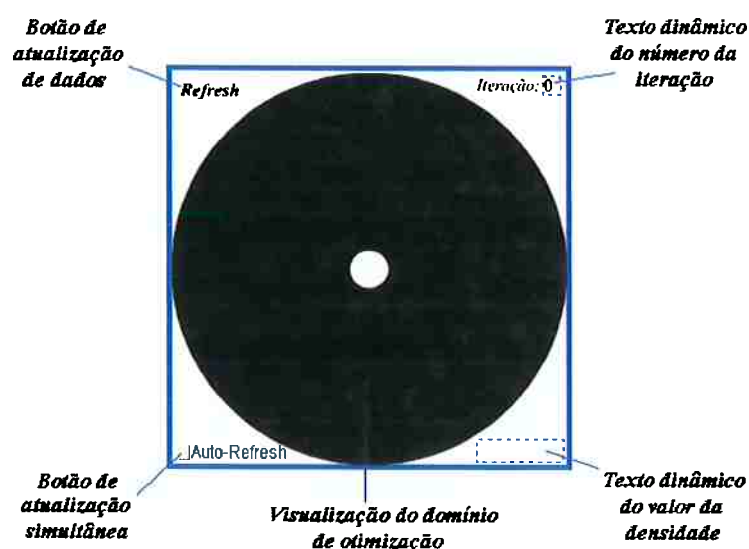


Figura 40 - Janela do programa de interface com explicação de seus elementos gráficos.

O botão *refresh* ativa um comando que atualiza o texto dinâmico da iteração e a tela de visualização geral da otimização, além de habilitar o funcionamento do texto dinâmico das densidades. O botão *Auto-refresh* ativa um comando que continuamente atualiza os dados de iteração e a tela de visualização até o final do programa de otimização, tornando, portanto, a visualização da otimização simultânea ao programa principal de otimização. Ao se clicar nos elementos da malha de finitos da tela de visualização, suas densidades aparecem no texto dinâmico de densidades, o que demonstra que os elementos da tela de visualização também possuem função de botão simples.

Para transportar as coordenadas dos elementos finitos e de seus nós do sistema de coordenadas do ANSYS (onde é criada a malha de finitos) para o sistema de coordenadas do Flash, para poder criar a visualização mostrada na figura anterior, foi usada a formulação de CAD que está apresentada no Apêndice D.

Dessa forma, devemos encontrar, de acordo com a figura abaixo, as coordenadas do sistema $[x_M, y_M, z_M]$ (que é o sistema da malha do ANSYS) para o sistema $[x_1, y_1, z_1]$ que é o sistema do Flash, passando pelo sistema $[x_2, y_2, z_2]$ que é o sistema da tela de visualização, paralelo ao sistema do ANSYS e sujeito a um fator de escala para preencher toda tela de visualização.

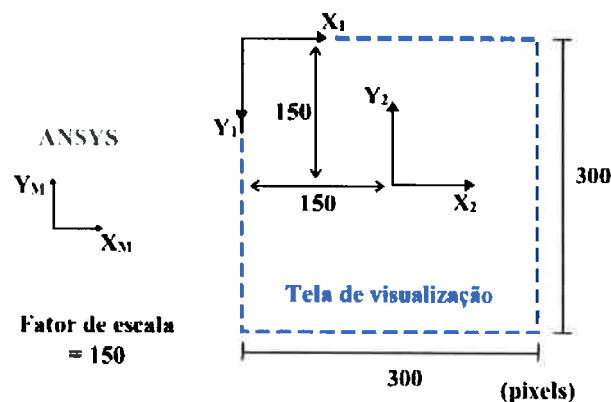


Figura 41 - Transformação de coordenadas para a tela de visualização da interface.

Assim, usando as equações dos fundamentos teóricos, obtemos a seguinte conversão de coordenadas que foi implementada para criar o código fonte em ActionScript para construção do programa de interface:

$$x_1 = 150 + 150x_M \quad (78)$$

$$y_1 = 150 - 150y_M \quad (79)$$

6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MICROMOTOR

Nesse capítulo são mostrados e discutidos os resultados obtidos na simulação do projeto de um micromotor eletrostático, com o objetivo de se analisar a influência das variáveis de projeto do motor no torque final. São analisados resultados de quatro modelos de MEF no software ANSYS, abordando duas geometrias diferentes de micromotores. Vale destacar que também foram feitas simulações da rotina de MEF do programa desenvolvido, para comprovar a eficácia dos resultados da parte de MEF do programa através de comparações com simulações feitas no software ANSYS. Essas simulações estão apresentadas no Apêndice B.

Como já mencionado, para realizar essa simulação, que é uma simulação no ANSYS, foi usada uma rotina de MATLAB para gerar um arquivo de entrada para o ANSYS em linguagem APDL, que está no Anexo A. A Figura 42 abaixo apresenta a função dessa rotina na simulação do motor.



Figura 42 - Esquema de entrada de dados na simulação.

Vale destacar que essa rotina é importante, pois são feitas 7 simulações diferentes no ANSYS para cada modelo de micromotor. Cada uma dessas 7 simulações é para uma posição diferente do rotor em relação ao estator, pois a simulação do motor é uma simulação estática. Essa defasagem entre o rotor e o estator, como já foi discutido, é de no máximo 15° (desalinhamento máximo) e no mínimo 0° (alinhamento), como é mostrado na Figura 43 abaixo.

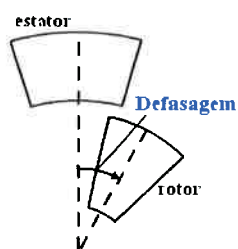


Figura 43 - Defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator.

Essa rotina foi feita de forma a possibilitar diversas dimensões para o micromotor, como diferentes raios, altura do dente, ângulo de largura do dente e do pólo, ângulo de defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator, diferentes valores de *gap* entre estator e rotor, qualquer valor de potencial elétrico no estator, qualquer nível de discretização na malha de finitos, etc. Essa rotina está apresentada no Anexo A. A partir dessa rotina foram simulados todos os casos para o protótipo do micromotor que são apresentados. Basicamente, essa rotina de MATLAB modela o espaço ao redor do dente do rotor e do pólo do estator (ar e suas propriedades de permissividade elétrica, como já discutido nos fundamentos teóricos), permitindo melhor discretização na região do *gap* do motor, mesmo que isso não seja tão necessário, uma vez que estamos usando o método P, já discutido anteriormente.

Além de impedir o aparecimento de erros do usuário no refinamento da malha de finitos, essa discretização ajuda a formar a malha de finitos, uma vez que o próprio elemento SOLID128 apresenta restrições no seu *mesh*, obrigando o usuário a discretizar melhor a malha de finitos. Em seguida, a rotina aplica os potenciais elétricos nas regiões que representam a borda do estator e aplica também zero nas regiões da borda do rotor, como mostra a Figura 44.

A seguir são mostrados e discutidos os resultados obtidos de quatro modelos de MEF que contemplam duas geometrias diferentes de micromotores e, para cada geometria, duas formas diferentes de acionamento elétrico que, como será visto logo adiante (nas seções 6.2 e 6.4), implicam na modificação do modelo de MEF.

6.1. Primeiro Modelo de MEF

Para esse primeiro modelo, deve-se destacar também que é necessário aplicar zero (aterrar) os nós extremos do modelo de MEF (ANSYS, 2004). Também é importante que o domínio do modelo de MEF (pré-definido como circular) seja bem maior que a estrutura do motor, para que não haja influência significativa desse potencial nulo das extremidades no campo elétrico que irá se formar. Por fim, a rotina também define o tipo de análise e soluciona o problema, deixando para o usuário somente a função de extrair os resultados no pós-processamento do ANSYS.



Figura 44 - Um modelo de MEF tridimensional com desalinhamento máximo.

A partir desse modelo de MEF foram feitas várias simulações para poder avaliar as forças eletrostáticas em diferentes modelos de micromotores eletrostáticos e, conseqüentemente, o torque do motor, como será apresentado adiante.

Nesse ponto, vale ressaltar que também foi analisada a questão da convergência do resultado das simulações de acordo com o aumento do refinamento da malha de MEF para esse e para os demais modelos apresentados. Dessa forma, mesmo com o uso do método P (descrito na seção 2.3), que substitui a necessidade de refinar a malha de finitos, todos os modelos usados nesse trabalho apresentam refinamento de malha suficiente para atingir a convergência dos resultados.

Nesse ponto vale destacar novamente que, como mostrado na Figura 44 anterior, somente é simulado um par de dente do rotor e pólo do estator. Obviamente, os perfis de distribuição de campo elétrico e potencial elétrico seriam diferentes caso fossem analisados pólos e dentes inativos adjacentes na simulação. Entretanto, as modificações pouco alterariam o valor das forças eletrostáticas no rotor, uma vez que os dentes adjacentes ao dente ativo estão a uma distância bem maior, o que diminui muito o valor das forças eletrostáticas. Quanto à influência de pólos inativos adjacentes, estes poderiam modificar um pouco o perfil de distribuição de voltagem e campo elétrico, no entanto, pouco influenciariam na força eletrostática no rotor.

Todas essas considerações são válidas para o caso em que se segue a configuração do motor 12:8 da literatura (como já discutido). Caso façamos algumas

modificações na configuração básica do micromotor, devemos simplesmente tomar mais cuidados com a interação eletrostática entre o par ativo de dente/rotor e os dentes e rotores inativos do projeto, como será melhor discutido mais adiante.

Em todas as simulações foi aplicada voltagem de 50V no estator e foram simuladas 7 defasagens diferentes (15.0° , 12.5° , 10.0° , 7.5° , 5.0° , 2.5° e 0.0°) para cada mudança nos parâmetros do motor. Dessa forma, pretende-se analisar a influência de algumas variáveis de projeto no torque final do motor (usando a formulação já apresentada no capítulo 2). Para isso, primeiro foram definidas as medidas de um modelo padrão de motor para essas análises. Vale destacar que esses parâmetros não necessariamente representam as medidas de um micromotor real, somente foram usados para simulação. A partir dessas medidas, obteve-se o modelo de elementos finitos mostrado na Figura 44.

Parâmetros	Valor
Raio do rotor	2,5mm
Altura do dente do rotor	0,7mm
Largura do dente do rotor	14°
Altura do pólo do estator	0,7mm
Largura do pólo do estator	14°
<i>Gap</i> entre rotor e estator	0,08mm
Espessura do rotor	0,01mm

Tabela 7 – Valores dos parâmetros do modelo padrão nas análises.

Seguindo com a simulação desse modelo, obtiveram-se vários resultados que serão mostrados logo abaixo. Com exceção do valor do torque final do modelo, os outros resultados não serão mostrados para os demais modelos, por não participarem das análises propostas nesse capítulo.

Na Figura 45 a seguir é mostrada a distribuição do potencial elétrico nodal no modelo no caso de desalinhamento máximo (ou seja, defasagem de 15° entre rotor e estator). Nessa figura e na próxima (que mostra a distribuição de campo elétrico nodal no modelo) observa-se a necessidade de se criar uma malha de finitos muito maior que a região de proximidade do rotor e do estator, pois dessa forma as extremidades da malha de finitos não interferem no resultado do campo elétrico e, conseqüentemente, no valor das forças resultantes.

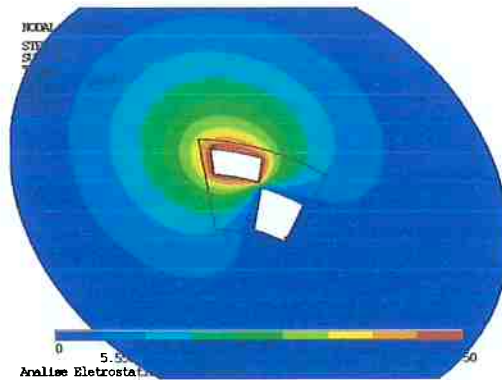


Figura 45 - Distribuição de potencial elétrico nodal no modelo de MEF.

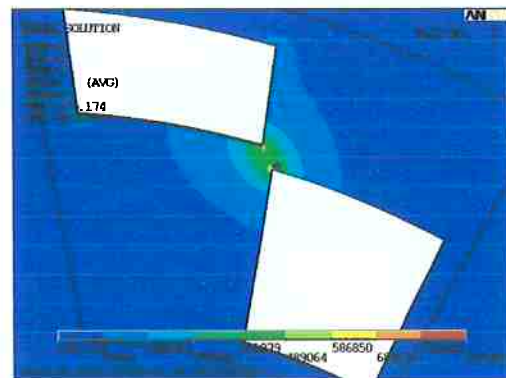


Figura 46 - Distribuição de campo elétrico nodal no modelo de MEF.

A seguir são apresentados os resultados de campo elétrico nodal e de força eletrostática na superfície do rotor na forma de vetores.

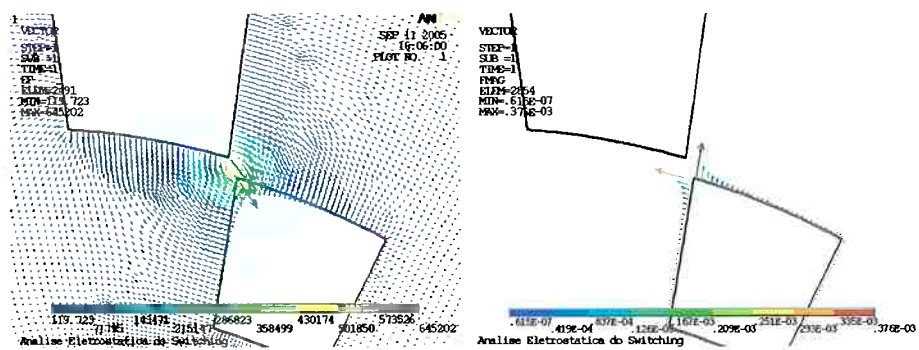


Figura 47 - Resposta vetorial do campo elétrico (à esquerda) e resposta vetorial da força eletrostática (à direita)

A partir daí, foram realizadas sucessivas simulações para cada valor de defasagem do rotor e do estator (como já descrito) para poder se analisar melhor o motor.

As figuras a seguir mostram o campo elétrico na resposta vetorial do ANSYS para cada um dos casos de desalinhamento. Essa análise é importante para compreendermos melhor o surgimento das forças eletrostáticas no conjunto dente do rotor e pólo do estator.

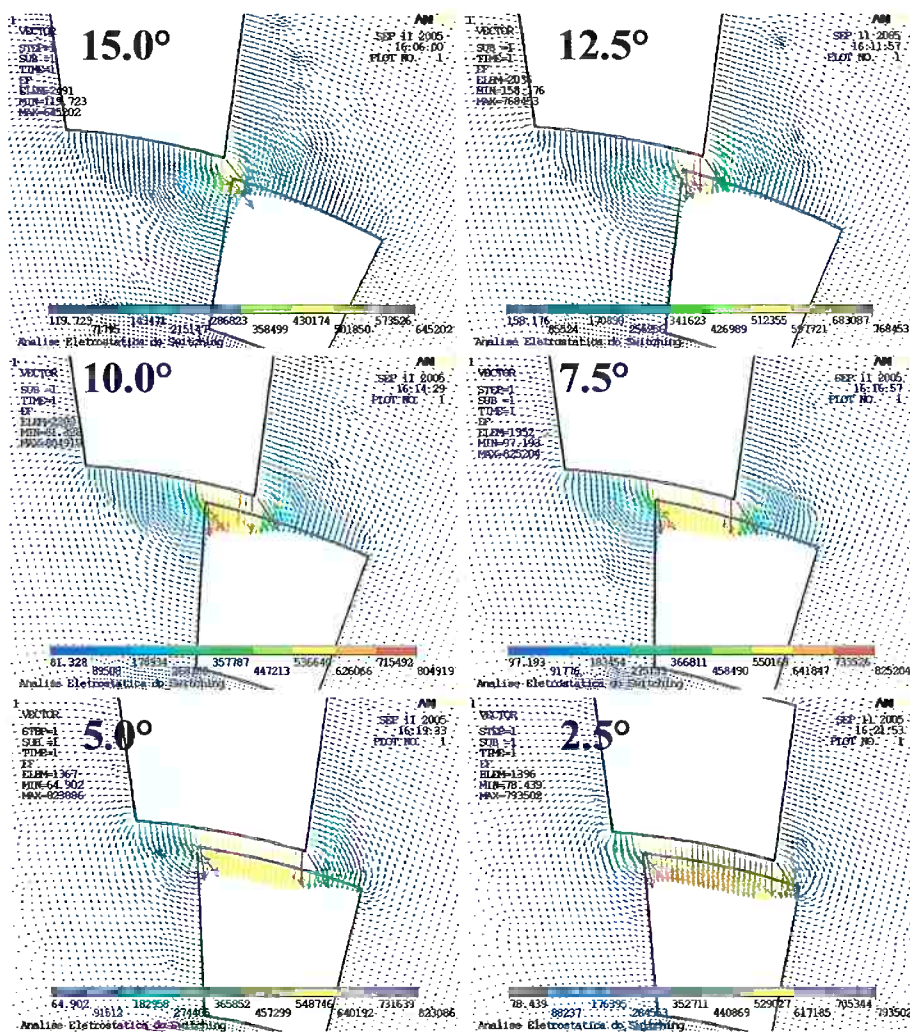


Figura 48 - Distribuição do campo elétrico vetorial em todos os casos de desalinhamento no modelo padrão antes de se completar o *switching*.

Antes de se prosseguir, vale destacar a importância do uso do método P nessas simulações. A Figura 49 abaixo mostra o nível P (graus de interpolação) dos elementos

da malha de finitos para o caso de 15° de defasagem (desalinhamento máximo). Como pode ser visto na figura, o próprio software identifica a necessidade do uso de elementos com nível P maior que os demais. A cor vermelha mostra elementos com nível P igual a 3 (diferente dos demais com nível 2).

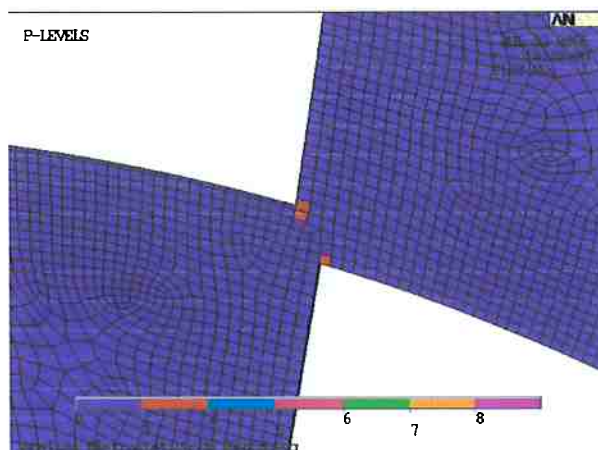


Figura 49 – Nível P dos elementos entre o par pólo/dente no desalinhamento máximo.

A Figura 50 mostra a distribuição do campo elétrico vetorial para o caso de alinhamento (defasagem nula), completando o *switching*, e a distribuição de forças eletrostáticas para o alinhamento final (onde, como se pode observar na figura, não há desequilíbrio de forças radiais no rotor).

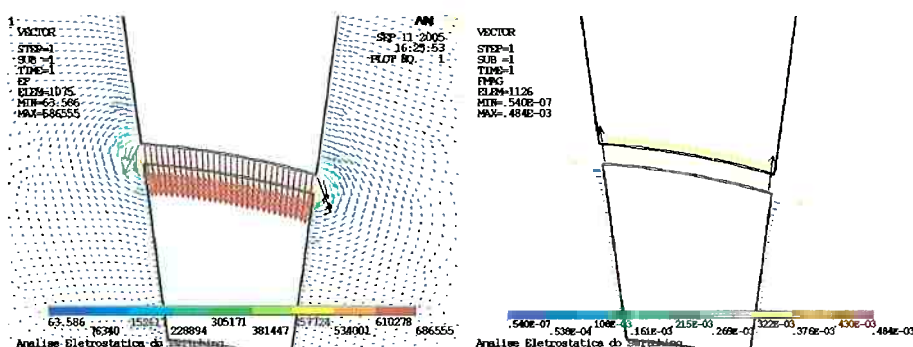


Figura 50 - Distribuição do campo elétrico no alinhamento (à esquerda) e distribuição das forças eletrostáticas (à direita).

A partir dos valores computados das resultantes de força eletrostática nessas simulações, pôde-se levantar um gráfico para o valor do torque do micromotor de acordo com o valor da defasagem.

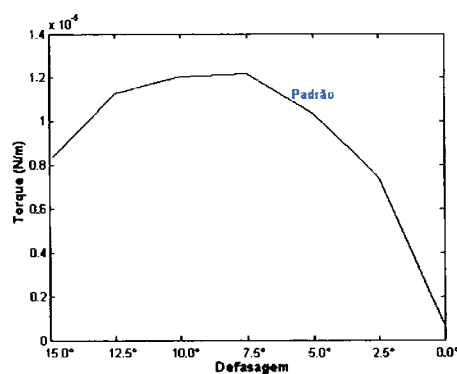


Figura 51 - Gráfico do torque do motor do modelo padrão.

Note que esse gráfico se repete a cada *switching* que representa 15° de giro para esse tipo de motor 12:8. Portanto, podemos concluir que esse perfil de torque se repete 24 vezes em cada rotação do micromotor. Assim, esse gráfico representa também um parâmetro de muita importância para análise e controle do micromotor eletrostático.

Observe também que o torque máximo ocorre quando a defasagem está entre 10° e 7.5°. Essa mesma região de máximo repetir-se-á em todos os modelos de micromotores que apresenta largura dos dentes do rotor igual à largura dos pólos do estator, como será visto mais adiante.

Prosseguindo com o proposto, vamos primeiro analisar variações no tamanho do raio do rotor. Para tanto, foram analisados, além do modelo padrão, mais dois modelos: um com o raio de 2mm (raio menor) e outro com o raio de 3mm (raio maior).

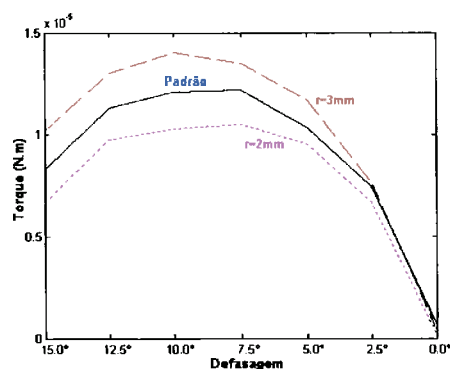


Figura 52 - Gráfico do torque para variação do raio do rotor.

Como foi mencionado na introdução, nos motores eletrostáticos a dimensão característica do motor não influencia na força eletrostática. No entanto essa afirmação se refere a modelos de motores proporcionais e esses modelos analisados não são proporcionais, pois são projetados dentro de restrições angulares. Tendo isso em vista, observe que aumentamos o raio, mas os ângulos analisados durante o *switching* se mantêm iguais para os dois modelos. Dessa forma, temos que para um raio menor, o comprimento de arco de circunferência na extremidade do dente do rotor é menor. Assim, tendo uma distância menor separando as cargas elétricas do rotor e do estator resulta em uma maior força eletrostática. Entretanto, visto que o torque, representado pela equação (25), é um produto não somente da força eletrostática, mas também do raio do rotor, deve-se notar na Figura 52 que a influência do raio no torque final é mais significativo que esse aumento das forças eletrostáticas. Dessa forma, o aumento do raio do rotor provoca o aumento do torque, o que justifica o gráfico da Figura 52. Portanto, para projetos de micromotores, maiores dimensões de raio do rotor ajudam a aumentar o torque.

Prosseguindo com a análise, foram simulados diferentes modelos de motores (com variação do raio do rotor) para conhecermos de que forma o aumento do raio influencia no aumento do torque máximo do motor, obtendo-se a Figura 53.

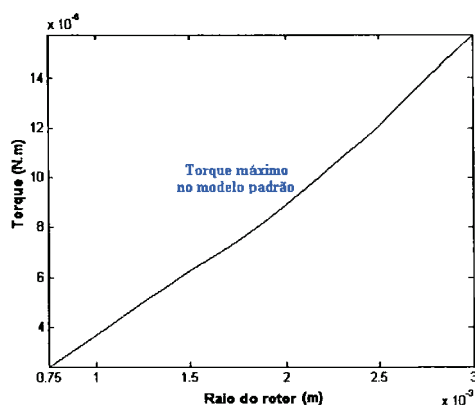


Figura 53 - Torque máximo em função da variação do raio do rotor.

Dessa forma, pode-se concluir que a relação entre variação do raio do rotor e variação do torque final é aproximadamente linear, como mostra a Figura 53.

Outra análise importante é a análise do tamanho do *gap* entre rotor e estator. Foram simulados mais dois modelos que diferem do modelo padrão no valor do *gap*: 0,06mm (menor) e 0,1mm (maior). Assim, foi obtido o gráfico da Figura 54.

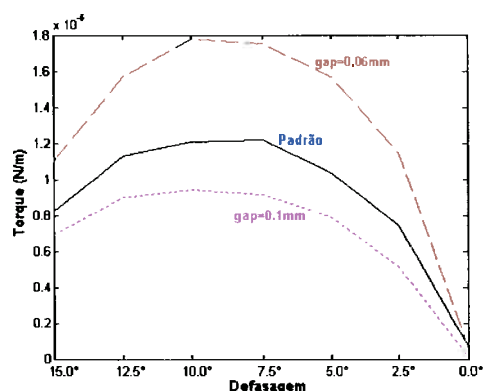


Figura 54 - Gráfico do torque para variação do *gap* do motor.

Analisando o gráfico da Figura 54, concluímos que quanto menor o *gap* maior o torque no micromotor. Como pode ser visto nesse gráfico e como poderá ser observado, após as demais análises, a variação do *gap* é a mudança mais significativa no micromotor quanto a variação do torque, o que significa que esse é o parâmetro mais importante para aumentar o torque do motor e, assim, deve-se buscar sempre minimizar o *gap* para aumentar o torque final. No entanto, a variação do *gap* esbarra

nas limitações da microfabricação em se garantir que não haja folga entre o rotor e seu eixo suficiente que permita que o rotor chegue a encostar nos pólos do estator durante o funcionamento.

Prosseguindo com a análise do *gap* entre rotor e estator, foram feitas mais simulações com diferentes valores de *gap* para se analisar o comportamento do torque máximo em função o *gap*. A Figura 55, que mostra o resultado dessa análise, indica que a variação do toque final máximo em função do *gap* é aproximadamente quadrática (resultado já discutido capítulo 4 e confirma resultados observados na literatura, como em TAVROW, 1991), tornando este um dos principais parâmetros que podem favorecer o aumento do torque final do micromotor eletrostático.

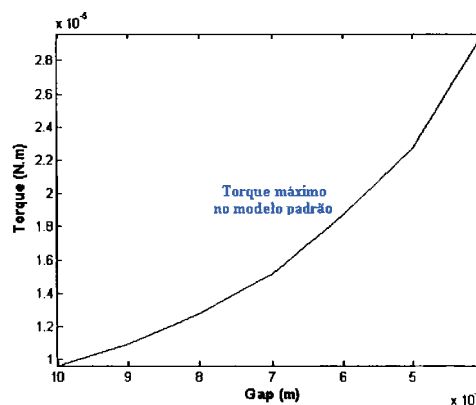


Figura 55 - Torque máximo em função da variação do *gap* entre rotor e estator.

Outra análise que deve ser feita é a variação da largura do dente do rotor e do pólo do estator. O principal problema que restringe essa variação é a possibilidade de interação eletrostática entre pólos do estator ou entre um dente ativo do rotor e um pólo inativo do estator, como mostra a Figura 56. Na Figura 56, os pólos e dentes com cor são ativos e os demais inativos. As setas azuis mostram as possíveis interações eletrostáticas indesejadas. Devido às distâncias relativas entre os pólos, pode-se concluir que a interação entre o dente ativo e o pólo inativo mais próximo é a interação mais perigosa para se diminuir o valor da força eletrostática.

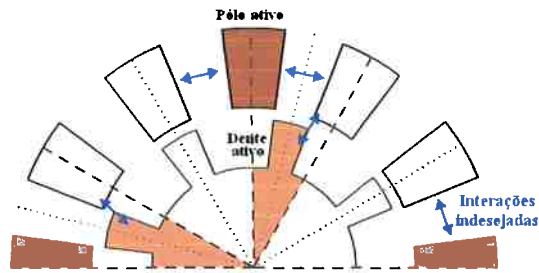


Figura 56 - Interações eletrostáticas entre pólos e dentes ativos e inativos.

Para impedir essa interação simplesmente restringe-se o valor da largura a 15° (para o caso do motor 12:8, em que, como já foi comentado, 15° é a rotação do rotor a cada *switching*), assim, quando temos desalinhamento máximo, não existe sobreposição angular (como pode ser visto na Figura 57) entre pólos e dentes.

Para compreender melhor isso, observe que em um motor de 12 pólos (12:8), temos 30° que os separam e, no desalinhamento máximo, o dente do rotor se posiciona no meio de dois pólos do estator, a 15° de cada pólo. Se tivermos mesma largura de dentes e pólos, para impedir a sobreposição no desalinhamento máximo (15°), deve-se impor uma largura menor que 15° para cada (como foi mostrado na Figura 56), caso contrário, teremos sobreposição (como é mostrado na Figura 57), diminuindo as distâncias relativas entre pólos e dentes e aumentando, portanto, as interações eletrostáticas indesejadas.

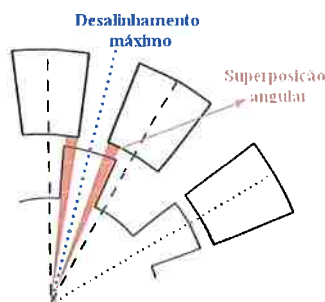


Figura 57 - Superposição angular no desalinhamento máximo.

Entretanto, essa interação eletrostática é muito pequena, principalmente para valores de largura de pólos e dentes não muito superiores a 15° . Por isso, é muito comum ver na literatura (como foi mostrado na introdução) valores de largura de

dente/pólo maiores de 15° para motores 12:8, como, por exemplo, 18° , como é definido em LEFÈVRE (1995).

Dessa forma, nessa análise, foram simulados mais dois modelos que diferem do modelo padrão somente no valor da largura do conjunto dente/pólo (mantendo a mesma largura para o dente e para o pólo): 12° (menor) e 16° (maior), que é pouco superior a 15° , como já discutido, portanto, viável.

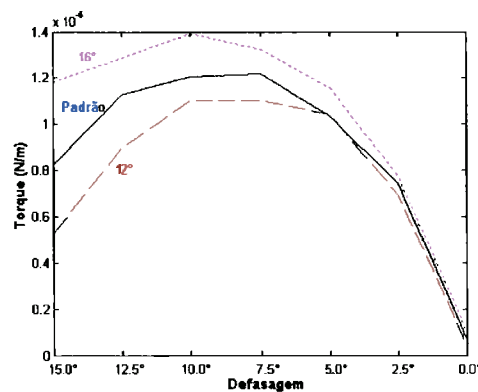


Figura 58 - Gráfico do torque para variação da largura do conjunto dente/pólo.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 58, valores maiores de largura do conjunto dente/pólo apresentam maior valor de torque. Isso se deve ao fato de que a intersecção angular (mostrado na Figura 58 – disposição de defasagem máxima) entre o dente ativo do rotor e o pólo ativo do estator representa maior proximidade das cargas elétricas de cada componente em cada valor de defasagem. Embora essa superposição aumente as interações eletrostáticas indesejadas, aumentam também a força eletrostática e o torque do rotor. Uma vez que podemos considerar (dentro de pequenas variações, como foi discutido) essas interações de pouca influência no problema, podemos concluir que o aumento da largura desses componentes do motor ajuda a aumentar o torque final.

Prosseguindo com a análise, foram feitas outras simulações variando a largura do conjunto dente/pólo, levantando a curva mostrada na Figura 59. Como pode ser observado na figura, a relação entre o torque final máximo e a largura dos dentes e pólos do motor é aproximadamente linear.

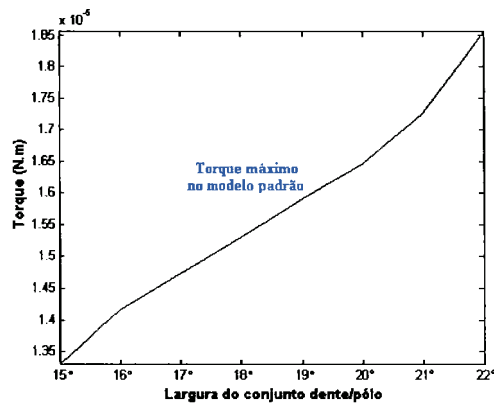


Figura 59 - Torque máximo em função da largura do conjunto dente/pólo.

Essa análise levanta a questão de se ter larguras diferentes nos dentes do rotor e nos pólos do estator. Isso é importante, pois a interação eletrostática entre os pólos do estator (principalmente em uma situação dinâmica durante a operação do motor) é muito prejudicial ao seu funcionamento, quando se está trabalhando com larguras de pólos bem maiores que 15°.

Outro fator que viabiliza essa situação é o fato de termos mais pólos do que dentes, o que significa que uma largura maior nos dentes do rotor é preferível.

Dessa forma, foi analisado esse fator também, simulando mais um modelo que se diferencia do modelo padrão somente na largura do dente (18°), como mostra a Figura 60 abaixo.

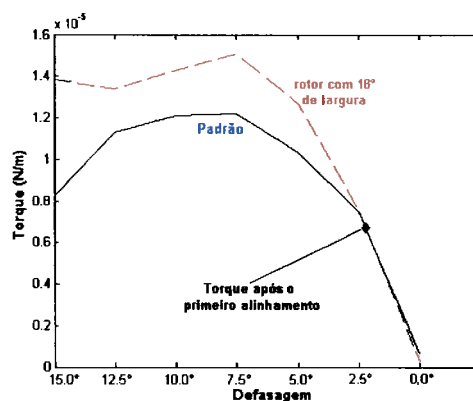


Figura 60 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor.

Como já mencionado, a superposição angular do estator com o rotor ajuda a aumentar o torque, como demonstra o gráfico da Figura 60. Portanto aumentar a largura do dente ajuda a aumentar o torque do motor.

No entanto, deve-se observar que na curva de torque existe uma queda brusca para valores de defasagem menores que $2,5^\circ$. Assim, deve-se levantar a questão de que após o primeiro alinhamento de faces no motor (como mostra a Figura 61), a defasagem é muito pequena e as forças eletrostáticas caem muito. Isso se torna um problema para o funcionamento do motor, pois caso as forças de atrito no rotor (que são muito importantes na prática) sejam maiores que as forças eletrostáticas após esse primeiro alinhamento, corre-se o risco do dente não se mover para o alinhamento total, o que significa que no próximo *switching* o motor não estará alinhado e todos os dentes começarão com um ângulo de “defasagem máxima” maior (como mostra a Figura 62), o que é um sério problema para o funcionamento e para o controle do micromotor, porque, nesse caso, a maior defasagem significa maior distância entre cargas elétricas e, conseqüentemente, menor torque inicial no *switching*. Em uma situação prática, esse novo torque inicial pode ser menor que o atrito do rotor, o que impossibilitaria o funcionamento do motor, ou seja, seria observado um movimento inicial do motor no primeiro *switching* e depois seu travamento, obrigando correções na geometria do projeto ou aumento da voltagem elétrica aplicada.

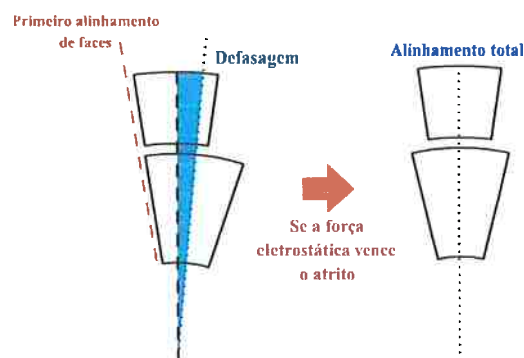


Figura 61 - Primeiro alinhamento de faces do micromotor com largura de dentes e de pólos diferentes.

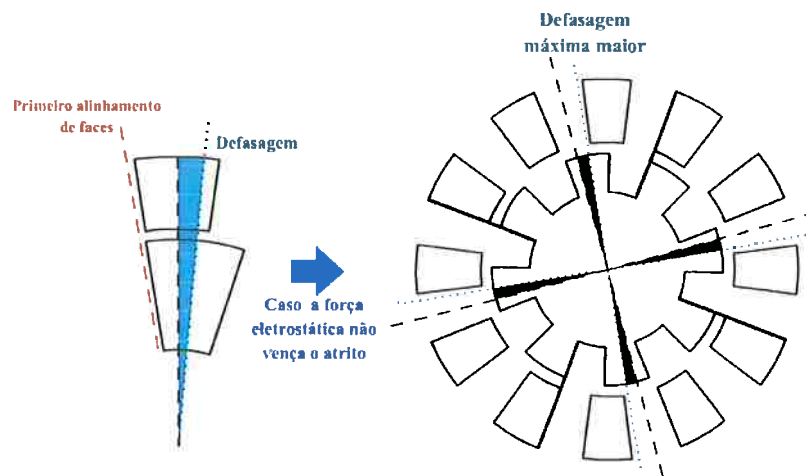


Figura 62 - Caso de defasagem máxima maior devido a problemas após o primeiro alinhamento.

Nesse modelo analisado, temos que o desalinhamento adicional pode ser de 2° . Dessa forma, para garantirmos que ainda durante esse *switching* o dente se alinhe completamente com o pólo, o torque (cujo valor é representado pelo ponto destacado no gráfico do torque anterior) deve ser o suficiente para vencer as forças que impedem o funcionamento do motor, como as forças de atrito. Para se obter esse ponto extra, foi realizada outra simulação com o modelo na defasagem de 2° .

Vale destacar que o caso analisado da largura do dente maior que a largura do pólo, teremos forças de atrito maiores, o que significa que há uma maior necessidade de termos torque significativamente maior que no caso padrão, para haver maior certeza do alinhamento total dos dentes do rotor.

Também é importante analisar a influência da espessura do motor no torque final. Para isso foram feitas simulações variando o valor de espessura do motor, como mostra a Figura 63.

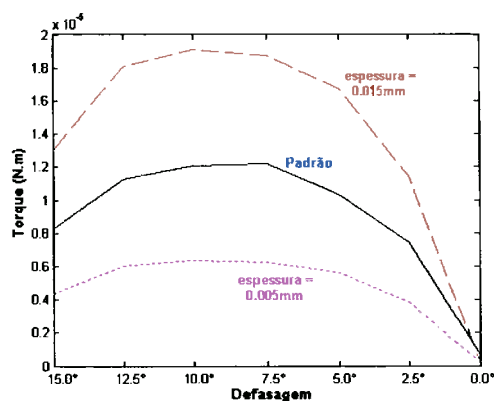


Figura 63 - Gráfico do torque para variação da espessura do motor.

Como pode ser observado na Figura 63, o aumento do valor da espessura implica no aumento do torque do motor. Isso se dá ao fato de que, como foi mostrado na Figura 47, as forças eletrostáticas ocorrem significativamente nas superfícies laterais do perfil do rotor. Essas superfícies são diretamente influenciadas pelo tamanho da espessura. Assim, com o aumento da área dessas superfícies laterais, o dente do rotor sofre maior influência do campo elétrico formado e, dessa forma, a força eletrostática também aumenta (aumentando, conseqüentemente, o torque final do motor).

Continuando com essa análise, foram realizadas mais simulações para se verificar como a variação de espessura influencia no aumento do torque. Para isso foram simulados modelos com diferentes espessuras, na região de torque máximo, já discutida, obtendo-se a Figura 64 abaixo.

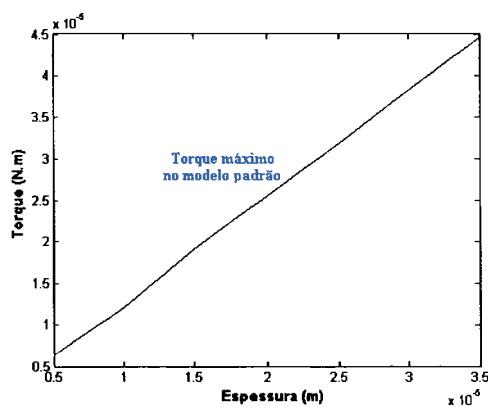


Figura 64 - Torque máximo do micromotor em função da espessura.

Analisando a Figura 64, pode-se concluir que o aumento do torque final do motor é diretamente proporcional de forma linear em função da espessura.

Outra análise que pode ser feita é a variação da voltagem aplicada nos pólos do estator. A Figura 65 a seguir mostra a curva de torque para o modelo padrão quando aplicado 10V, 50V e 100V.

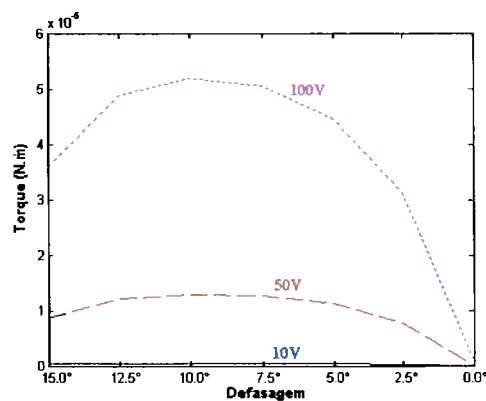


Figura 65 - Curva de torque do modelo padrão para 10V, 50V e 100V aplicados.

As curvas da Figura 65 demonstram que a influência da voltagem é muito grande e necessita ser analisada melhor. Dessa forma, foi simulada a situação de torque máximo do micromotor para diferentes voltagens aplicadas, de 10V até 120V, que é mostrado na Figura 66.

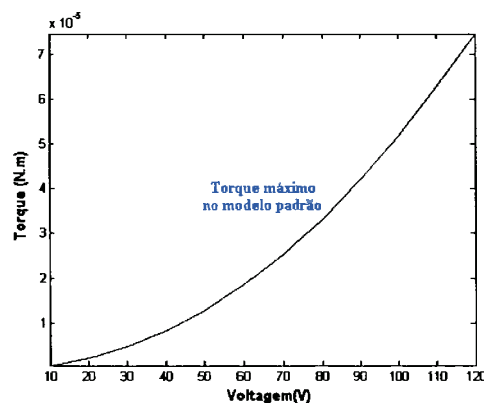


Figura 66 - Torque máximo do micromotor em função da voltagem aplicada.

Essa curva de torque máximo em relação à voltagem mostra que o torque do micromotor é proporcional a, aproximadamente, o quadrado da voltagem aplicada, como já foi mencionado no capítulo 4 sobre a microfabricação do micromotor.

Portanto, podemos concluir que a variação da voltagem é um fator de grande importância que deve ser levado em consideração na experimentação prática do micromotor, buscando, acima de tudo, seu funcionamento, ou seja, aparecimento de torque inicial que movimenta o rotor e o tire da inércia.

É importante ressaltar que também foram feitas várias simulações com a finalidade de se analisar a influência das alturas dos dentes do rotor e dos pólos do estator, no entanto, como foi comprovado que a variação de seus valores não implicam em significativa mudança no torque final do micromotor, não há a necessidade de representar esses resultados de forma gráfica, como foi feito para as demais análises dos parâmetros de projeto do micromotor.

Para finalizar a análise do modelo de MEF do micromotor, deve-se analisar agora o atrito no modelo padrão já discutido.

Antes de analisar o atrito, vamos observar o comportamento das forças tangencial e normal em um par dente/pólo ativo nas condições padrões definidas anteriormente, como mostra a Figura 67 a seguir.

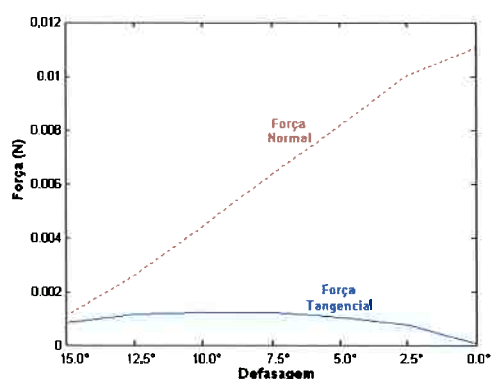


Figura 67 - Forças tangencial e normal em um dente ativo usando o modelo padrão.

A partir da Figura 67, pode-se concluir que a força normal é muito maior que a força tangencial no dente, principalmente no alinhamento total (em 0° de defasagem).

Assim, podemos concluir que acontece o caso de atrito máximo a cada vez que há alinhamento, ou seja, na direção axial de cada estator. Com isso, também se pode prever que são nessas direções que acontecerá maior desgaste no eixo do rotor.

No entanto, esse gráfico não é o suficiente para analisar o atrito no eixo do rotor. Para isso devemos recorrer à formulação proposta nos fundamentos teóricos, com a eq.(28), para encontrarmos o comportamento do coeficiente de atrito torsional máximo permitido para o micromotor. Assim, devemos considerar o torque final calculado anteriormente seja igual ao contra-torque causado pelo atrito. Dessa forma, obtemos o seguinte gráfico:

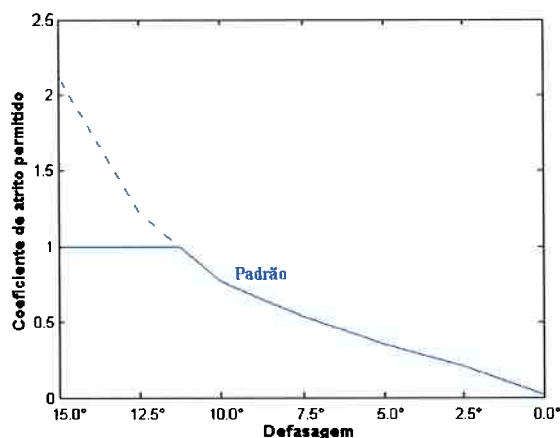


Figura 68 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido.

Através da Figura 68 podemos observar que é permitido um coeficiente de atrito maior (um coeficiente de atrito que gera um contra-torque que não impede o funcionamento do micromotor) na região de desalinhamento máximo. Vale ressaltar que o coeficiente de atrito é limitado pelo valor unitário no gráfico (sendo que a curva tracejada é o valor obtido matematicamente e a curva contínua é a curva real do coeficiente de atrito permitido), o que significa que nessa região a força de atrito é menor que a força que induz o torque do motor, pois o valor do coeficiente de atrito permitido teve que ser limitado, atendendo ao seu significado físico, supondo o atrito entre dois materiais metálicos. No gráfico também pode ser observado que próximo da região de defasagem 0°, o valor desse coeficiente permitido fica muito baixo. Na prática ele não chega a se aproximar tanto de zero, pois se inicia um novo *switching* (de

outro dente que é atraído por um novo pólo ativo) que diminui a queda da curva da Figura 68.

Portanto, a partir desse gráfico podemos intensificar a conclusão que o maior desgaste do eixo é na região de alinhamento total (defasagem de 0°) e o menor desgaste se dá nas regiões de desalinhamento máximo que são exatamente as regiões entre os pólos do estator, uma vez que é permitido um coeficiente de atrito máximo (igual a 1) na região de desalinhamento, para o caso do atrito entre o rotor e o eixo, considerando ambos materiais metálicos. Essa mesma conclusão também é apresentada na literatura (TAVROW, 1991).

Assim, tendo em vista que na fabricação de protótipos de micro-estruturas existem muitas micro-irregularidades quando se analisam dimensões próximas à resolução de fabricação, caso seja possível manipular essas irregularidades ou a rugosidade em certas regiões do eixo do micromotor, deve-se tentar alinhar as regiões de maiores irregularidades do eixo com as regiões entre os pólos do estator. Essa tentativa buscaria impedir que essas regiões de maior irregularidade ficassem nas regiões de alinhamento máximo, como é mostrado no gráfico anterior, e, dessa forma, evitar que o atrito com o eixo prejudique, ou mesmo impeça, o funcionamento do micromotor.

Outra conclusão importante que pode ser feita através da análise do gráfico, é o fato de a força de atrito máxima (supondo que esta força é limitada pelo maior coeficiente de atrito permitido, 1) não ser maior que a força de torque, como já foi comentado, na região de desalinhamento entre 15° e 10° , aproximadamente. Assim, pode-se concluir que nessa região, no funcionamento do motor previsto anteriormente, o torque gerado será o suficiente para vencer o atrito no eixo do micromotor. Tendo em vista que o atrito estático é maior que o atrito dinâmico em qualquer material, podemos supor que a partida inicial do micromotor deva ser o momento de funcionamento mais crítico. Portanto, através da análise do atrito com o eixo da Figura 68, pode-se concluir que a região aproximada entre 15° e 10° de desalinhamento é a região ideal para se iniciar o funcionamento do micromotor, pois é uma região que apresenta torque mais elevado em relação ao contra-torque gerado pelo atrito com o eixo.

Por fim, para melhor interpretar os gráficos obtidos nessa seção, faz-se uso da formulação abaixo para representar curvas de primeiro e de segundo graus, respectivamente:

$$y(x) = c1x + c2 \quad (80)$$

$$y(x) = p1x^2 + p2x + p3 \quad (81)$$

A tabela a seguir mostra os resultados, após se analisar todas as curvas obtidas pelas simulações.

Análise	Aumento do Torque	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Aumentar	Linear	$c1 = 5.8e-3; c2 = -2.3e-6$
Gap entre Rotor e Estator	Diminuir	Quadrática	$p1 = 4.9e+3; p2 = -1.0; p3 = 6.1e-5$
Largura do Conjunto dente/pólo	Aumentar	Linear	$c1 = 6.9e-7; c2 = 2.9e-6$
Altura dos pólos	(torque constante)	-	-
Altura dos dentes	(torque constante)	-	-
Espessura	Aumentar	Linear	$c1 = 1.3; c2 = -2.9e-7$
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 5.2e-9; p2 = -1.5e-9; p3 = 4.7e-9$

Tabela 8 - Resumo dos resultados das simulações.

A Tabela 8 mostra que para se obter um torque maior no micromotor eletrostático simulado deve-se aumentar o raio do rotor, diminuir o *gap*, aumentar a largura do conjunto dente/pólo, aumentar a espessura e aplicar maior voltagem em seus pólos. Muitas dessas variações podem ser limitadas pelo aumento do atrito na superfície da base do motor (como no caso de aumentar o raio do rotor), ou por limites de fabricação (como no caso de se diminuir o *gap*), ou pelas condições experimentais de acionamento do motor (como o aumento da voltagem aplicada nos pólos).

Pode-se observar também que variações no *gap* e na voltagem aplicada são funções quadráticas em relação ao aumento do torque final, o que significa que podem gerar maior aumento no torque com pequenas variações.

Observa-se também que variações na altura dos dentes e dos pólos são praticamente insignificantes para o aumento do torque final, portanto seus valores

podem ser estipulados de acordo com sua facilidade de fabricação ou mesmo de manipulação.

As demais análises apresentam uma relação linear com o aumento do torque, como pode ser observado na tabela. Analisando os coeficientes das retas obtidas em cada análise, pode-se observar (analisando o valor do coeficiente $c1$) que a alteração que se deve priorizar é o aumento da espessura do motor, em seguida o aumento do raio e , por fim, o aumento da largura do conjunto dente/pólo.

A partir de todas essas análises é possível projetar melhor um micromotor eletrostático tendo em vista todas as conclusões obtidas e suas restrições.

6.2. Segundo Modelo de MEF

Algumas das condições sugeridas no primeiro modelo de elementos finitos apresentado podem não ser possíveis de implementar na prática de fabricação e em testes experimentais dos micromotores, como, por exemplo, a aplicação de voltagem elétrica no rotor. Portanto outro modelo de elementos finitos foi considerado para o mesmo projeto de micromotor (usando os mesmos valores dos parâmetros de projeto usados no modelo anterior e apresentados na Tabela 7). Nesse novo modelo, mostrado na Figura 69 a seguir, a aplicação de potenciais elétricos se dá somente nos pólos do estator, enquanto que o rotor fica com seu potencial elétrico flutuante. Dessa forma, aplica-se uma determinada voltagem elétrica em um pólo (pólo 1) e aterra-se o pólo adjacente (pólo 2), para se criar um campo elétrico que produzirá a força eletrostática no dente de rotor.

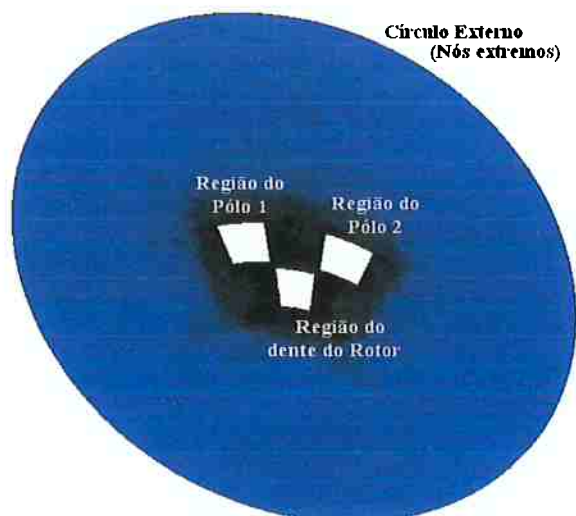


Figura 69 - Segundo modelo de elementos finitos (com aplicação de voltagem somente nos pólos).

Simulando este novo modelo de MEF para o micromotor, pôde-se observar a distribuição de potenciais elétricos e de campo elétrico na malha, como é mostrado na Figura 70 e Figura 71.

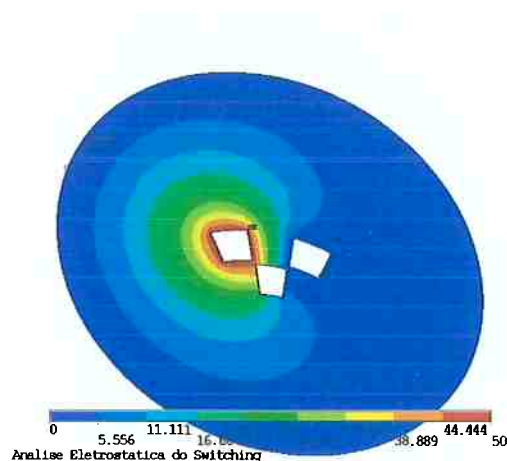


Figura 70 - Distribuição de potencial elétrico nodal no novo modelo de MEF

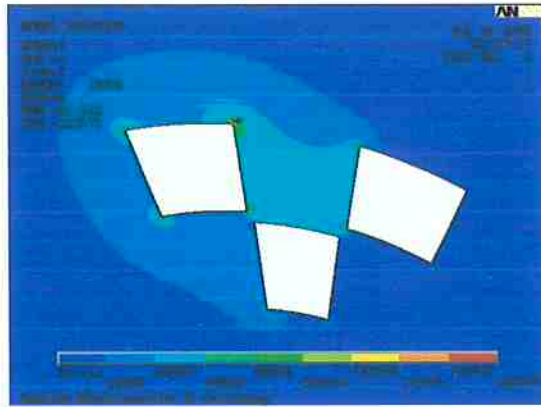


Figura 71 - Distribuição de campo elétrico nodal no novo modelo de MEF

Usando a mesma metodologia usada para o modelo de finitos anterior, é possível levantar a curva padrão de torque desse modelo e compará-la com a curva padrão do modelo anterior, como é feito na Figura 72 abaixo.

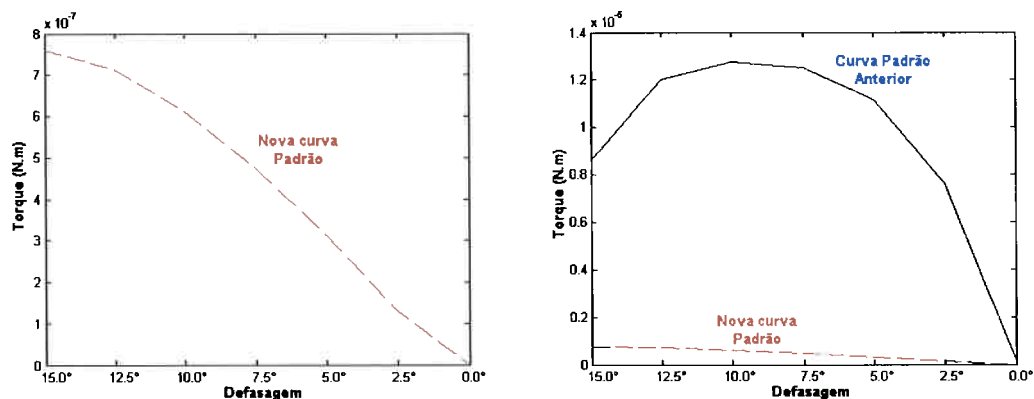


Figura 72 - Curva padrão para o novo modelo de MEF do micromotor.

Pode-se observar na Figura 72 que o torque máximo desenvolvido pelo modelo de finitos com rotor de potencial elétrico flutuante ocorre com defasagem máxima (15°) e a partir desse valor o torque desenvolvido somente diminui até o alinhamento total, o que é diferente do modelo anterior que apresentava um ponto de máximo durante o *switching*. Isso se explica pelo fato de que, nesse modelo de MEF com elementos para análise eletrostática, a força no rotor de potencial elétrico flutuante é gerada pelo campo elétrico entre os pólos 1 e 2 (apresentados na Figura 69). Assim,

uma vez que o dente do rotor começa a se alinhar, este deixa de estar imerso no campo elétrico entre os pólos 1 e 2 (que é mostrado na Figura 71) e, portanto, apresenta um decréscimo na força eletrostática e, conseqüentemente, no torque final.

No entanto, pode-se observar também que os valores de torque para o novo modelo são bem menores que para o modelo anterior, como já era esperado, uma vez que somente é aproveitada uma parte do campo elétrico gerado com o rotor de voltagem flutuante, diferente do que acontece quando o rotor tem potencial elétrico e é responsável pelo campo elétrico gerado (o que é o caso do primeiro modelo de MEF simulado).

Tendo em vista que o princípio de funcionamento do micromotor sofreu uma pequena modificação, como acaba de ser discutido, em relação ao modelo simulado anteriormente, faz-se necessário analisar novamente a influência dos parâmetros de projeto no torque final para se verificar se ocorreram mudanças com relação ao modelo anterior.

Primeiramente, estudando a influência do raio do rotor no torque desenvolvido, obteve-se a curva abaixo para a situação de torque máximo. Como se pode observar, a variação do torque máximo com relação à variação do raio do rotor é aproximadamente linear como no modelo anterior. Isso também se dá devido à forte influência do raio no cálculo do torque final, como foi constatado anteriormente.

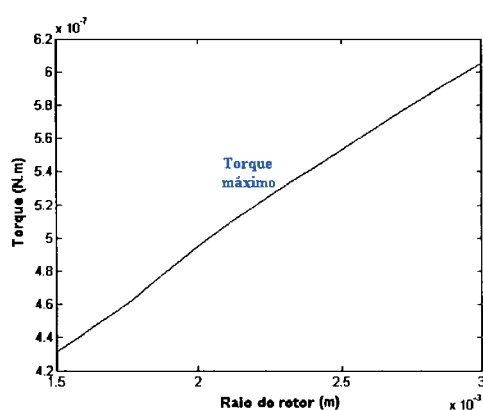


Figura 73 - Torque máximo em função do raio do rotor no segundo modelo.

Analisando a influência do *gap* nesse segundo modelo de MEF, obteve-se a Figura 74. Pode-se observar que, como no modelo anterior, há o aumento do torque final com a diminuição do valor do *gap*. Entretanto, para o modelo anterior essa relação entre *gap* e torque final é quadrática, enquanto que para esse segundo modelo, a relação é aproximadamente linear. Essa diferença explica-se pelo fato de que no modelo anterior o *gap* representava a distância entre os potenciais elétricos e sua variação causava diretamente a mudança do campo elétrico. Nesse segundo modelo, o campo elétrico é definido pela distância entre os pólos do estator, assim, o *gap* é responsável somente pela proximidade e inserção do dente do rotor no campo elétrico gerado pelos pólos e, como pode ser visto na Figura 73, essa relação é linear.

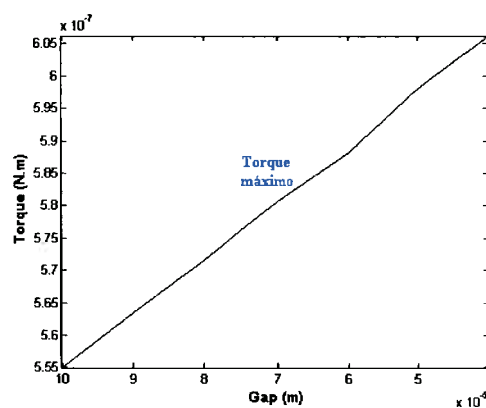


Figura 74 - Torque máximo em função do *gap* entre rotor e estator.

Analisando a influência da largura do conjunto dente/pólo no torque final, obteve-se a curva abaixo. Nessa curva, observa-se a diferença mais significativa entre esse modelo e o modelo anterior. No modelo anterior a relação entre esse valor de largura e o torque final foi constatada ser linear, enquanto que nesse modelo observa-se uma região de máximo entre, aproximadamente, 18° e 22° .

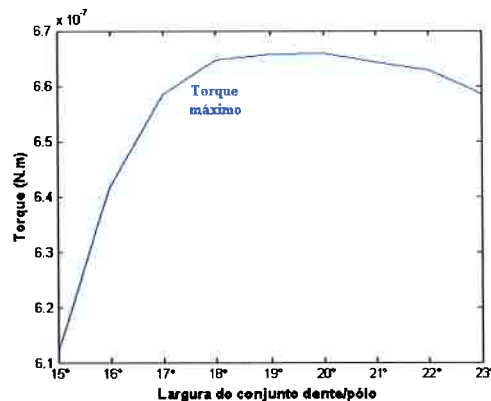


Figura 75 - Torque final em relação à largura do conjunto dente/pólo.

Para se compreender melhor a curva da Figura 75, observe a Figura 76 a seguir. Nela é definida a região angular de geração do campo elétrico entre os dois pólos do estator. Observando a figura, nota-se que ao se aumentar a largura dos pólos, menor é a distância entre eles e, portanto, menor a região angular do campo elétrico. Como já constatado no modelo anterior (para a curva do *gap*), quanto menor é a distância das peças que geram o campo elétrico, maior é seu valor e, portanto, maior é a força gerada. Assim, quanto menor for essa região angular entre os pólos, maior será o campo elétrico entre eles. Essa relação aumenta o valor da força eletrostática e, conseqüentemente, do torque final. Entretanto, quanto menor for essa região angular, menor será a região do campo elétrico em contato com o dente do rotor, restringindo, portanto, a região em que se concentram as forças elétricas no rotor. Portanto, isso causa uma diminuição no valor do torque desenvolvido no rotor, justificando a queda do torque final a partir de, aproximadamente, 22° de largura do conjunto dente/pólo.

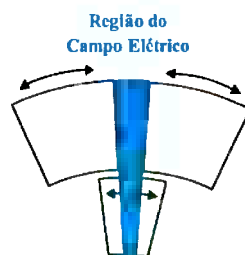


Figura 76 - Região angular do campo elétrico gerado no segundo modelo de MEF.

Analisando a influência da espessura do modelo no torque desenvolvido, obteve-se a Figura 77. Como se pode observar, o aumento da espessura causa o aumento do torque final de uma forma linear, como foi constatado no modelo de MEF anterior.

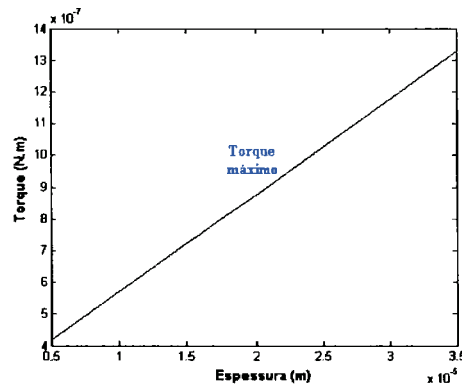


Figura 77 - Torque máximo em função da espessura do modelo.

Analisando a influência da altura dos dentes do rotor e dos pólos do estator, pôde-se notar uma grande diferença em relação ao modelo anterior. No modelo anterior, a variação de ambas as alturas dos dentes e dos pólos mostrou ser insignificante para o aumento ou diminuição do valor do torque final do motor. Nesse novo modelo, no entanto, apenas a variação da altura do dente do rotor mostrou-se ser irrelevante, enquanto que a variação da altura do pólo influenciou em uma mudança no valor do torque desenvolvido. Como mostra a Figura 78, a diminuição da altura do pólo do estator ocasiona o aumento do torque final de forma aproximadamente quadrática. Analisando essa relação quadrática, como já observado em outros gráficos e como já discutido, pode-se concluir que a altura dos pólos influencia diretamente no campo elétrico gerado, o que justifica a curva obtida.

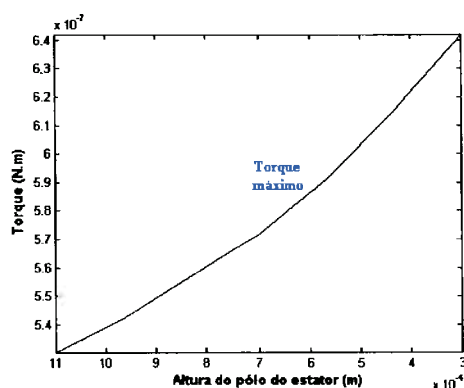


Figura 78 - Torque máximo em função da altura do pólo do estator.

Analisando a influência do valor da voltagem aplicada no pólo ativo no torque final, obteve-se a Figura 79, que mostra que essa relação é quadrática como no modelo anterior.

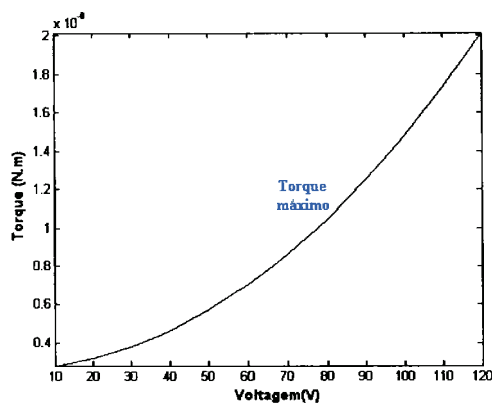


Figura 79 - Torque final em função da voltagem aplicada.

Por fim, deve-se analisar o atrito no eixo do rotor, analogamente ao que foi feito para o modelo anterior. Antes de analisar o atrito, vamos observar o comportamento das forças tangencial e normal no dente do rotor, como mostra a Figura 80 a seguir.

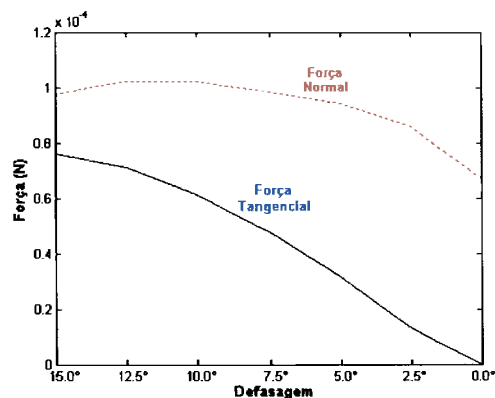


Figura 80 - Curvas das resultantes das forças normal e tangencial no dente do rotor.

Diferentemente do modelo anterior, observa-se que a força normal apresenta uma queda quando o dente se aproxima do alinhamento. Isso acontece por causa do afastamento do dente da região angular do campo elétrico, como já discutido. Observa-se também que há uma diferença menor entre a força normal e a força tangencial do que acontece no modelo anterior (que pode ser visto na Figura 67). Para analisar melhor o impacto dessa diferença em relação ao modelo anterior, antes de prosseguirmos com a análise do atrito, é importante comparar separadamente as curvas de força normal e força tangencial desse segundo modelo com o modelo anterior, como é feito na Figura 81.

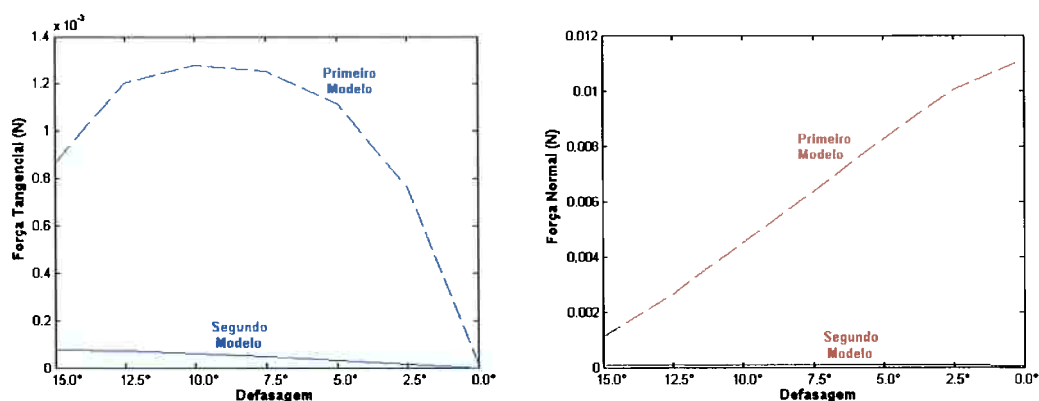


Figura 81 - Comparação das resultantes de forças nos dois modelos: força tangencial, à esquerda, e força normal, à direita.

Como se pode observar na Figura 81 acima, a queda do valor da força tangencial no segundo modelo é menor que da força normal, o que pode representar que, nesse segundo modelo, a influência da força normal é relativamente menor para o funcionamento do motor. Para confirmar isso, levantou-se a curva do coeficiente de atrito permitido, analogamente ao que foi feito para o modelo de MEF anterior.

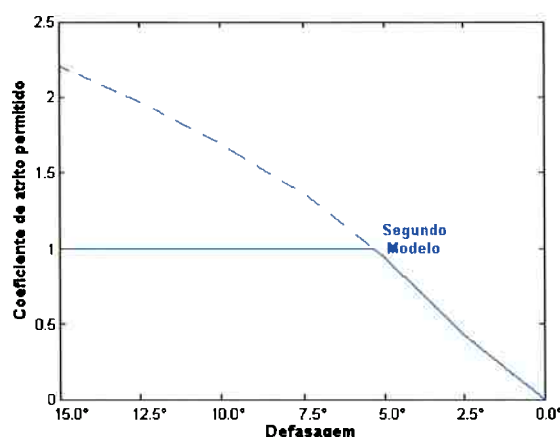


Figura 82 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido para o segundo modelo.

Analogamente ao que foi visto no primeiro modelo de MEF (ver Figura 68), o coeficiente de atrito permitido cai para zero no alinhamento do rotor. Da mesma forma que foi discutido anteriormente, isso não é muito significativo, uma vez que o alinhamento total do rotor também é o início de um novo *switching*. Como também foi visto no modelo anterior, o valor matemático do coeficiente máximo permitido ultrapassa o valor unitário, perdendo seu significado físico para uma interface metálica (que é o caso analisado). Por esse motivo uma parte da curva é representada em pontilhado.

Comparando com o modelo anterior, pode-se notar que nesse segundo modelo a região em que o valor do coeficiente permitido é unitário é bem maior, indo de 15° a aproximadamente 5° de defasagem. Isso significa que a influência das forças normais é menor (em comparação com o modelo anterior), representando que esse modelo é

menos propenso a ter problemas de funcionamento por causa do atrito no eixo do rotor em comparação com o modelo anterior.

Uma vez concluídas as análises dos parâmetros de projeto para esse modelo, de forma análoga ao que foi realizado no modelo anterior, é necessário montar uma tabela para comparar os resultados mostrados nos gráficos anteriores. Vale lembrar que são consideradas as eq. (80) e (81) para se obter os coeficientes mostrados na tabela abaixo.

Análise	Aumento do Torque	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Aumentar	Linear	$c1 = 1.2e-4; c2 = 2.6e-7$
Gap entre Rotor e Estator	Diminuir	Linear	$c1 = 8.5e-4; c2 = 6.4e-7$
Largura do Conjunto dente/pólo	Aumentar	c/ Máximo	Máx (18°, 22°)
Altura dos pólos	Diminuir	Quadrática	$p1 = 8.8e-2; p2 = -2.6 e-4; p3 = 7.1 e-7$
Altura dos dentes	(torque constante)	-	-
Espessura	Aumentar	Linear	$c1 = 3.0e-2; c2 = 6.7e-7$
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 1.2e-10; p2 = 6.2 e-13; p3 = 2.7e-7$

Tabela 9 - Resumo dos resultados das simulações para o segundo modelo.

Comparando essa tabela com a Tabela 8, nota-se que todas as relações (com exceção da análise da largura do conjunto dente/pólo) apresentam um decréscimo no valor de seus coeficiente ($c1$ ou $p1$). Isso significa que uma variação nos valores dos parâmetros de projeto influencia mais no aumento do torque final no primeiro modelo que no segundo. Como já discutido, mudanças na voltagem aplicada nos pólos tem uma relação quadrática para o valor do torque final, enquanto que as demais análises tem uma relação linear, com exceção da análise de largura do conjunto dente/pólo que apresenta uma região de máximo torque final. Entre as análises com relação linear, a que apresenta mudança mais significativa no torque desenvolvido é o aumento da espessura, seguida da diminuição do *gap* entre rotor e estator e, por fim, do aumento do raio do rotor.

Por fim, enquanto a análise da altura dos dentes do rotor demonstrou ser irrelevante para a variação do torque, como foi também observado no modelo anterior, a análise da altura dos pólos do estator demonstrou ser diferente do observado no modelo anterior, visto que a diminuição da altura do pólo provoca um aumento no torque final de forma quadrática, como já discutido.

6.3. Terceiro Modelo de MEF

Buscando facilitar o funcionamento dos projetos de micromotores, foi sugerido um modelo diferente de micromotor eletrostático. A idéia básica desse novo modelo geométrico de micromotor é aumentar o torque desenvolvido, aumentando as chances de funcionamento dos protótipos fabricados, como descrito mais adiante. Dessa forma, faz-se a necessidade de simular esse novo modelo de micromotor para saber a influência de seus parâmetros de projeto no torque final, como já foi feito para os modelos anteriores e para confirmar a hipótese de que esse modelo produza torque maior que os anteriores. Vale destacar também que nesse terceiro modelo de MEF é feita a mesma suposição de acionamento que no primeiro modelo, em que o campo elétrico se forma entre o par dente/pólo, ou seja, o pólo permanece aterrado enquanto o dente recebe um potencial elétrico específico.

Essa nova geometria de micromotor, mostrada na Figura 83 a seguir, é baseada na proposta de WIAK (2002). Como se pode observar, o rotor fica sobreposto ao estator (cujo tamanho é próximo ao do rotor), aumentando a área de influência do campo elétrico, como será explicado mais adiante. As demais vantagens dessa nova geometria também serão abordadas mais adiante.

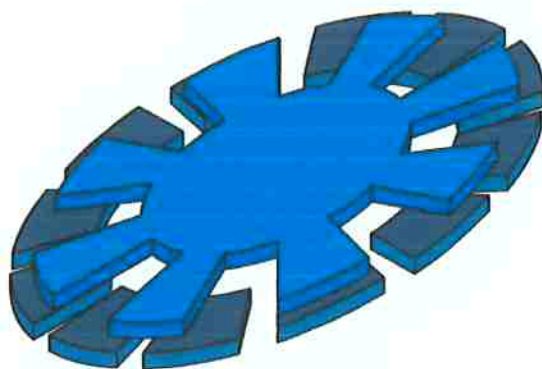


Figura 83 - Nova geometria do micromotor.

Para essa nova geometria são definidos os parâmetros de projeto mostrados na Figura 84 a seguir.

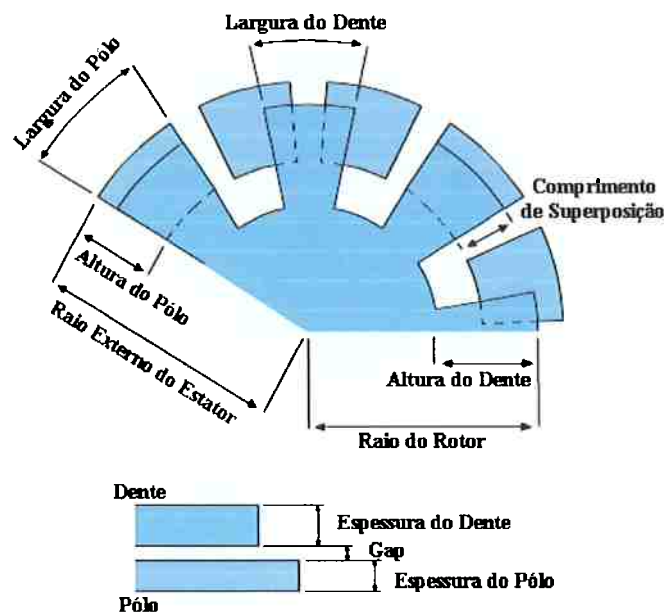


Figura 84 - Parâmetros de projeto para nova geometria de micromotor.

Como pode ser observado, a definição do *gap* se mantém para essa nova geometria, uma vez que o *gap* define o espaço entre rotor e estator. Vale ressaltar que, na prática, essa altura do *gap* pode ser definida com a construção de uma estrutura de *bushing* na base (superfície inferior) do rotor, criando uma altura de suspensão entre o rotor e o substrato (altura que deve ser maior que a espessura do estator), ou a aplicação de uma camada de material isolante sobre o estator, de forma a sustentar o rotor, impedir o contato elétrico e definir a altura do *gap*. Também vale ressaltar que o parâmetro definido como o comprimento de superposição é diretamente dependente do raio do rotor, da altura de seus dentes, do raio do estator e da altura de seus pólos. Há a necessidade de definir esse parâmetro, uma vez que este exerce grande influência no torque desenvolvido e, para essa geometria de micromotor, o comprimento e, conseqüentemente, a área de superposição são fatores que influenciam diretamente no desenho do projeto e na definição dos demais parâmetros de projeto.

Assim, para o terceiro modelo de MEF simulado será usada essa nova geometria considerando também o acionamento do motor similar ao do primeiro modelo de MEF, como já foi mencionado, em que a aplicação de potenciais elétricos se dá no par dente/pólo ativo. Dessa forma, são modelados somente um pólo do estator e

um dente do rotor, como também foi feito para o primeiro modelo. Para esse novo modelo, o dente e o pólo estão representados por seus volumes na Figura 85 a seguir (o volume azul na parte superior é o pólo do estator e o volume vermelho na parte inferior é o dente do rotor). Observe que nesse novo modelo, há uma superposição dos dois componentes, o que aumenta a complexidade do modelo de finitos, como será discutido logo adiante.

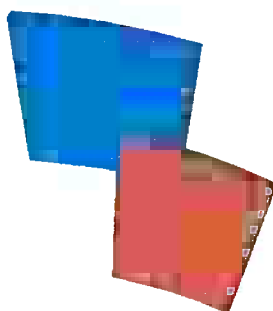


Figura 85 - Definição do pólo do rotor e do dente do estator no terceiro modelo de MEF.

A Figura 86 abaixo mostra o modelo final de MEF para esse terceiro modelo.

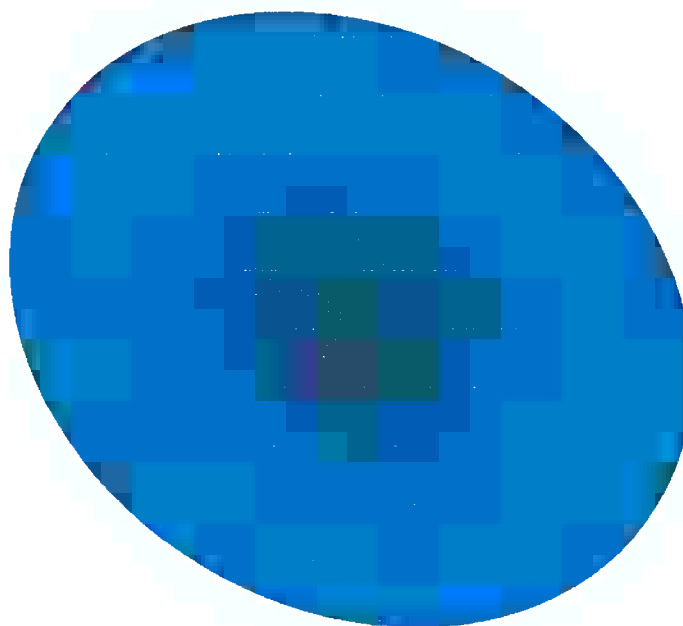


Figura 86 - Vista total do terceiro modelo de MEF para o micromotor.

Observe que, como nos modelos anteriores, os volumes do pólo e do dente não fazem parte do modelo. Assim, visto que esse modelo apresenta uma superposição de camadas de elementos da espessura do pólo, do *gap* e da espessura do dente (como é mostrado na Figura 86 anterior e na vista lateral da Figura 84), é mais difícil de se identificar a região do pólo do estator e do dente do rotor. Por esse motivo a Figura 87 a seguir mostra o mesmo modelo em duas vistas diferentes, mostrando os dois lados do modelo, para mostrar a região do pólo e do dente.

Vale ressaltar também que o *gap* é discretizado com 4 camadas de elementos, pelo fato do *gap* apresentar maiores valores dos gradientes do campo elétrico.

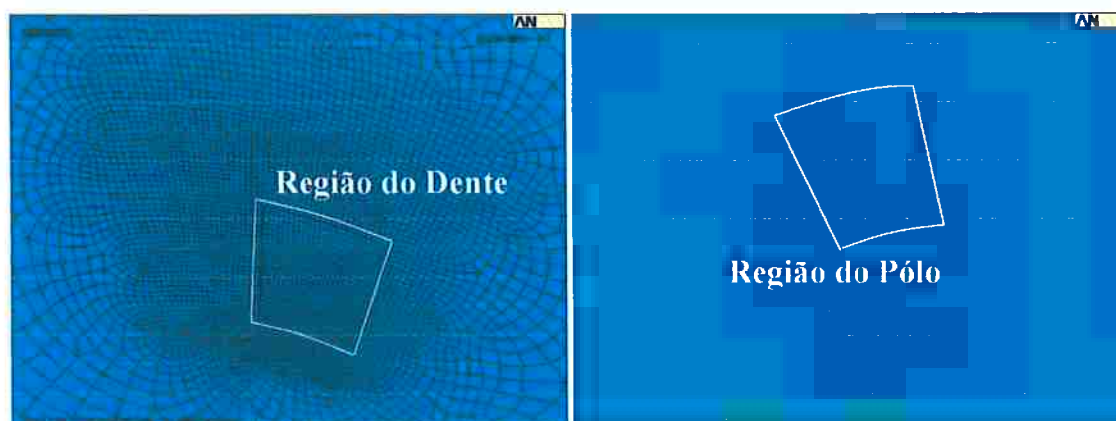


Figura 87 - Terceiro modelo de MEF: vista da região do dente, à esquerda, e vista da região do pólo, à direita.

Para compreender melhor seu funcionamento, o novo modelo foi simulado e os resultados obtidos são apresentados logo a seguir, como foi feito para os modelos anteriores. A Figura 88 mostra a distribuição de potencial elétrico nas duas vistas apresentadas na Figura 87 anterior.

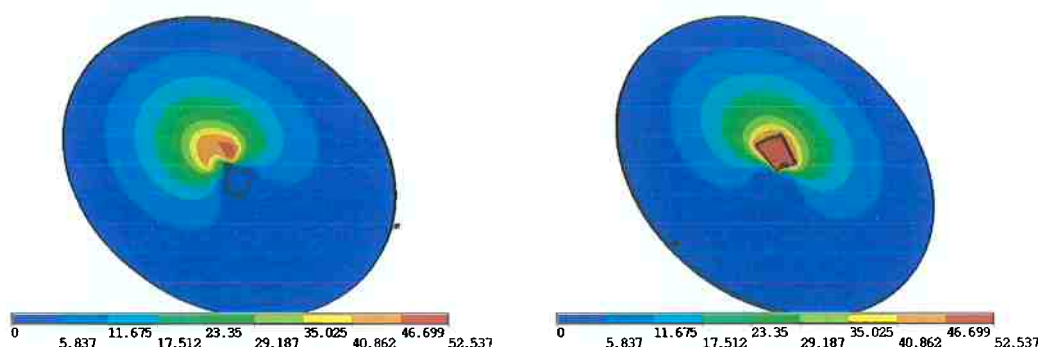


Figura 88 - Distribuição do potencial elétrico nodal no terceiro modelo: na vista da região do dente, à esquerda, e na vista da região do pólo, à direita.

Como esse modelo tem a superposição de camadas de elementos, a visualização dos resultados na malha de finitos fica limitada. Dessa forma, a Figura 89 mostra os resultados vetoriais do campo elétrico e das forças eletrostáticas no dente. Vale ressaltar que as linhas contínuas mostradas na figura são linhas de construção do modelo que o próprio ANSYS mantém ao plotar resultados vetoriais, para facilitar a visualização do resultado.

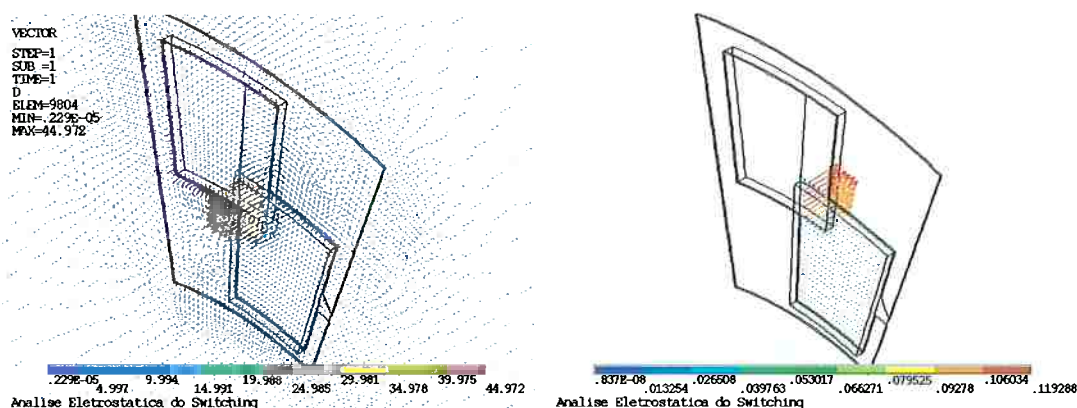


Figura 89 - Distribuição do campo elétrico vetorial, à esquerda, e distribuição das forças elétricas vetoriais no dente do rotor, à direita.

Como foi analisado no primeiro modelo, a Figura 90 abaixo mostra a importância do uso do método P, uma vez que mostra os elementos que o próprio

método julga necessário aumentar o nível P, ou seja, o grau de interpolação. Comparando com o primeiro modelo de MEF, esse novo modelo demonstra ser um problema de maior complexidade para resolução, uma vez que o número de elementos com nível P mais elevado é maior.

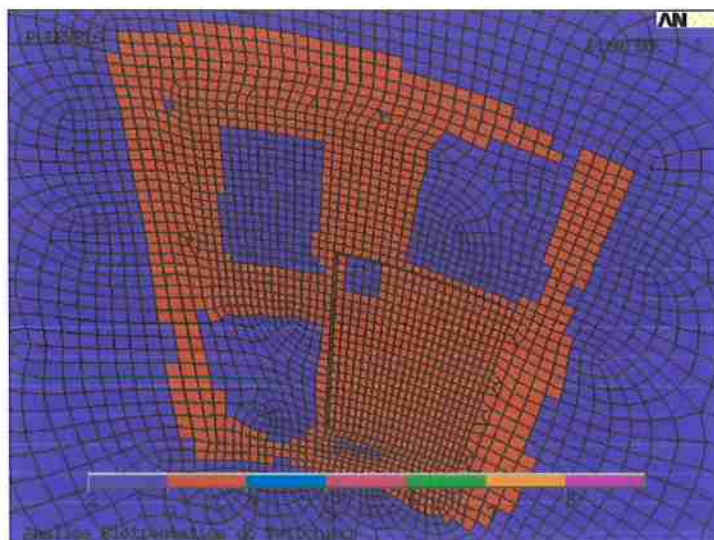


Figura 90 – Nível P dos elementos entre o par pólo/dente no desalinhamento máximo.

Para prosseguir com as análises da influência dos parâmetros de projeto no torque final desse modelo (como foi feito para os modelos anteriores), deve-se primeiro definir os valores padrões dos parâmetros de projeto, como mostra a Tabela 10 a seguir. Como foi realizado no primeiro modelo, para esse novo modelo serão aplicados 50V no pólo do estator e 0V no pólo do rotor (a mesma voltagem aplicada nos modelos anteriores). Vale ressaltar que os valores padrões definidos na tabela são similares aos valores definidos como padrão para o primeiro e para o segundo modelo (ambos mostrados na Tabela 7), para que seja possível uma futura comparação entre todos os modelos. As principais diferenças entre os valores da Tabela 10 e os valores da Tabela 7 são os valores da largura do conjunto dente/pólo e o valor do *gap* entre rotor e estator. Essa diferença entre valores das duas tabelas será melhor explicada mais adiante, quando forem apresentadas as vantagens construtivas dessa nova geometria de micromotor, que permite valores de *gap* muito mais reduzidos e necessita de larguras do conjunto dente/pólo maiores que 15°.

Parâmetros	Valor
Raio do rotor	2,500 mm
Altura do dente do rotor	0,700 mm
Largura do dente do rotor	16°
Raio externo do estator	2,640 mm
Altura do pólo do estator	0,700 mm
Largura do pólo do estator	16°
Comprimento de Superposição	80%
Gap entre rotor e estator	0,014 mm
Espessura do rotor	0,020 mm
Espessura do estator	0,020 mm

Tabela 10 – Valores padrões dos parâmetros do terceiro modelo de MEF nas análises.

Vale destacar que o valor percentual do comprimento de superposição é relativo ao valor da altura do pólo, ou seja, este valor é referente ao comprimento em que ocorre superposição do dente sobre o pólo em relação ao valor do comprimento total do pólo.

Realizando as simulações computacionais no ANSYS para obtenção dos resultados, foi obtida a curva mostrada na Figura 91 abaixo que representa a curva de torque final desse novo modelo de micromotor, aplicando a mesma metodologia usada para os modelos anteriores.

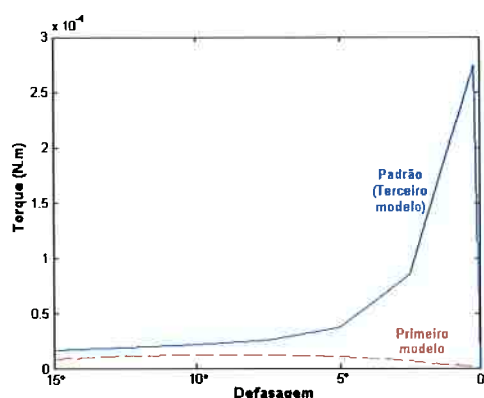


Figura 91 - Gráfico da curva padrão torque do motor do terceiro modelo.

Como é mostrado na Figura 91, essa curva de torque desenvolvido apresenta características bem distintas das curvas anteriores. A principal delas é o aumento do torque nas proximidades do alinhamento total (0° de defasagem). Isso acontece devido ao fato de que a superposição angular do dente e do pólo aumenta as áreas superpostas dos dois componentes, em que há maior concentração do campo elétrico devido à proximidade dos potenciais elétricos. Dessa forma, como pode ser visto na Figura 91 anterior, a proximidade dos potenciais elétricos nesse modelo é mais significativa para o aumento da força eletrostática que a mudança de direção do campo elétrico (que, consoante o alinhamento do rotor, tende a eliminar gradativamente componentes tangenciais, sobrando apenas componentes normais e, no caso específico desse terceiro modelo, componentes radiais, que serão melhor discutidas mais adiante).

Devido ao aumento do torque nas proximidades do alinhamento, para melhor representar a curva de torque desenvolvido do micromotor foi necessário realizar uma simulação adicional com defasagem de $0,2^\circ$ (no limiar do alinhamento total) para mostrar que, nesse terceiro modelo, o torque final tende a crescer de forma quadrática até atingir o alinhamento total quando as forças tangenciais se extinguem e o torque cai subitamente a zero.

Esse aumento do torque nas proximidades do alinhamento total já era previsto, uma vez que, apesar da diminuição do campo elétrico na direção tangencial do dente (em detrimento do aumento da força elétrica na direção axial, ou seja, na direção ortogonal do dente em sentido do pólo), há um grande aumento da área de ação do campo elétrico, que, nesse caso, representa a área de superposição do dente sobre o pólo. O aumento dessa área representa um grande aumento do valor do campo elétrico resultante e, conseqüentemente, um grande aumento da força elétrica gerada (o que será visto na Figura 92).

Vale ressaltar que a Figura 91 anterior também compara a curva de torque desse terceiro modelo com a curva do primeiro modelo (que apresentava acionamento elétrico similar) e, como já foi discutido, mostra que a nova geometria para o micromotor gera torque final maior que o primeiro modelo apresentado. Vale mencionar também que, como será mostrado nos próximos gráficos, o torque final para esse terceiro modelo pode atingir valores ainda maiores de acordo com a variação de seus parâmetros de projeto.

Para essa geometria de micromotor é também necessário observar, em cada análise de influência dos parâmetros de projeto, o comportamento da força de sentido axial, que, como já foi mencionado, representa a força gerada no dente na direção ortogonal no sentido do pólo ativo. Essa força axial gera atrito entre a superfície inferior do rotor e a superfície superior do estator (e, como será visto mais adiante no capítulo 7, sobre microfabricação, na superfície do “*bushing*”) e deve ser levado em consideração em todas análises dos parâmetros do motor. Assim, a Figura 92 abaixo mostra a curva da força axial para o modelo padrão apresentado na Tabela 10.

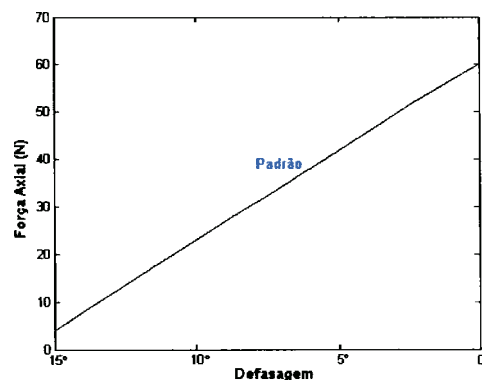


Figura 92 - Curva da força axial no modelo padrão (do terceiro modelo).

Como pode ser observado na curva da Figura 92, a força axial aumenta linearmente até atingir seu máximo no alinhamento total. Como já foi mencionado, esse aumento está diretamente relacionado com o aumento do campo elétrico resultante por causa do aumento (também linear) da área de superposição entre o dente e o pólo. Também se faz necessário analisar o coeficiente de inclinação da curva da força axial, como será visto mais adiante. Usando a expressão da eq.(80), chega-se à conclusão de que o coeficiente de inclinação da curva padrão de força axial é **3,754**.

Prosseguindo com as análises para esse terceiro modelo de MEF, primeiramente deve-se analisar a influência do raio do rotor no torque final. Nesse ponto, vale atentar para o fato de que, diferentemente dos modelos anteriores, nesse modelo há a dependência de alguns parâmetros como o comprimento de superposição (que depende do valor do raio do rotor, do raio externo do estator e da altura dos pólos). Dessa forma,

como já foi explicado, devido à grande importância do comprimento de superposição, optou-se por fixar esse valor em 80% da altura do pólo para essa análise. Isso significa que o aumento do raio do rotor implica indiretamente no aumento do raio externo do estator para manter fixo o valor do comprimento de superposição. Também vale atentar para o fato de que isso não implica na fixação do valor da área de superposição, pois esta aumenta à medida que o comprimento dos arcos do rotor e do estator aumentam, por causa do aumento do raio do rotor. Assim, realizando essa análise, obtém-se a Figura 93 abaixo.

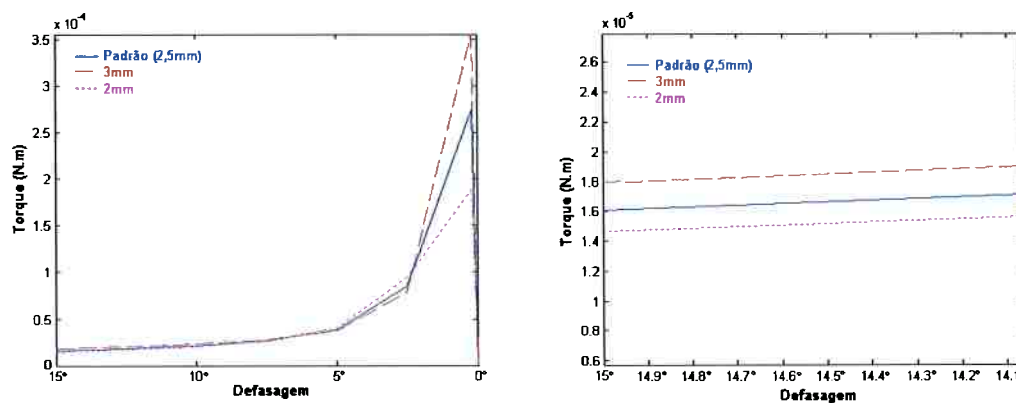


Figura 93 - Gráfico do torque na variação do raio do rotor, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

A Figura 93 acima mostra que, como foi visto nos modelos anteriores, o aumento do raio do rotor influencia no aumento do torque final. Até a aproximação do rotor da posição de alinhamento total, a diferença entre o torque de cada curva é pequena, no entanto, ainda significativa, visto que a região de defasagem entre 15° e 5° é a região mais importante, uma vez que esta define o funcionamento do micromotor. Nas proximidades do alinhamento total, essa diferença entre as curvas se acentua, como pode ser visto no gráfico, por causa do mesmo motivo já mencionado da grande intensidade do campo elétrico resultante.

Como já foi mencionado, também é importante analisar a curva de força axial para os três casos mostrados na Figura 93, como é mostrado na Figura 94 a seguir.

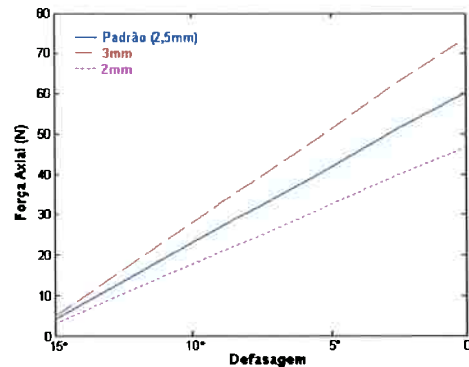


Figura 94 - Gráfico da força axial na variação do raio do rotor.

A Figura 94 não somente mostra que, para o aumento do raio do rotor, há o aumento da força axial, mas também mostra que, para maiores valores do raio do rotor, há o aumento do coeficiente de inclinação da curva da força axial: **4,596** para 3,0mm de raio, **3,754** para 2,5mm de raio e **2,908** para 2,0mm de raio. Como será visto mais adiante, esse aumento do coeficiente quase sempre acompanha o aumento da força axial inicial (15° de defasagem). Portanto, toda vez que se observar o aumento da força axial inicial, deve-se subentender que há o aumento do coeficiente de inclinação (com exceção de alguns casos apresentados mais adiante).

Também se faz necessário analisar melhor essa dependência do torque do raio do rotor. Para isso foi levantada uma curva do torque inicial (15° de defasagem) em relação à variação do raio do rotor e uma curva da força axial inicial em relação à variação do raio do rotor, como é mostrado na Figura 95 abaixo.

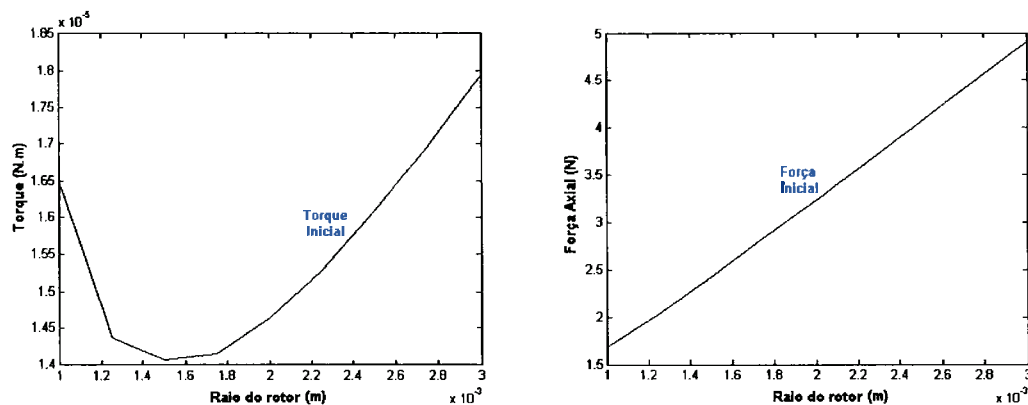


Figura 95 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do raio do rotor.

Como se pode observar na Figura 95 anterior, há uma região de mínimo torque na curva do torque inicial em função do raio do rotor. Existem três fatores (todos já mencionados) que explicam esse comportamento da curva. O primeiro fator é a proximidade das cargas elétricas quando há a diminuição do raio do rotor. Essa proximidade tende a aumentar o valor das forças elétricas do modelo. O segundo fator é a influência que o raio do rotor tem no cálculo do torque desenvolvido. Essa influência faz com que o torque aumente juntamente com o aumento do raio. Por fim, o terceiro fator é o aumento da área de superposição. Uma vez fixadas as distâncias angulares entre o pólo e dente (por causa dos alinhamentos do *switching*), o aumento do raio do rotor implica no aumento dos arcos que compõem o desenho do motor, que influi diretamente no aumento da área de superposição, que, por sua vez, determina uma região de maior proximidade dos potenciais elétricos do dente e do pólo. Dessa forma, com o aumento do raio, e conseqüente aumento da área de superposição, também há proximidade das cargas elétricas que aumentam o torque inicial, entretanto, em menor escala que o primeiro fator (para o caso do torque inicial – na situação de defasagem de 15°). A composição desses três fatores gera uma região de mínimo no gráfico do torque inicial em função do raio do rotor. A posição dessa região no gráfico depende dos parâmetros de projeto de cada modelo de motor, portanto, a região entre 1,2mm e 1,8mm, mostrada no gráfico, é característica apenas para o modelo padrão simulado.

Na curva da força axial inicial em função do raio do rotor observa-se que o aumento do raio implica no aumento da força axial de forma linear. Essa relação é resultado apenas do aumento da área de superposição, que define uma região de intenso campo elétrico, principalmente na direção axial.

Analisando a influência do *gap* entre dente e pólo, da mesma forma que foi feito nos modelos anteriores, obteve-se o gráfico a seguir.

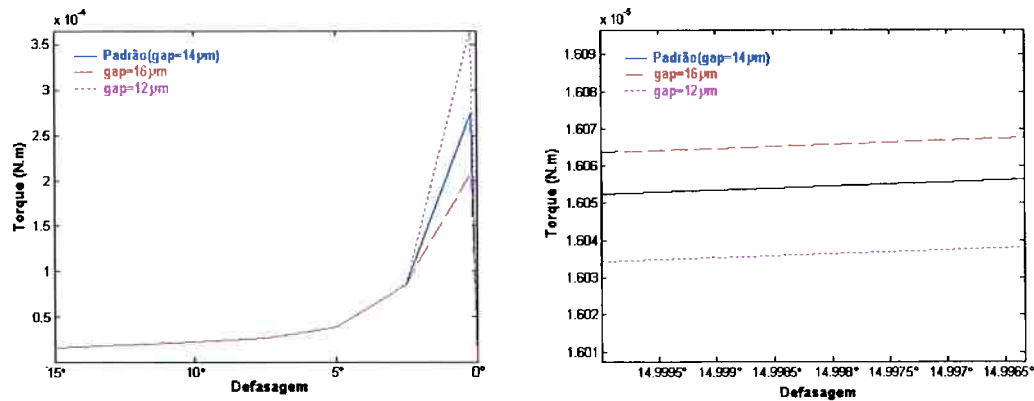


Figura 96 - Gráfico do torque na variação do *gap* entre rotor e estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

Observando a Figura 96 acima, nota-se que há o aumento do torque com a diminuição do *gap*, como foi visto nos modelos anteriores. Entretanto, essa variação demonstra ser muito pequena até o limiar do alinhamento total, quando a diferença entre as três curvas passa a ser mais significativa, embora seja em uma região de pouca importância. Vale destacar desde já que esse comportamento do torque desenvolvido, mostrado nessa Figura 96 e nas figuras anteriores, se repete para as demais análises.

A Figura 97 abaixo mostra o comportamento da força axial para os três casos analisados.

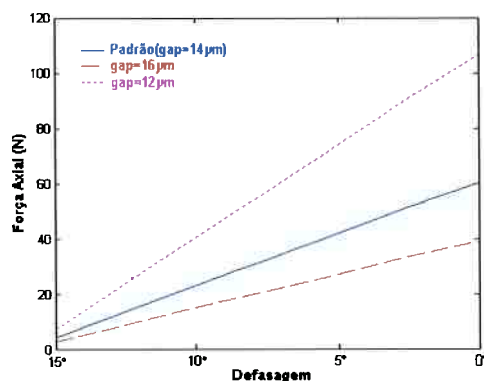


Figura 97 - Gráfico da força axial na variação do *gap* entre rotor e estator.

Como se nota na Figura 97 acima, o comportamento da força axial é similar ao do torque, uma vez que também aumenta com a diminuição do *gap*, embora demonstre grande diferença no seu valor para os três casos. Isso acontece por causa do aumento da proximidade das cargas elétricas com diminuição do *gap*, o que aumenta as forças elétricas no micromotor. Analisando os coeficientes de inclinação de cada curva, temos: **2,407** para 16 μm de *gap*, **3,754** para 14 μm de *gap* e **6,655** para 12 μm de *gap*. Observando esses valores de coeficiente, essa análise apresenta resultado similar à análise anterior, uma vez que a curva que apresenta maior força axial inicial apresenta também maior coeficiente de inclinação da curva de força axial.

Para analisar melhor o comportamento do torque e da força axial, há a necessidade de levantar os gráficos do comportamento de ambos em função da variação do *gap*, como foi feito na análise anterior, mostrados na Figura 98 a seguir.

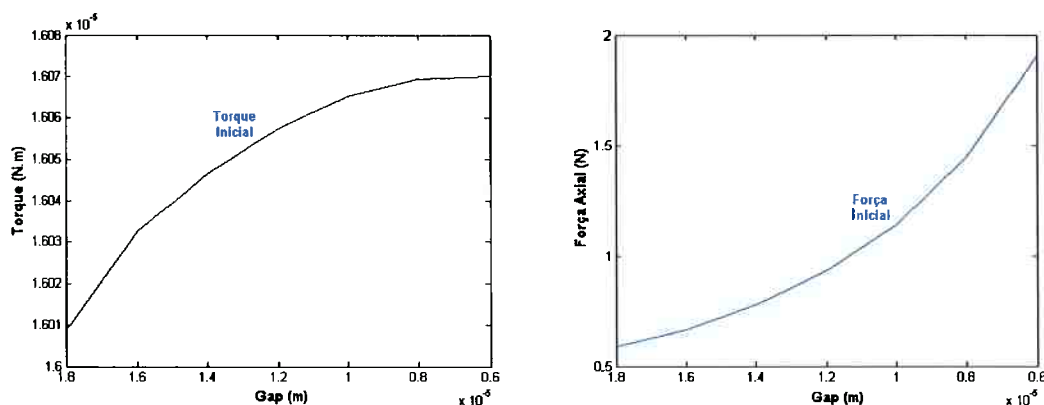


Figura 98 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do *gap* entre rotor e estator.

Como pode ser observado na Figura 98 acima, a diminuição do *gap* provoca o aumento do torque e o aumento da força axial, ambos de forma quadrática. No entanto, o intervalo de variação do torque é muito pequeno, podendo, portanto, ser considerado que não há variação significativa do torque em relação à diminuição do *gap*. Já para a análise da força axial, a influência do *gap* é ampliada pelo fato de que, como foi mostrado, o valor dos coeficientes da inclinação das curvas de força axial são

relativamente grandes em comparação as outras análises (como será visto mais adiante) e também apresentam grande aumento para pequenas variações no *gap*.

Dessa forma, pode-se concluir que é melhor para o projeto de um micromotor (considerando apenas esse terceiro modelo de MEF) o uso de valores de *gap* um pouco maiores, analisando previamente a curva de torque inicial para se determinar se a perda de torque é significativa com o uso de um *gap* maior.

Analisando a influência da variação da largura do conjunto dente/pólo no torque desenvolvido, obteve-se a Figura 99 abaixo.

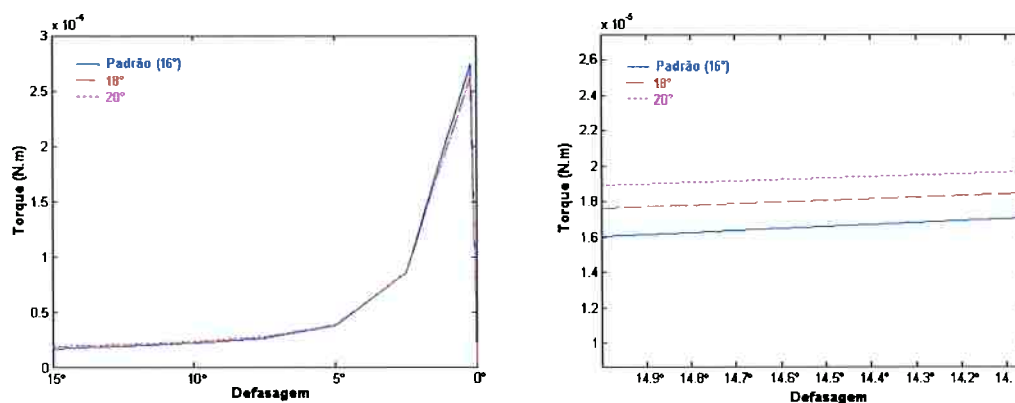


Figura 99 - Gráfico do torque na variação da largura do conjunto dente/pólo, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

Como pode ser observado na Figura 99 anterior, diferente das outras análises, a variação da largura do conjunto dente/pólo não modifica significativamente o formato da curva de torque, nem mesmo no limiar do alinhamento total.

Analisando a força axial para os três casos de variação da largura do conjunto dente/pólo, obteve-se a Figura 100 a seguir. Diferente das demais análises, nessa análise as três curvas apresentam o mesmo valor do coeficiente de inclinação (**3,754**).

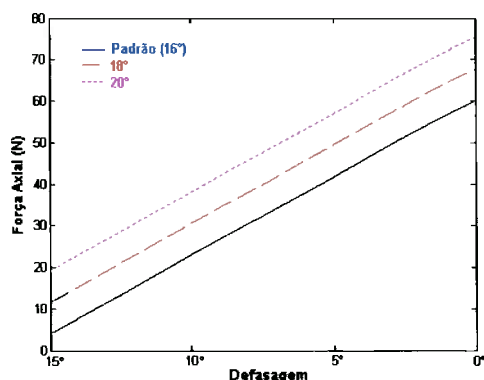


Figura 100 - Gráfico da força axial na variação da largura do conjunto dente/pólo.

A Figura 101 abaixo mostra a curva de torque inicial e a curva de força axial inicial em função da variação da largura do conjunto dente/pólo.

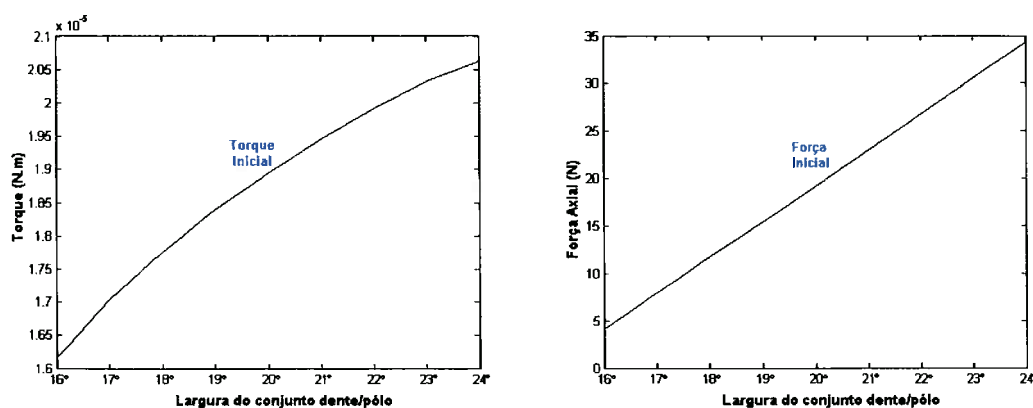


Figura 101 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da largura do conjunto dente/pólo.

Como pode ser visto na Figura 101 acima, o aumento da largura do conjunto dente/pólo resulta no aumento do torque inicial desenvolvido (de forma quadrática) e no aumento da força axial inicial (de forma linear), ambos causados pelo aumento da área de superposição. Vale destacar que a curva da força axial inicial mostra uma grande variação da força axial, atingindo valores elevados, que pode inviabilizar o projeto de um micromotor. Portanto, o aumento da largura dos dentes e dos pólos pode ser inviável para o projeto do micromotor, para esse modelo analisado.

Da mesma forma que foi feito para o primeiro modelo de MEF, é importante analisar também o caso em que o dente do rotor apresenta largura maior que o pólo do estator. Essa situação está apresentada na Figura 102 abaixo.

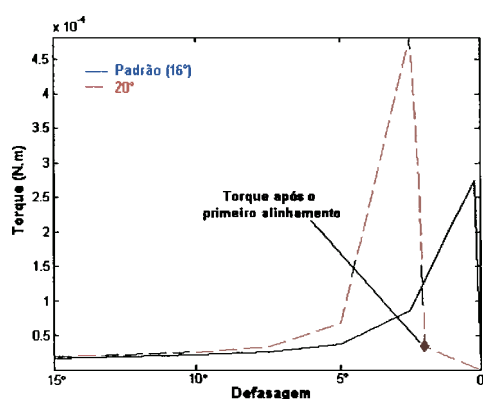


Figura 102 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor.

Observando o gráfico acima, pode-se notar que o aumento somente do dente do rotor antecipa o pico de máximo torque além de aumentar o valor do torque em todo perfil da curva. Entretanto, essa curva com largura do dente superior à largura do pólo apresenta uma queda do torque desenvolvido exatamente na defasagem de 2°, que representa o primeiro alinhamento do par dente/pólo (que é melhor explicado na Figura 61 e na Figura 62). Embora esse valor de torque no primeiro alinhamento seja superior ao torque inicial da curva, representa um grande risco de parada do micromotor por causa do atrito, uma vez que nessa defasagem, como é mostrado na Figura 103 abaixo, o valor da força axial é relativamente elevado. Caso ocorra a parada do *switching*, como prevê a Figura 62, há um grande risco de perda de sincronia do rotor, como já foi discutido, impedindo o funcionamento do micromotor. Dessa forma, para esse modelo de micromotor, ter a largura do dente superior à largura do pólo representa um risco maior de parada após o primeiro alinhamento que no caso do primeiro modelo simulado.

Prosseguindo com essa análise, foi obtido o gráfico da força axial para a variação da largura somente do dente do rotor, como é mostrado na Figura 103 abaixo.

Como pode ser observado, seu comportamento é similar ao apresentado na Figura 100, mantendo um coeficiente de inclinação de **3,754**.

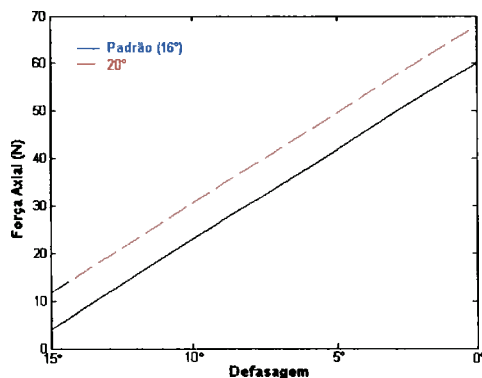


Figura 103 - Gráfico da força axial para variação da largura somente do dente do rotor.

Prosseguindo com as análises, é importante analisar a influência da espessura do micromotor no torque desenvolvido. Nos modelos anteriores foi considerada somente uma espessura para rotor e estator, dado sua similaridade de construção na microfabricação. Para esse novo modelo de micromotor, foram considerados separadamente a espessura do rotor e a espessura do estator. Assim, primeiro foi analisada a espessura do estator, como é mostrado na Figura 104 abaixo.

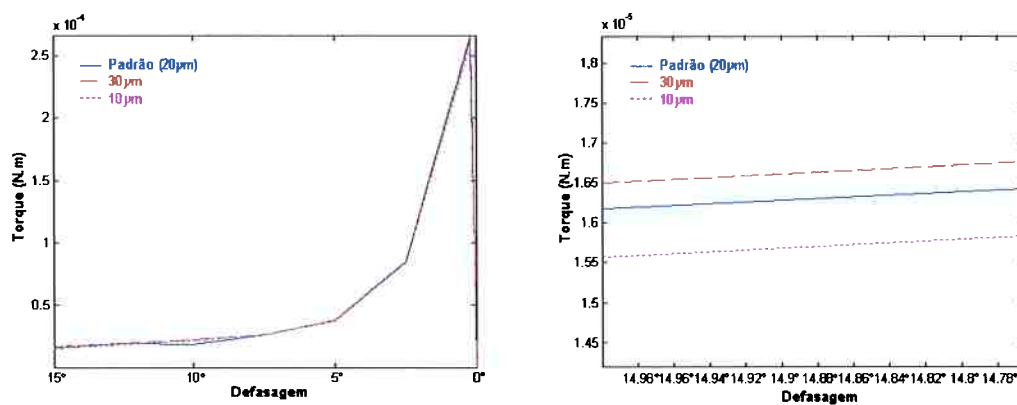


Figura 104 - Gráfico do torque na variação da espessura do estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

Como é mostrado na Figura 104, um valor maior de espessura do estator aumenta o torque desenvolvido, embora seja um aumento muito pequeno e, portanto, pouco significativo. Analisando o valor da força axial, obteve-se a Figura 105 abaixo.

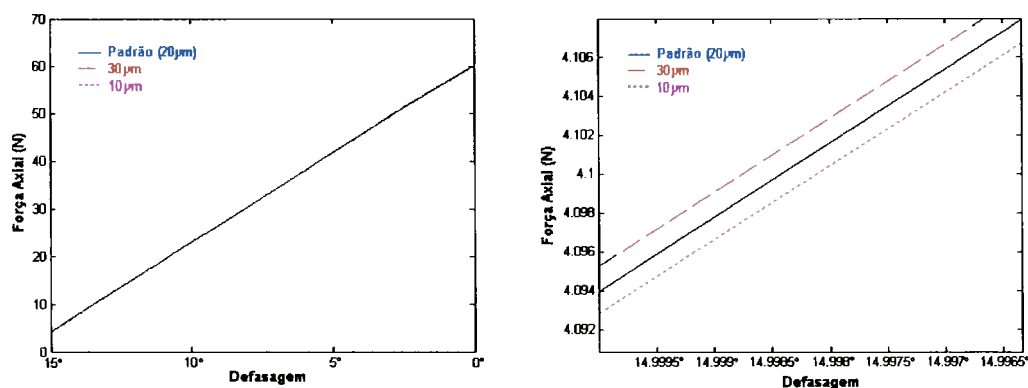


Figura 105 - Gráfico da força axial na variação da espessura do estator, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

Similar ao comportamento do torque, o aumento da espessura do estator provoca o aumento da força axial, no entanto, esse aumento é praticamente desprezível. Essa alteração na espessura do estator não modifica o coeficiente de inclinação do modelo padrão, mantido em **3,754**.

Para melhor compreender a influência desse parâmetro de projeto no torque e na força axial, foram levantados os gráficos a seguir.

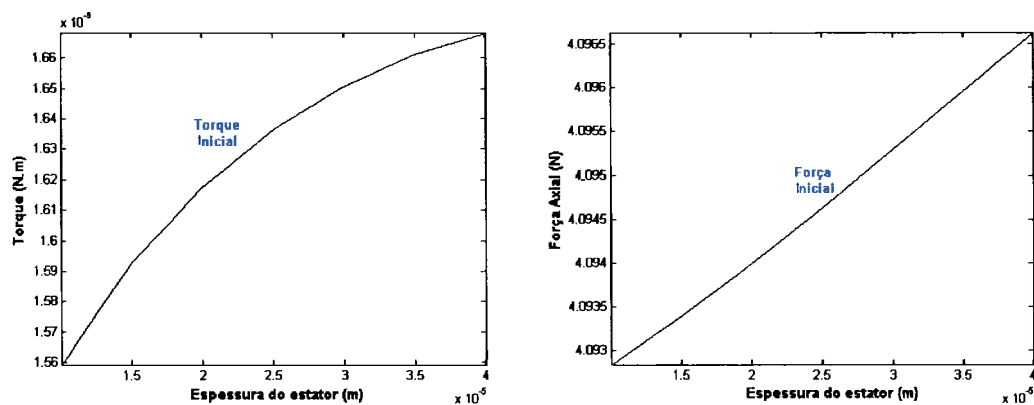


Figura 106 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da espessura do estator.

A Figura 106 comprova que o aumento da espessura do estator provoca um pequeno aumento no torque desenvolvido (de forma quadrática) e um aumento praticamente desprezível na força axial inicial. Isso se justifica pelo fato de que o aumento da espessura do estator aumenta também o campo elétrico gerado e, conseqüentemente, aumenta as forças eletrostáticas envolvidas no problema. Portanto, pode-se considerar o aumento da espessura do estator do micromotor como sendo uma alteração que ajuda a viabilizar o projeto.

Entretanto, deve-se atentar para a escala dos gráficos mostrados na Figura 106, que mostram que a variação de torque e de força axial são muito pequenos e, portanto, desprezíveis na variação da espessura do estator.

Analisando da mesma forma a influência da espessura do rotor no torque desenvolvido, obteve-se a Figura 107 abaixo.

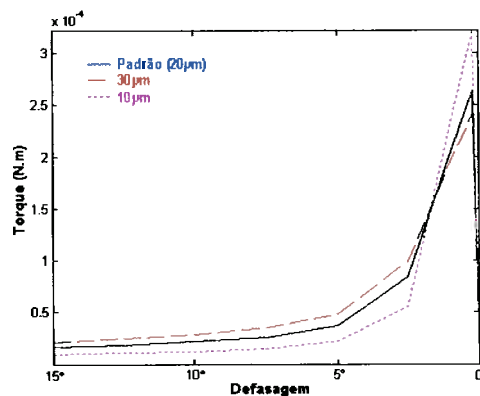


Figura 107 - Gráfico do torque na variação da espessura do rotor.

Analisando os mesmos três casos observados no gráfico anterior para sua influência na força axial, obteve-se a Figura 108 a seguir.

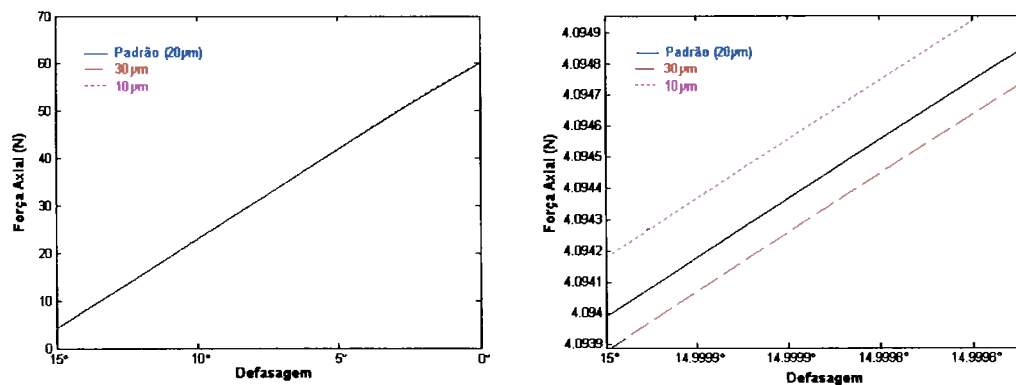


Figura 108 - Gráfico da força axial na variação da espessura do rotor, à esquerda, e zoom da situação inicial, à direita.

Como pode ser observado na Figura 108 acima, não há praticamente modificação entre as curvas de força axial para a variação da espessura do rotor, pois a variação entre as três curvas é desprezível, mantendo, portanto, o coeficiente de inclinação em **3,754**.

Prosseguindo com a análise, foram levantadas as curvas do torque inicial e da força axial inicial em função da variação da espessura do rotor, mostrado na Figura 109 a seguir.

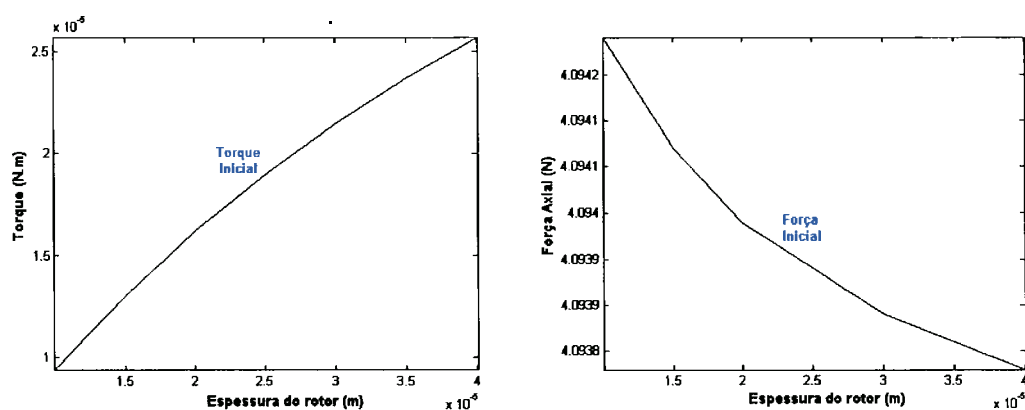


Figura 109 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da espessura do rotor.

A Figura 109 mostra que o aumento da espessura do rotor causa um importante aumento no torque desenvolvido de forma aproximadamente quadrática e uma diminuição totalmente desprezível na força axial. Portanto, o aumento da espessura do rotor é uma das mais importantes formas de aumentar a eficácia no projeto de um micromotor.

Analisando a influência da voltagem aplicada nos pólos do estator para esse modelo de MEF, obteve-se o gráfico da Figura 110 a seguir.

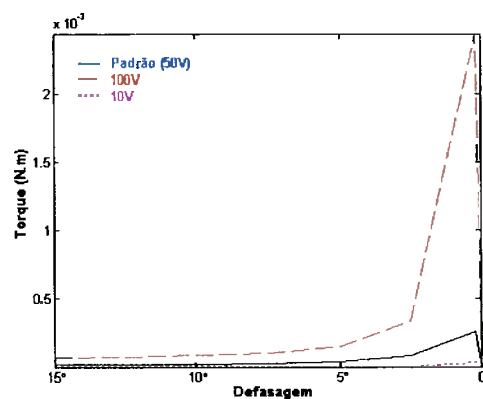


Figura 110 - Gráfico do torque para variação da voltagem aplicada.

A Figura 110 acima mostra uma grande variação no torque desenvolvido para cada caso de voltagem aplicada. Prosseguindo com a análise, a Figura 111 abaixo mostra o comportamento da curva de força axial para os três casos analisados.

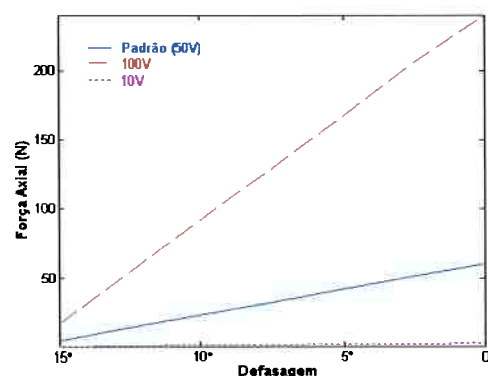


Figura 111 - Gráfico da força axial para variação da voltagem aplicada.

A Figura 111 também mostra grande variação para a força axial com a variação da voltagem aplicada. Essa grande variação também pode ser expressa pelo grande aumento nos coeficientes de inclinação das retas com o aumento da voltagem aplicada: para **0,150** 10V; **3,754** para 50V; e **15,009** para 100V.

Para melhor analisar os comportamentos do torque e da força axial com a variação da voltagem aplicada, foram levantados os gráficos mostrados na Figura 112 abaixo.

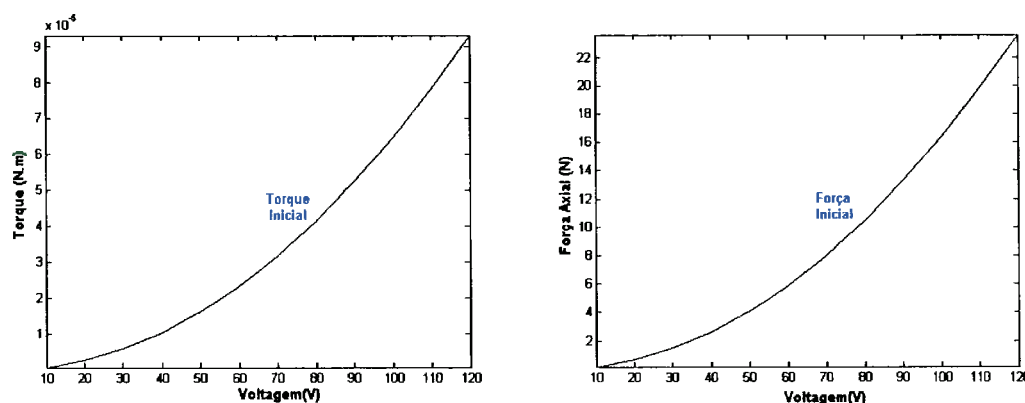


Figura 112 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função da voltagem aplicada.

A Figura 112 acima mostra que o aumento da voltagem aplicada provoca um grande aumento (de forma quadrática) tanto no torque desenvolvido quanto na força axial. Entretanto, vale lembrar que esse aumento na força axial inicial também é acompanhado por um grande aumento no coeficiente de inclinação das curvas de força axial para cada caso de voltagem aplicada (como já foi discutido).

Analisando a influência da altura do dente do rotor chegou-se a conclusão de que sua variação (considerando fixos os valores do raio do rotor e do comprimento de superposição) não resulta em variação significativa no torque desenvolvido e na força axial.

Vale lembrar que, tendo fixado os valores do raio do rotor e do comprimento de superposição, não há como analisar (nem há a necessidade de analisar) a variação do

raio externo do estator e da altura de seus pólos, uma vez que a análise do comprimento de superposição substitui essas análises.

Dessa forma, faz-se necessário analisar a influência da variação do comprimento de superposição nos valores do torque desenvolvido e da força axial no micro-motor, como mostra a Figura 113 abaixo.

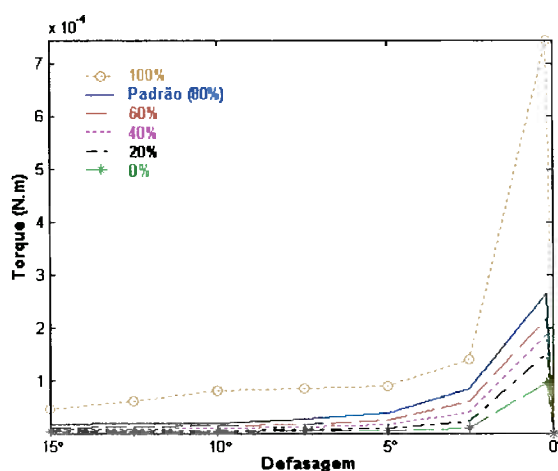


Figura 113 - Gráfico do torque para variação do comprimento de superposição.

A Figura 113 anterior mostra claramente que o aumento da superposição aumenta significativamente o valor do torque desenvolvido. A figura também mostra que no caso de superposição total (100% da altura do estator), o valor do torque desenvolvido é máximo e diferenciado em relação aos demais casos.

Analisando o comportamento da força axial nesses casos de superposição, obteve-se a Figura 114 a seguir.

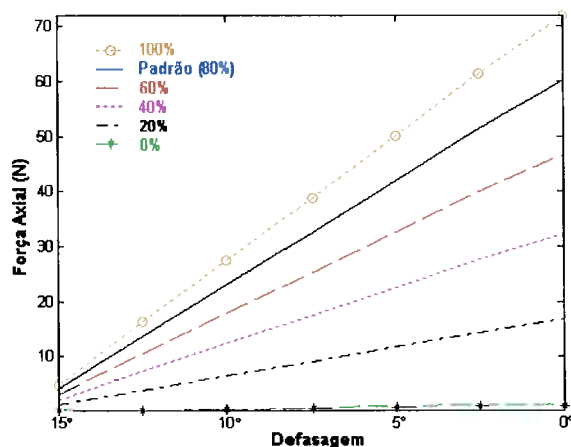


Figura 114 - Gráfico da força axial para variação do comprimento de superposição.

A Figura 114 acima mostra que o aumento da superposição ocasiona também o aumento da força axial. Isso é facilmente justificado pelo aumento da área de superposição que representa uma área de maior proximidade de cargas elétricas e, portanto, maiores forças eletrostáticas envolvidas. Observando os valores dos coeficientes de inclinação para cada caso de superposição, observa-se também que o aumento da força axial é seguido pelo aumento do coeficiente de inclinação: **4,483** para 100%; **3,754** para 80%; **2,908** para 60%; **2,005** para 40%; **1,046** para 20%; e **0,070** para 0%.

Para melhor compreender essa análise, a Figura 115 abaixo mostra o torque inicial e a força axial inicial em função da variação do comprimento de superposição.

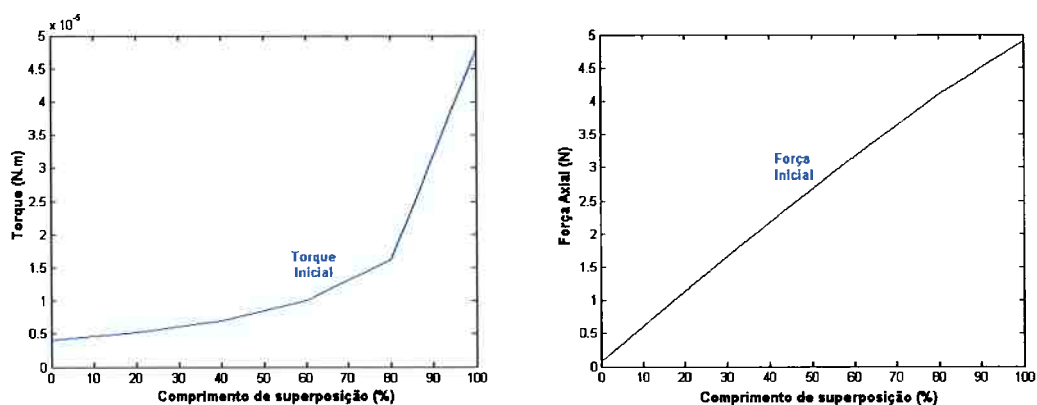


Figura 115 - Torque inicial, à esquerda, e força axial inicial, à direita, em função do comprimento de superposição.

Como pode ser observado na Figura 115 anterior, tanto o torque desenvolvido quanto a força axial aumentam quando há o aumento do comprimento de superposição. Vale atentar para o fato de que, na superposição total (100%), há um grande aumento no valor do torque desenvolvido que não é proporcionalmente seguido pelo aumento na força axial. Por esse motivo, conclui-se que o melhor projeto para um micromotor, tendo em vista essa análise, é usando superposição total.

Por fim, deve-se analisar a questão do atrito nesse novo modelo de micromotor. Primeiramente, devem-se levantar as curvas de força tangencial e de força normal para observar seu comportamento e sua grandeza.

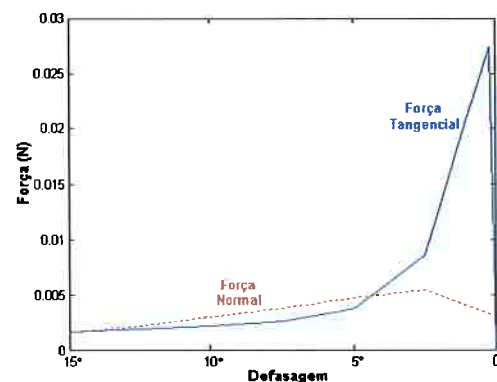


Figura 116 - Forças tangencial e normal do modelo padrão (com 80% de superposição).

Uma vez que o comprimento de superposição apresenta grande importância para o projeto de um micromotor, a Figura 117 mostra o comportamento das forças tangenciais e normais para cada caso de superposição. Observe que, para o caso de superposição total, a força normal é nula.

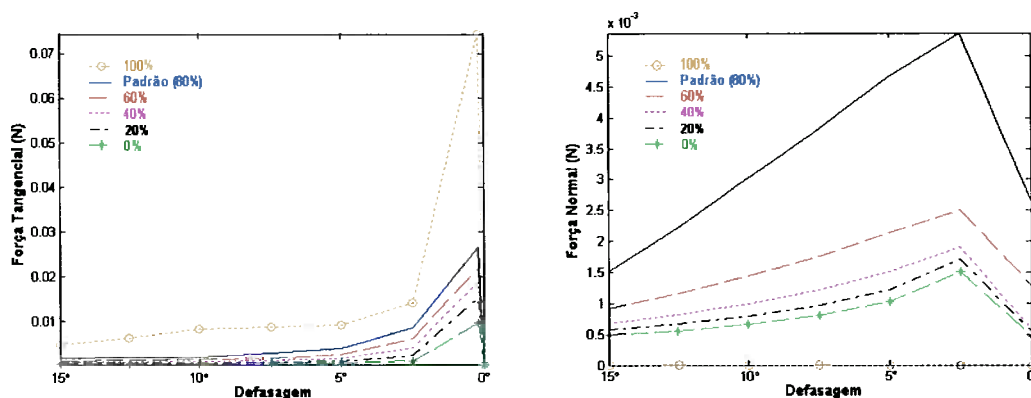


Figura 117 - Gráficos da força tangencial, à esquerda, e da força normal, à direita, para cada caso de superposição.

A Figura 117 acima mostra que há o aumento da força normal no dente do rotor enquanto há o aumento da área de superposição, até a situação de superposição total, em que as forças normais vão para zero, uma vez que o campo elétrico na direção definida como normal tende a zero.

Analisando o coeficiente de atrito, usando a mesma metodologia usada para os modelos anteriores, obteve-se o seguinte gráfico do coeficiente de atrito máximo permitido para o modelo padrão.

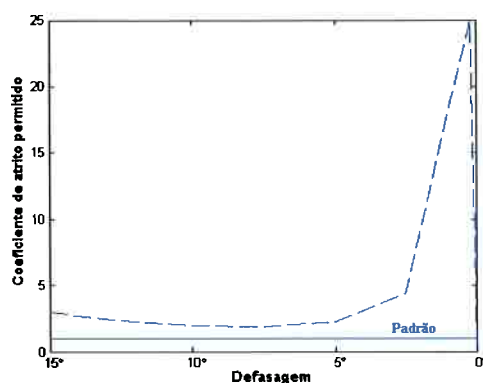


Figura 118 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido no eixo do rotor.

A Figura 118 mostra que toda a curva do coeficiente de atrito permitido (calculado pela eq.(29), mesma equação usada para o cálculo do atrito nos modelos anteriores) está acima da linha de coeficiente de valor unitário (único fisicamente possível, como já foi discutido). Isso significa que, qualquer que seja o coeficiente de atrito no eixo do rotor, não há possibilidade de que a força normal impeça o funcionamento do micromotor. Essa mesma conclusão também é obtida para todos os outros casos de superposição estudados (de 0% a 100%).

Por fim, deve-se também estimar o valor desse coeficiente de atrito permitido para a superfície inferior do rotor, que pode ser calculado para esse modelo, uma vez que a força axial no rotor representa a força ortogonal à superfície do dente do rotor que ocasiona o atrito calculado na eq.(27). O resultado desse cálculo é mostrado na Figura 119 abaixo.

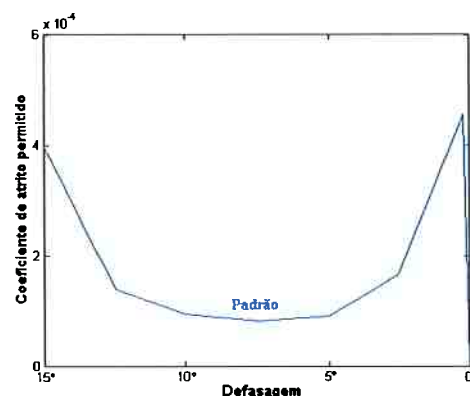


Figura 119 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido na superfície inferior do rotor.

A Figura 119 acima mostra que o coeficiente de atrito na superfície inferior do rotor deve ser muito bem planejado para não haver riscos ao funcionamento do micromotor, visto que a Figura 119 indica a necessidade de se trabalhar com um coeficiente de atrito bem pequeno, que pode até mesmo inviabilizar o projeto desse terceiro modelo de micromotor.

Uma vez concluídas as análises dos parâmetros de projeto para esse terceiro modelo, de forma análoga ao que foi realizado nos modelos anteriores, é necessário

montar uma tabela para comparar os resultados mostrados nos gráficos anteriores. Vale ressaltar que, para esse terceiro modelo, também há a necessidade de se criar uma tabela para interpretar os resultados não apenas relativos ao torque desenvolvido, mas também à força axial, mostrados, respectivamente, na Tabela 11 e na Tabela 12. Vale lembrar também que são consideradas as eq. (80) e (81) para se obter os coeficientes mostrados na tabela abaixo.

Análise	Aumento do Torque	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Aumentar	c/ Mínimo	Min (1,2mm, 1,8mm)
Gap entre Rotor e Estator	(torque constante)	-	-
Largura do Conjunto dente/pólo	Aumentar	Quadrática	$p1 = -3.4e-8; p2 = 1.9e-6; p3 = -5.8e-6$
Espessura do Estator	Aumentar	Quadrática	$p1 = -1.0e3; p2 = 8.6e-2; p3 = 1.5e-5$
Espessura do Rotor	Aumentar	Quadrática	$p1 = -6.5e3; p2 = 8.6e-1; p3 = 1.4e-6$
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 6.5e-9; p2 = 1.3e-10; p3 = -1.1e-9$
Comprimento de Superposição	Aumentar	Quadrática	$p1 = 3.2e-8; p2 = -4.1e-6; p3 = 1.4e-4$

Tabela 11 - Resumo dos resultados de torque desenvolvido para o terceiro modelo.

Análise	Aumento da Força Axial	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Aumentar	Linear	$c1 = 1.6e3; c2 = 2.2e-2$
Gap entre Rotor e Estator	Diminuir	Quadrática	$p1 = 8.9e9; p2 = -3.2 e5; p3 = 3.5$
Largura do Conjunto dente/pólo	Aumentar	Linear	$c1 = 3.8; c2 = -5.6e1$
Espessura do Estator	(força constante)	-	-
Espessura do Rotor	(força constante)	-	-
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 1.6e-3; p2 = -5.5e-7; p3 = 9.9e-6$
Comprimento de Superposição	Aumentar	Linear	$c1 = 4.8e-2; c2 = 1.6e1$

Tabela 12 - Resumo dos resultados de força axial para o terceiro modelo.

Observando os resultados obtidos para esse terceiro modelo, constata-se que alguns desses resultados apresentam variação de torque ou de força axial quase desprezível em relação aos demais, como é o caso do torque na variação do *gap* e da força axial na variação das espessuras do rotor e do estator. Por esse motivo, na Tabela 11 e Tabela 12, essas análises apresentam torque ou força constantes.

Na Tabela 11, observa-se que todas as análises significativas mostram que o aumento de seus parâmetros de projeto causam o aumento do torque desenvolvido de forma quadrática, excluindo a análise do *gap*, que apresenta torque constante, e a

análise do raio do rotor, que apresenta uma região de mínimo antes de apresentar um aumento do valor do torque, como pode ser visto na Figura 95.

Analisando os gráficos de torque e os coeficientes mostrados na Tabela 11, constata-se que o parâmetro que apresenta maior influência no valor do torque final é a voltagem aplicada, seguida do comprimento de superposição. Observa-se também que a variação da espessura do estator (vide Figura 106) apresenta menor impacto significativo no valor do torque desenvolvido.

Na Tabela 12, com exceção das análises das espessuras do estator e do rotor, apenas a análise do *gap* indica que seu valor deve diminuir para o aumento da força axial, enquanto as demais análises indicam que o aumento de seus parâmetros provocam o aumento da força axial. A análise que apresenta maior aumento na força axial é o aumento na largura do conjunto dente/pólo, uma vez que este aumenta diretamente a área de superposição entre o estator e o rotor. Em seguida, a análise que apresenta o maior aumento do torque é o aumento da voltagem aplicada. É importante observar também que, das análises que apresentam aumento ou diminuição significativo da força axial, apenas as análises do aumento da voltagem (Figura 112) e do aumento do comprimento de superposição (Figura 115) que, juntamente com o aumento do valor da força axial, mostram o aumento do coeficiente de inclinação da curva de força axial, como foi mostrado na Figura 111, por exemplo.

6.4. Quarto Modelo de MEF

De forma análoga ao que foi realizado com o primeiro modelo (seção 6.1), deve-se considerar também o caso em que o rotor não tenha aplicação de potencial elétrico, o que significa que apresenta potencial elétrico flutuante e o campo elétrico gerado se dá entre dois pólos adjacentes (similar ao caso apresentado no segundo modelo, seção 6.2). Para isso foi necessário criar um quarto modelo de MEF que represente a região dos 2 pólos do estator e um dente do rotor, usando a mesma metodologia de simulação dos outros modelos e os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 10, como é mostrado na Figura 120.

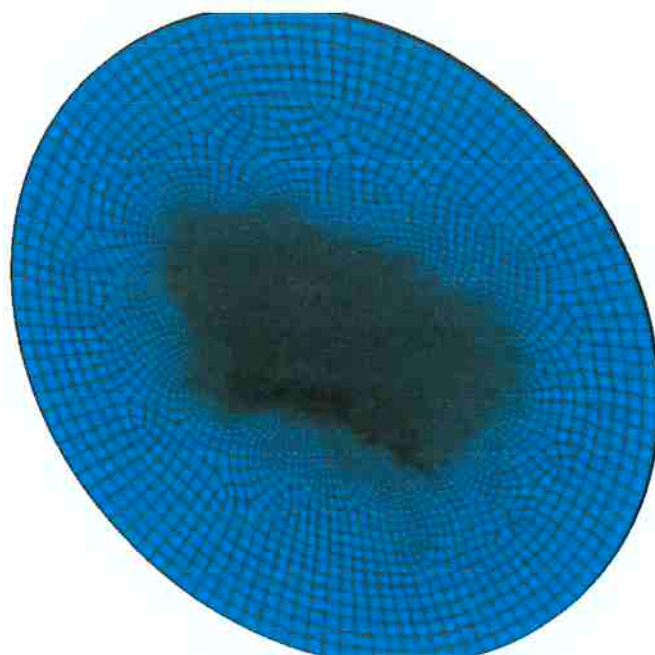


Figura 120 - Vista total do quarto modelo de MEF para o micromotor.

Da mesma forma que no modelo anterior, dado que esse modelo apresenta uma superposição de camadas de elementos da espessura do pólo, do *gap* e da espessura do dente, é difícil de se identificar a região do pólo do estator e do dente do rotor. Por esse motivo a Figura 121 abaixo mostra o mesmo modelo em duas vistas diferentes, mostrando os dois lados do modelo, para mostrar a região do pólo e do dente.



Figura 121 - Quarto modelo de MEF: vista da região do dente, à esquerda, e vista da região do pólo, à direita.

Como foi realizado para o modelo anterior, a Figura 122 mostra a distribuição de potencial elétrico nesse quarto modelo de MEF.

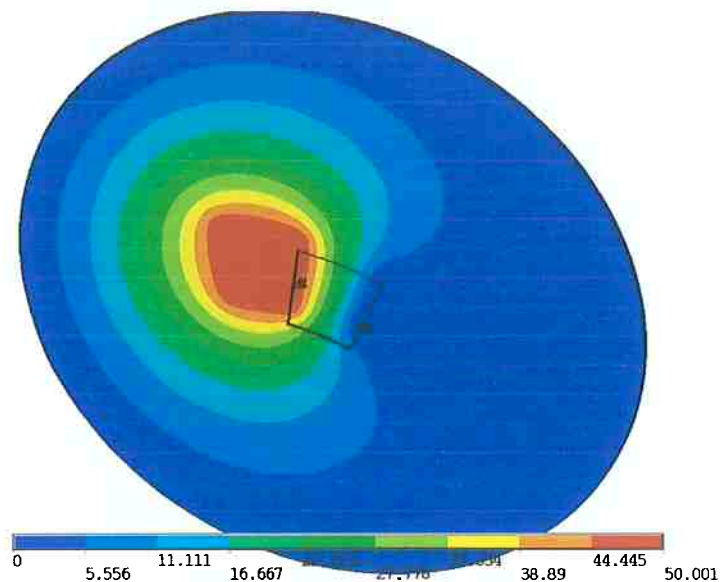


Figura 122 - Distribuição de potencial elétrico no quarto modelo de MEF.

Por fim, a Figura 123 abaixo mostra o resultado do campo elétrico vetorial para defasagem máxima (15°) nas proximidades do dente do rotor e a força elétrica vetorial no dente do rotor.

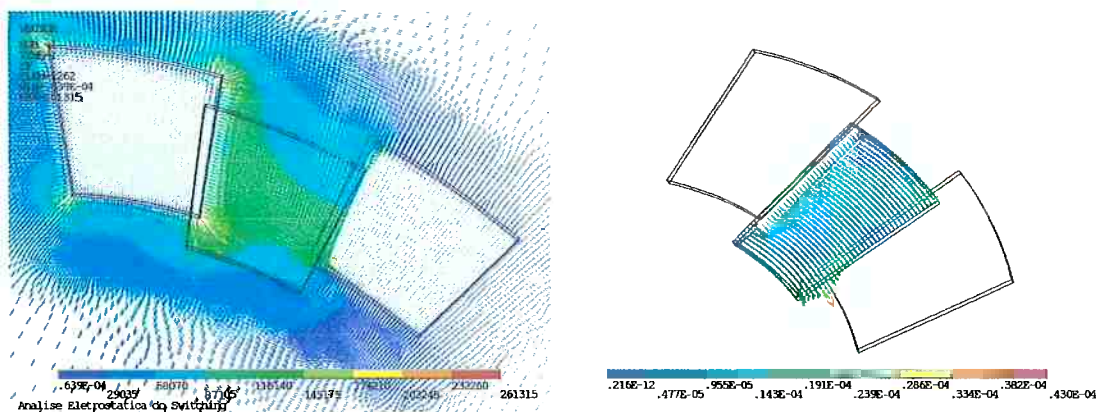


Figura 123 - Distribuição do campo elétrico vetorial, à esquerda, e distribuição das forças elétricas vetoriais no dente do rotor, à direita.

Como também foi analisado no modelo anterior, a Figura 124 a seguir mostra a importância do uso do método P nesse quarto modelo de MEF. Comparando com o modelo anterior, observa-se também um grande número de elementos com grau de interpolação aumentado.

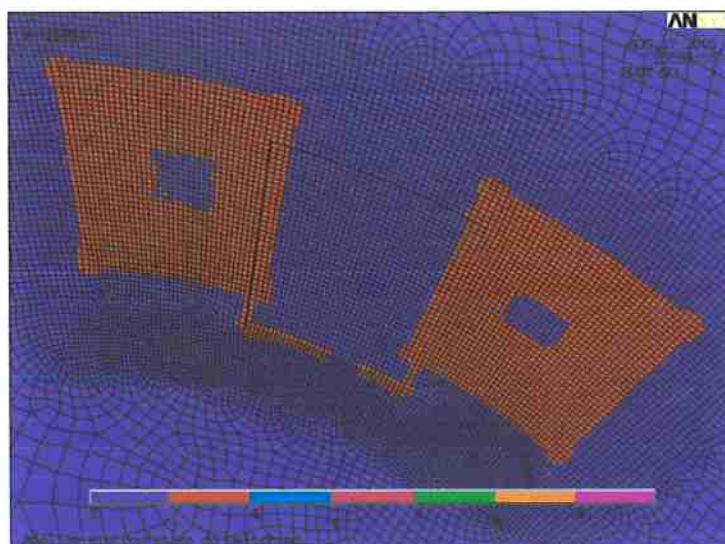


Figura 124 - Nível P dos elementos do quarto modelo de MEF no desalinhamento máximo.

Realizando as simulações computacionais no ANSYS para obtenção dos resultados, foi obtida a curva mostrada na Figura 125 que representa a curva de torque final desse quarto modelo de micromotor.

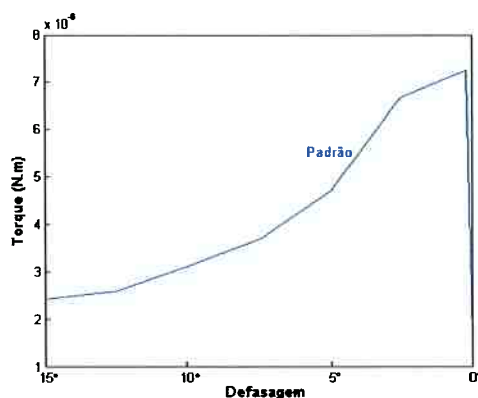


Figura 125 - Curva de torque desenvolvido no modelo padrão do quarto modelo de MEF.

A curva de torque mostrada na Figura 125 apresenta um perfil similar à curva de torque do terceiro modelo simulado (vide Figura 91), apresentado um torque máximo nas proximidades do alinhamento total. Vale ressaltar que, nessa curva de torque mostrada na Figura 125, há um aumento do torque de forma mais gradativa que no modelo anterior, o que pode representar na prática uma diminuição da vibração do rotor durante o funcionamento do micromotor. Também é importante observar que no alinhamento total (0° de defasagem) existe um valor residual do torque, ou seja, diferente dos outros modelos, o torque apresenta um valor significativo (embora seja pequeno) mesmo na situação de alinhamento total. Isso acontece devido ao fato de que o campo elétrico ao redor dos dois pólos adjacentes ativos (mostrados na Figura 123) permanece com a mesma intensidade e direção durante todo *switching*, alterando apenas a região de imersão do dente do rotor nesse campo elétrico. Dessa forma, mesmo no alinhamento máximo, o dente continua imerso nesse campo elétrico, mas na região do campo elétrico no plano de rotor (mostrado na Figura 85), que se sobrepõe ao plano do estator nessa geometria de micromotor.

Analisando a força axial que pode resultar em atrito na superfície da base do rotor, observa-se que o perfil dessa mesma força no modelo anterior (vide Figura 92) deixa de ser linear e crescente para ser quadrático e decrescente, como mostra a Figura 126. Isso acontece porque o dente do rotor, durante o *switching*, se afasta da região angular de campo elétrico significativo (mostrado na Figura 76), diminuindo, portanto, a força axial.

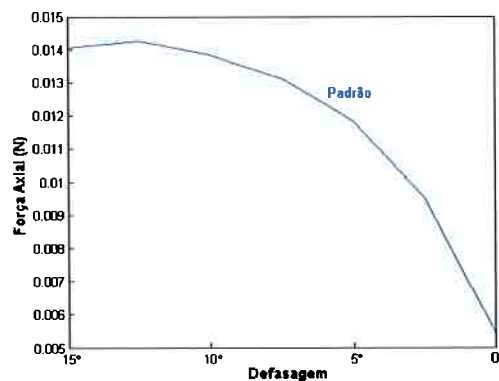


Figura 126 - Curva padrão da força axial para o quarto modelo de MEF.

Comparando o torque desenvolvido e a força axial desse novo modelo com o modelo anterior, como é mostrado na Figura 127 abaixo, observa-se que o terceiro modelo apresenta torque superior, sendo o torque inicial aproximadamente 5 vezes superior. Quanto à força axial, observa-se que o terceiro modelo apresenta valores muito superiores com relação ao quarto modelo, o que, como será visto mais adiante, viabilizará o acionamento elétrico que determina esse quarto modelo de MEF.

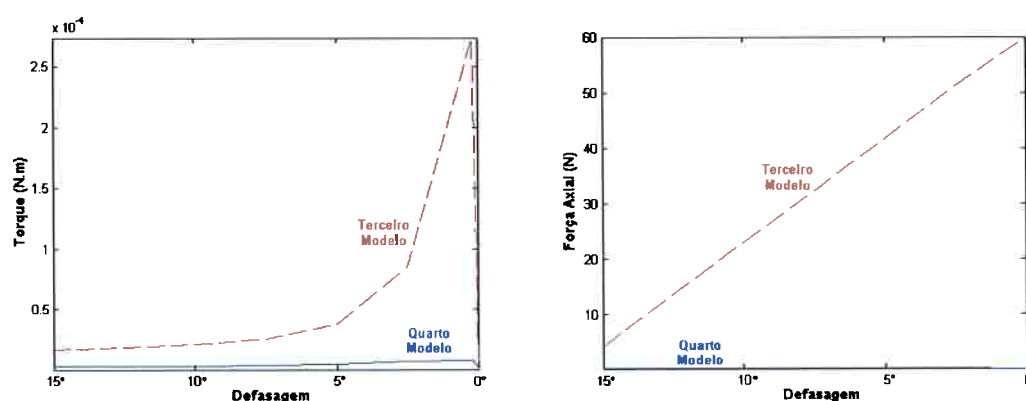


Figura 127 - Comparação do torque e da força axial entre o terceiro e o quarto modelos de MEF.

Dessa forma, como é feito na Figura 128, também é importante comparar a curva de torque desse quarto modelo com o segundo modelo (vide seção 6.2), visto que ambos os modelos apresentam o mesmo acionamento (com o rotor com potencial elétrico flutuante).

Comparando os dois modelos, observa-se que o torque desenvolvido do quarto modelo é superior ao do segundo modelo, de forma análoga ao que pode se observar na Figura 91, que compara o primeiro e o terceiro modelos de MEF.

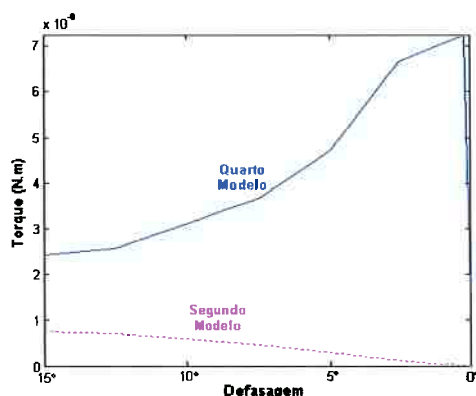


Figura 128 - Comparação do torque entre o segundo e o quarto modelos de MEF.

Prosseguindo com a análise dos da influência dos parâmetros de projeto no torque desenvolvido, primeiramente, deve-se analisar a influência do raio do rotor. Para isso, o valor do torque inicial do micromotor (na defasagem máxima de 15°) foi obtido através da simulação de vários modelos com valores diferentes de raio do rotor, o que é mostrado na Figura 129 a seguir.

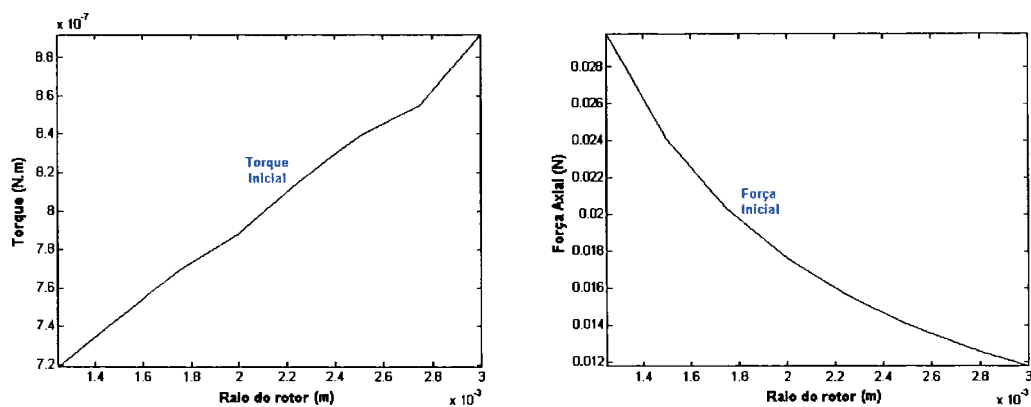


Figura 129 - Influência do raio do rotor no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.

A Figura 129 mostra que o aumento do raio do rotor provoca o aumento no torque desenvolvido de uma forma aproximadamente linear. Essa relação é similar à curva obtida na Figura 73 (que representa a influência do raio do rotor no torque do segundo modelo). Assim, constata-se que a influência do braço de momento apresenta

maior influência no cálculo do torque desenvolvido que a diminuição do campo elétrico, que é resultado, por sua vez, do aumento da distância absoluta entre os pólos do estator (como já foi mencionado na seção 6.3).

Para a mesma análise, a Figura 129 também mostra a variação da força axial inicial desse quarto modelo de MEF. Observa-se que, nesse caso, o valor da força axial diminui com o aumento do raio do rotor de forma quadrática, uma vez que esse aumento do raio provoca o aumento da distância absoluta entre os pólos do estator (o que provoca a diminuição do campo elétrico).

Realizando a análise da influência do *gap* entre rotor e estator no torque desenvolvido, obteve-se a Figura 130 a seguir.

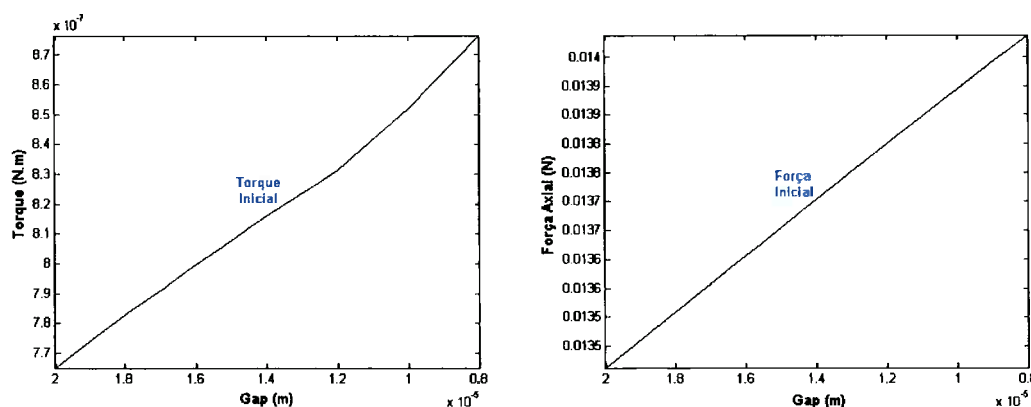


Figura 130 - Influência do *gap* entre rotor e estator no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.

Na Figura 130 pode-se observar que tanto o torque desenvolvido quanto a força axial aumentam com a diminuição do valor do *gap* entre rotor e estator, devido à proximidade e à imersão do rotor no campo elétrico gerado entre os pólos ativos do estator com a diminuição do *gap* (da mesma forma que ocorre na Figura 74 do segundo modelo – que apresenta mesmo acionamento elétrico que este quarto modelo e, portanto, está sujeito a fenômenos similares).

Realizando a análise da influência da largura do conjunto dente/pólo, obtiveram-se os gráficos mostrados na Figura 131 para o torque desenvolvido e para a força axial.

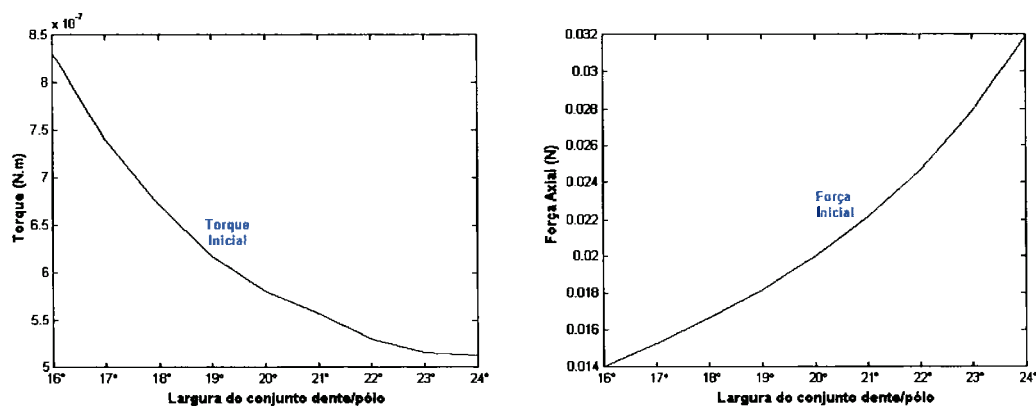


Figura 131 - Influência da largura do conjunto dente/pólo no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.

A Figura 131 acima mostra que o aumento da largura do conjunto dente/pólo para esse quarto modelo diminui o valor do torque desenvolvido e aumenta a força axial, ambos de forma quadrática. Para explicar esse comportamento, deve-se atentar a dois fatores que influem nessa resposta e que também influenciaram nas análises anteriores. O primeiro fator é a diminuição da área angular de campo elétrico significativo (mostrado na Figura 76). Uma vez que a força elétrica tangencial nesse quarto modelo (que apresenta o rotor imerso dentro de um campo elétrico formado pelos pólos do estator) é proporcional região do rotor em contato com esse campo elétrico, a diminuição em valores absolutos da área entre os dois pólos (com o aumento de sua largura) resulta na diminuição da força elétrica tangencial e, conseqüentemente, na queda do torque. Já o segundo fator a ser considerado indica que essa mesma diminuição da área entre os dois pólos resulta na proximidade física em valores absolutos da parede lateral dos pólos, o que, por sua vez, ocasiona o aumento do campo elétrico nessa região. Dessa forma, através da Figura 131, conclui-se que esse segundo fator é preponderante para o aumento da força axial no rotor.

Prosseguindo com a análise da influência da espessura do estator no torque desenvolvido e na força axial, constatou-se que a variação desses parâmetros de projeto não influenciam significativamente no torque nem na força axial. Esse resultado indica que a variação da espessura do estator não influi significativamente no campo elétrico que se forma no plano do rotor (mostrado na Figura 85).

Analisando a influência da espessura do rotor, obteve-se a Figura 132 a seguir que mostra que o aumento da espessura do rotor causa o aumento do torque desenvolvido, uma vez que é aumentada a área da parede lateral do dente do rotor, que, por sua vez, aumenta a região de aproveitamento do campo elétrico gerado nos pólos do estator. Quanto a sua influência na força axial, não foi constatada nenhuma modificação significativa no seu valor.

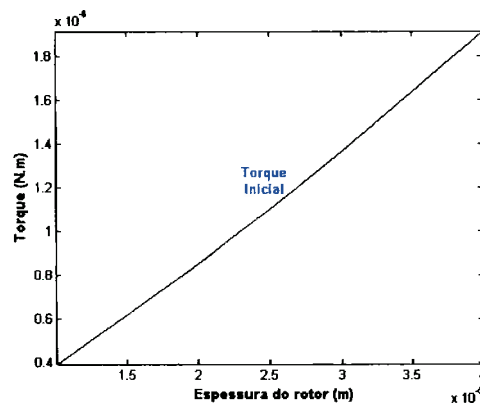


Figura 132 - Influência da espessura do rotor no torque desenvolvido.

A Figura 133 a seguir mostra a análise da variação da voltagem elétrica no torque e na força axial. Como se pode observar, o aumento da voltagem aplicada no micromotor causa o aumento do torque e da força axial, ambos de forma quadrática, como foi observado também nos modelos anteriores.

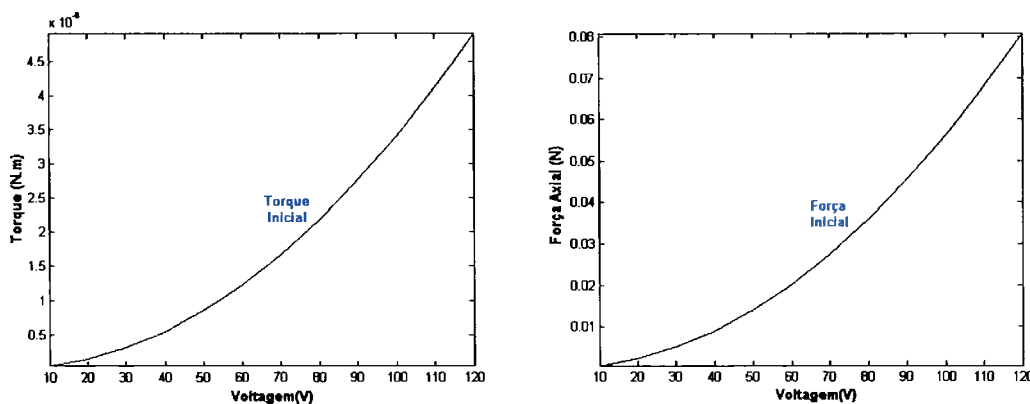


Figura 133 - Influência da voltagem elétrica aplicada no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para quarto modelo.

Como é mostrado na Figura 134 a seguir, é preciso analisar a influência do comprimento de superposição desse modelo de micromotor, como foi feito para o modelo anterior.

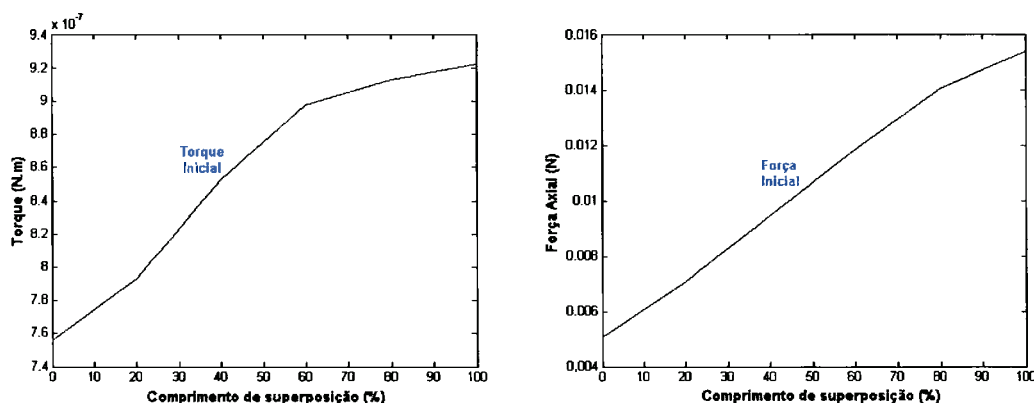


Figura 134 - Influência do comprimento de superposição no torque desenvolvido, à esquerda, e na força axial, à direita, para o quarto modelo.

Como se pode observar na Figura 134, o aumento do comprimento de superposição causa o aumento do torque desenvolvido (de forma aproximadamente quadrática) e da força axial (de forma aproximadamente linear). Tendo em vista que o aumento do comprimento de superposição aumenta a área de superposição entre o dente do rotor e o pólo do estator, o aumento desse valor implica no aumento da área do rotor que se encontra superposta ao campo elétrico significativo (mostrado na Figura 123). Observa-se também que, enquanto que no modelo anterior (vide Figura 115) há um grande aumento do valor do torque quando o comprimento passa de 80% a 100%, nesse quarto modelo de MEF a diferença do valor do torque entre 80% e 100% é relativamente pequena.

Por fim, para analisar o atrito nesse quarto modelo de micromotor, é preciso observar primeiro o comportamento das forças normal e tangencial durante o *switching*, como é mostrado na Figura 135 a seguir.

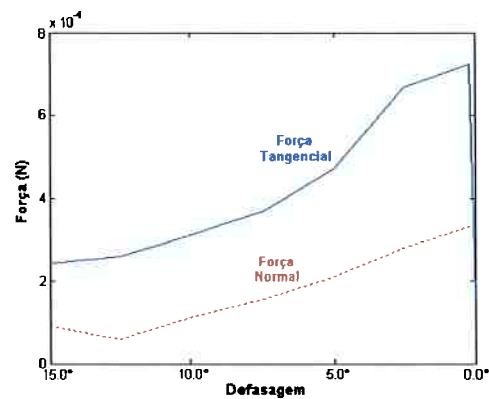


Figura 135 - Forças tangencial e normal do quarto modelo (com 80% de superposição).

Na Figura 135, pode-se observar que, diferente de todos os modelos anteriores, a força normal se mantém menor que a força tangencial durante todo *switching*. Isso significa que dentre todos os modelos, esse quarto modelo é o que menos desgasta o eixo do rotor. Para confirmar isso, é necessário levantar a curva do coeficiente de atrito permitido, como foi feito para os modelos anteriores.

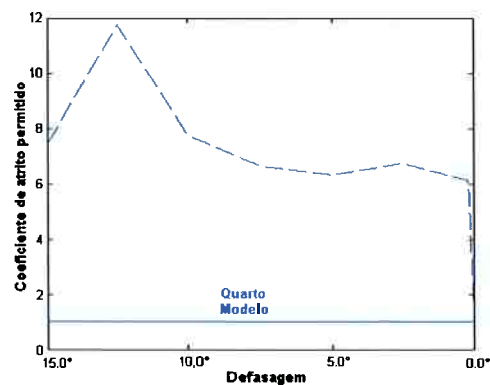


Figura 136 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido no eixo do rotor.

A Figura 136 mostra que o coeficiente de atrito permitido calculado pela eq.(29) é superior ao valor unitário (que determina o valor máximo de um coeficiente de atrito fisicamente possível para a interface eixo e rotor) durante todo *switching*. Esse mesmo comportamento pode ser observado em todos os outros comprimentos de superposição,

o que significa que, para esse quarto modelo de micromotor, não há risco de o micromotor não funcionar pro causa do atrito no eixo.

A Figura 137 a seguir mostra o coeficiente de atrito permitido para a superfície entre rotor e estator (na superfície inferior do rotor), calculada a partir da eq.(27), como foi feito para o modelo anterior. Comparando essa curva do coeficiente de atrito permitido com a curva obtida para o modelo anterior (mostrado na Figura 119), observa-se que, para esse quarto modelo, o coeficiente permitido é bem maior que para o modelo anterior, o que significa que o atrito é menor.

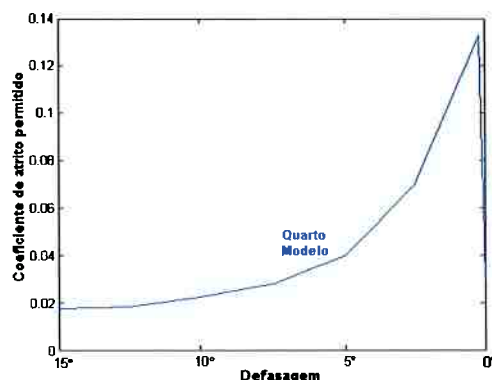


Figura 137 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido na superfície inferior do rotor.

Por fim, uma vez concluídas as análises dos parâmetros de projeto para esse quarto modelo, da mesma forma que foi feito para o modelo anterior, é necessário resumir os resultados obtidos nessa seção em duas tabelas, uma considerando o aumento do torque desenvolvido (Tabela 13) e outra considerando o aumento da força axial (Tabela 14).

Análise	Aumento do Torque	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Aumentar	Linear	$c1 = 9.5e-5; c2 = 6.0e-7$
Gap entre Rotor e Estator	Diminuir	Linear	$c1 = -9.0e-3; c2 = 9.4e-7$
Largura do Conjunto dente/pólo	Diminuir	Quadrática	$p1 = 5.7e-9; p2 = -2.6e-7; p3 = 3.6e-6$
Espessura do Estator	(torque constante)	-	-
Espessura do Rotor	Aumentar	Linear	$c1 = 5.1e-2; c2 = -1.4e-7$
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 3.4e-10; p2 = -4.2e-14; p3 = -1.0e-12$
Comprimento de Superposição	Aumentar	Quadrática	$p1 = -2.3e-11; p2 = 4.4e-9; p3 = 7.1e-7$

Tabela 13 - Resumo dos resultados de torque desenvolvido para o terceiro modelo.

Análise	Aumento da Força Axial	Relação	Coefficientes das curvas
Raio do Rotor	Diminuir	Quadrática	$p1 = 5.5e3; p2 = -3.3e1; p3 = 6.2e-2$
Gap entre Rotor e Estator	(força constante)	-	-
Largura do Conjunto dente/pólo	Aumentar	Quadrática	$p1 = 1.9e-4; p2 = -5.3e-3; p3 = 5.1e-2$
Espessura do Estator	(força constante)	-	-
Espessura do Rotor	(força constante)	-	-
Voltagem Aplicada	Aumentar	Quadrática	$p1 = 5.6e-6; p2 = 9.9e-10; p3 = 1.1e-8$
Comprimento de Superposição	Aumentar	Linear	$c1 = 1.1e-4; c2 = 5.1e-3$

Tabela 14 - Resumo dos resultados de força axial para o terceiro modelo.

Comparando os resultados de torque entre esse quarto modelo e o terceiro modelo, ou seja, comparando a Tabela 13 e Tabela 11, observa-se que muitas análises que apresentavam comportamento quadrático no terceiro modelo passou a ter comportamento linear para o quarto modelo. Também é possível observar que os coeficientes que definem a variação do torque diminuíram, o que significa que a influência dos parâmetros nesse quarto modelo tem menor impacto que no terceiro modelo. Essas mesmas conclusões já foram apresentadas no final da seção 6.2, quando foram comparados o primeiro e o segundo modelos, ou seja, quando foram comparadas a Tabela 8 e a Tabela 9. Essa diminuição da influência das análises também foi observada para os resultados relativos à força axial, comparando a Tabela 12 e a Tabela 14.

Para esse quarto modelo, diferente do modelo anterior, o aumento na voltagem elétrica aplicada é o fator que mais influencia no torque desenvolvido e também na força axial. Vale ressaltar também que, diferentemente do modelo anterior, a diminuição da largura do conjunto dente/pólo causa um aumento no torque desenvolvido.

6.5. Conclusões Finais

Para concluir esse capítulo de simulações computacionais, faz-se necessário revisar os resultados obtidos e analisar como estes podem influenciar no projeto, na fabricação e no funcionamento de micromotores.

Analisando os resultados obtidos para o primeiro modelo de MEF do micromotor estudado (vide seção 6.1), constata-se que o projeto de um micromotor eletrostático que visa maximizar seu torque deve buscar o aumento do valor da largura do conjunto pólo/dente (limitado apenas pela possível descaracterização da geometria do motor para valores muito altos, como, por exemplo, maiores de 25°) e o aumento da voltagem aplicada (limitada apenas pela possível quebra da resistência dielétrica do ar, correndo o risco da formação de arco elétrico entre componentes do micromotor, dependendo de altos valores de potencial elétrico e pequenas dimensões que os separam).

Para o primeiro modelo, a diminuição do *gap* também influencia positivamente no torque, entretanto, pequenos valores do *gap* podem ser limitados pela resolução das máscaras usadas no processo de microfabricação. O aumento da espessura também influencia positivamente no torque, no entanto, pode aumentar o peso do rotor e, dessa forma, é necessário conduzir testes experimentais para se conhecer a influência do peso (e de seu conseqüente aumento no atrito entre rotor e substrato) na micro-escala desses micromotores antes de se tirar qualquer conclusão. Por fim, embora o aumento do raio indique o aumento do torque do micromotor, deve-se considerar também que o aumento do raio não apenas aumenta a área de contato entre rotor e substrato (para esse modelo de micromotor), como também ocasiona uma pequena diminuição dos valores das forças eletrostáticas no dente do rotor. Esses dois fatores podem prejudicar o início do funcionamento do micromotor, quando há a necessidade das forças eletrostáticas no rotor vencerem as forças de atrito estático.

Analisando o segundo modelo de MEF simulado (vide seção 6.2), constata-se, como no primeiro modelo, a mesma questão do aumento do raio do rotor aumentar o torque desenvolvido, mas também prejudicar possivelmente o funcionamento do micromotor. Também se constata que, como no modelo anterior, o aumento da espessura, o aumento da voltagem elétrica e a diminuição do *gap* proporcionam maiores valores de torque (todos sujeitos ao questionamento levantado anteriormente).

Diferentemente do primeiro, nesse segundo modelo observa-se que a largura do conjunto dente/pólo deve estar entre 18° e 22° e devem-se projetar os pólos do estator usando valores pequenos para sua altura a fim de se maximizar o torque desenvolvido.

Também se deve observar que o torque desenvolvido nesse segundo modelo é aproximadamente 10 vezes menor que o torque do primeiro modelo. Embora isso possa significar uma desvantagem em relação ao primeiro modelo, deve-se também ponderar o fato de que esse segundo modelo apresenta menor atrito com o eixo do rotor e apresenta também um processo de fabricação mais simples, uma vez que seu rotor tem potencial elétrico flutuante e o primeiro modelo necessita da construção de uma trilha elétrica para aplicar potencial elétrico no eixo e no rotor.

O terceiro modelo (vide seção 6.3) visa aumentar ainda mais o perfil de torque em relação ao primeiro modelo, no entanto, apresenta apenas um torque aproximadamente duas vezes superior ao torque do primeiro modelo ao custo de um processo de fabricação mais complexo e elaborado, uma vez que a superposição do rotor sobre o estator se dá apenas pela construção de uma estrutura de *bushing* na base do próprio rotor ou a aplicação de uma camada de material isolante sobre o estator, que define a espessura do *gap* e o atrito com o rotor.

Da mesma forma que foi visto nos modelos anteriores, o aumento do raio do rotor também ocasiona o aumento do torque (considerando as desvantagens no funcionamento inicial do micromotor, como discutido). Entretanto, esse modelo apresenta uma região de mínimo torque na variação do raio do rotor. Devido a esse fato, é necessário fazer novas análises da variação do raio do rotor para o projeto de micromotores com dimensões diferentes das estudadas nesse trabalho. Caso sejam adotadas as mesmas dimensões simuladas nesse trabalho, como indica a Tabela 11, deve-se evitar os valores entre 1,2mm e 1,8mm para o raio do rotor.

Com exceção da variação do *gap* (que demonstrou ter pouca influência significativa no valor do torque) os outros parâmetros demonstraram que valores superiores aos que foram simulados (vide Tabela 10) apresentam maior torque desenvolvido. Para as análises desses parâmetros, vale mencionar que o aumento da espessura do rotor não deve causar aumento no atrito na base do rotor, uma vez que a força axial apresenta valores mais elevados que o peso do rotor. Também é importante mencionar que, além de possíveis dificuldades de fabricação, não há limitação teórica para a espessura do estator e do rotor, uma vez que a variação desses parâmetros não influencia no aumento da força axial.

Também vale destacar que os modelos com 100% de comprimento de superposição apresentaram grande aumento no torque desenvolvido (em relação aos demais comprimentos de superposição simulados), o que indica que é o modelo que apresenta maior torque de todos os modelos simulados nesse capítulo.

Com relação à força axial, o único parâmetro que apresenta diminuição do valor dessa força é o aumento do *gap*, o que indica que a utilização de valores maiores de *gap* facilitaria o funcionamento do micromotor, uma vez que ajudariam a diminuir o valor elevado das forças axiais.

No entanto, o fator que apresenta maior desvantagem para esse terceiro modelo de micromotor é o atrito na base do rotor que apresenta valores muito pequenos para o coeficiente de atrito permitido. Esses baixos valores podem inviabilizar a construção desse modelo de micromotor, uma vez que a força eletrostática na direção axial entre rotor e estator é muito elevada.

Por fim, analisando o quarto modelo (vide seção 6.4), observa-se que seu torque inicial é 10 vezes inferior ao torque inicial do terceiro modelo (da mesma forma que o torque do segundo modelo é 10 inferior ao torque do primeiro modelo). Apesar dessa desvantagem, esse quarto modelo apresenta menor força axial (o que significa que apresenta menor atrito na base do rotor, facilitando seu funcionamento) e maior facilidade de fabricação, uma vez que (como o segundo modelo) seu rotor tem potencial elétrico flutuante.

Nesse quarto modelo, o aumento do raio do rotor demonstra influir positivamente no torque desenvolvido, embora também haja a questão, já discutida nessa seção, do problema de funcionamento inicial por causa da diminuição das forças eletrostáticas com o aumento do raio do rotor. Para os demais parâmetros, observa-se que o aumento de seus valores ajudam a maximizar o torque do micromotor, com exceção do *gap* e da largura do conjunto dente/pólo. Para esses dois parâmetros, os resultados na seção 6.4 mostram que a diminuição de seus valores favorecem o funcionamento do micromotor não apenas no aumento do torque desenvolvido, mas também na diminuição da força axial (que é o caso da largura do conjunto dente/pólo) ou na sua não-variação (que é o caso do *gap*). Também é importante salientar que a diminuição da largura do conjunto dente/pólo pode ser limitada de acordo com o processo de fabricação desse modelo. Caso seja adotado que o *gap* entre estator e rotor

(para essa geometria de micromotor) seja definido por uma camada de isolante elétrico sobre o estator, há um limite de 16° para a largura dos dentes e dos pólos, pois abaixo desse valor há o risco de não haver apoio que sustente o dente do rotor para o caso de desalinhamento máximo, quando o dente do rotor está exatamente entre dois pólos do estator, sem haver superposição angular que sustente o dente do rotor, para que este não entre dentro do “vale” entre os dois pólos.

Observa-se também que para esse modelo não há grande diferença no torque desenvolvido entre modelos com comprimento de superposição de 80% e 100%. Dessa forma, dada a relação aproximadamente linear entre comprimento de superposição e força axial, o modelo com 100% de superposição apresenta atrito maior na base do rotor, que desfavorece a escolha desse modelo com relação a modelos com menor superposição (diferente do que acontece com o terceiro modelo, como discutido anteriormente).

7. RESULTADOS DA MICROFABRICAÇÃO

Esse capítulo é dedicado aos resultados da microfabricação dos protótipos de micromotores eletrostáticos desse projeto, desde os desenhos das máscaras para fabricação até os resultados experimentais dos protótipos fabricados.

7.1. Projeto dos protótipos e desenho de máscaras da fotolitografia

Para o projeto dos protótipos de micromotores e desenhos das máscaras desse trabalho, foram levados em consideração as técnicas de fabricação apresentadas capítulo 4 e disponíveis no LNLS, as dimensões de micromotores estudados na literatura (como também foi mostrado no capítulo 4) e as conclusões obtidas no capítulo anterior baseadas na simulação computacional de um modelo de MEF de um micromotor.

Dessa forma, foi criado o seguinte esquema para se desenhar as máscaras dos micromotores de forma rápida e sistematizada:

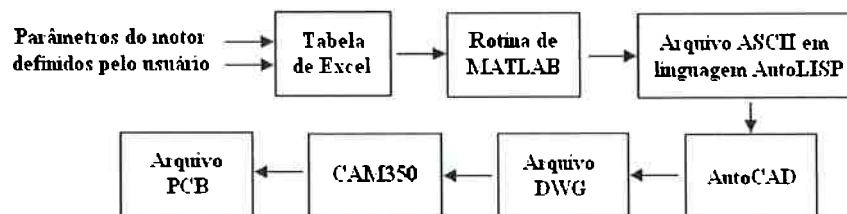


Figura 138 - Esquema de construção dos desenhos das máscaras.

Na tabela de Excel mostrada no esquema acima, encontram-se os parâmetros que definem a geometria dos protótipos de micromotores desse projeto. Essa tabela é apresentada no Anexo D.

Nessa tabela definem-se as principais dimensões dos protótipos de micromotores que são: raio externo do estator, altura e largura dos pólos do estator, raio do rotor, altura e largura dos dentes do rotor, *gap*, diâmetro do eixo do motor e folga do eixo (*clearance*).

Como pode ser visto no Anexo D, os seguintes valores dos parâmetros do micromotor são arranjados de forma a se obter 64 modelos diferentes de protótipos de micro motores:

Parâmetro	Valores
Raio externo	750, 700, 500 e 450 μm
Altura do pólo do estator	250, 200, 150 e 100 μm
Largura do pólo do estator	25, 20 e 15°
Raio do rotor	600, 550, 500, 450, 400, 350 e 300 μm
Altura do dente do rotor	250, 200, 150 e 100 μm
Largura do dente do rotor	30, 25, 20 e 15°
<i>Gap</i>	4 e 8 μm

Tabela 15 - Variação dos valores dos parâmetros dos protótipos.

Esses modelos, juntamente com mais 16 modelos especiais (ver Anexo D) totalizam 80 modelos diferentes de montagem dos protótipos dos micromotores desse trabalho.

A tabela, que está no Anexo D, também apresenta uma nomenclatura para cada tipo de estator e para cada tipo de rotor projetado e desenhado, totalizando 51 tipos diferentes de rotores e 12 tipos diferentes de estatores.

Como mostra a Figura 138, essa tabela é interpretada por uma rotina de MATLAB que gera um arquivo escrito em linguagem AutoLISP (linguagem usada para se desenhar no AutoCAD a partir de comandos em ASCII). Dessa forma, podem-se obter todos os 51 desenhos de rotores e 12 de estatores de forma rápida e sistematizada, atendendo a qualquer modificação dos parâmetros de projeto. Esse método foi empregado, pois houve várias tentativas e mudanças na determinação desses parâmetros através de uma interação com o engenheiro do LNLS para se certificar que os protótipos desenhados estivessem dentro das possibilidades de fabricação do Laboratório de Microfabricação do LNLS. Essa rotina de MATLAB encontra-se no Anexo E.

Como descreve a Figura 138, em seguida esse arquivo de saída da rotina de MATLAB é interpretado pelo próprio AutoCAD gerando o desenho final dos protótipos. Esse desenho é rearranjado e salvo em um arquivo DWG (extensão do AutoCAD), que por sua vez é interpretado pelo software CAM350 (disponível no

departamento). Esse é o software de CAD usado pela empresa que faz as máscaras (Fotolitos Milani Ltda. ou CCS de Campinas) a partir de um arquivo PCB (extensão própria do CAM350).

Dessa forma, as máscaras dos rotores e dos conjuntos eixo/estator são desenhadas. Já as máscaras das trilhas são desenhadas diretamente no AutoCAD. Uma vez que há grande variação nos parâmetros do micromotor, principalmente do raio externo, é necessário que haja 2 tipos diferentes de trilhas.

Os protótipos desse projeto têm por objetivo principal simplesmente seu funcionamento. Para isso seus parâmetros foram escolhidos de forma a termos a maior resposta de torque, da forma que foi mostrado capítulo anterior. Outro aspecto importante de se considerar é o atrito do rotor na sua base, ou seja, em contato com a superfície do substrato. Como não foram encontradas informações e técnicas na literatura que levassem a predição dessas forças de atrito, a melhor solução encontrada foi a opção de se construir nos protótipos um componente muito comum na literatura para reduzir o contato do rotor com sua base, chamado *bushing*.

Em muitos casos na literatura (FRANGOULT, 1994), a adição desse novo componente gera a necessidade de uma nova máscara, entretanto, isso aumenta a complexidade da fabricação e montagem dos protótipos. Dessa forma, foi decidido nesse projeto fabricar o *bushing* juntamente com a trilha, visto que esses não apresentam contato que possa prejudicar a parte elétrica do micromotor e visto que a altura da trilha (10 μm) é suficientemente pequena de forma a possibilitar a adição desse componente sem prejudicar a rotação do rotor, ajudando este a ter menos contato na sua base e, portanto, menos atrito que possa prejudicar seu funcionamento. Assim, são desenhados 4 tipos diferentes de máscaras para as trilhas: os dois que já mencionados anteriormente e mais dois que contam com a adição do *bushing*. Mas como pode ser visto no Anexo D, o *bushing* só pode ser usado para alguns casos, pois seu posicionamento depende do tamanho e das dimensões do rotor.

As figuras abaixo mostram o desenho final dos modelos de trilhas, rotores e estatores dos protótipos de micromotores fabricados nesse projeto. A Figura 139 a seguir mostra os 51 tipos de rotores propostos nesse projeto, descritos no Anexo D.

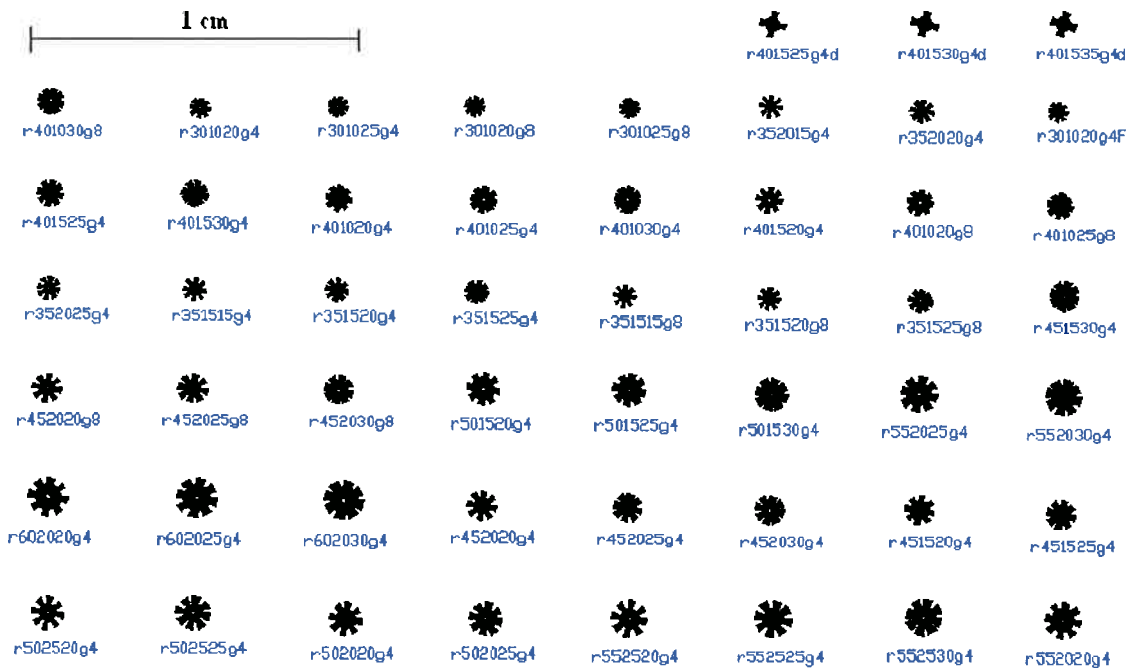


Figura 139 - Desenho dos 51 tipos diferentes de rotores propostos nesse projeto.

A Figura 140 abaixo mostra os 12 conjuntos eixo/estator descritos no Anexo D.

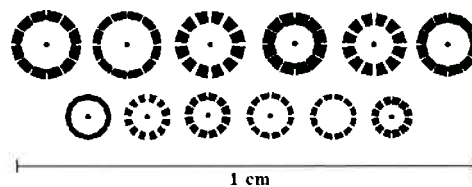


Figura 140 - Desenho dos 12 tipos diferentes de conjuntos eixo/estator propostos nesse projeto.

A Figura 141 a seguir mostra a máscara das trilhas com os 4 tipos de trilhas mencionadas anteriormente. Note que as duas trilhas da direita apresentam no seu centro as micro-estruturas de *bushing*.

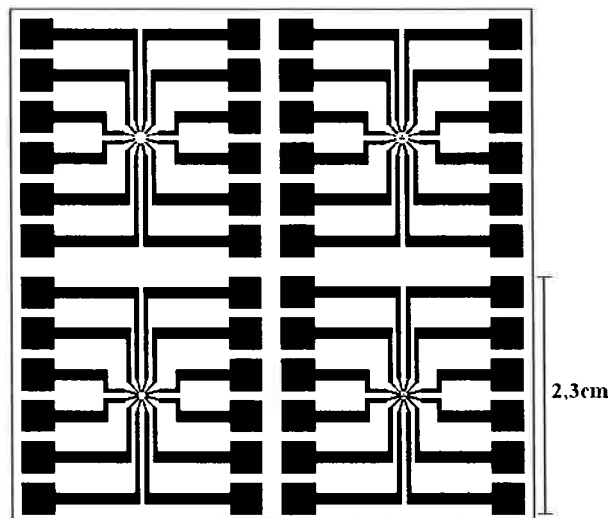


Figura 141 - Desenho da máscara das trilhas de circuito elétrico dos protótipos desse projeto.

7.2. Fabricação dos protótipos de micromotor

O processo de microfabricação dos protótipos de micromotores propostos por esse projeto foram realizados no Laboratório de Microfabricação do LNLS, como já abordado. Esse processo seguiu as etapas mostradas no capítulo de introdução.

Nesse item, são apresentados detalhes e características da prática da fabricação e alguns problemas (e suas respectivas soluções) que ocorreram durante o processo de fabricação dos protótipos.

Como já mencionado na introdução, uma das primeiras etapas da fabricação propriamente dita é a deposição do resiste pela técnica de fotolitografia. Esse processo é realizado nos equipamentos do LNLS mostrados na Figura 142. A foto da esquerda mostra o recipiente de deposição do resiste com o equipamento em que é feita a cura do resiste sobre a placa de substrato. Já a figura da direita é o equipamento que realiza a fotolitografia e retira parte do resiste para que este forme um molde para o crescimento da estrutura.



Figura 142 - Equipamentos usados no LNLS para deposição do molde de resiste.

Como mencionado na introdução, em seguida, a placa do substrato com o molde de resiste é usada na eletrodeposição para crescimento das estruturas metálicas do micromotor: Ouro para a trilha elétrica e Níquel para o conjunto do eixo/estator e para o rotor. Esse processo de eletrodeposição é feito nos equipamentos mostrados na Figura 143. A foto da esquerda é onde se realiza a eletrodeposição do Níquel, a foto central é onde é feita a eletrodeposição da camada de sacrifício de Cobre dos rotores e à direita é onde se realiza a eletrodeposição do Ouro para a trilha.



Figura 143 - Equipamentos usados no LNLS para eletrodeposição das estruturas metálicas do micromotor.

No processo de eletrodeposição, no crescimento das estruturas dos 51 modelos de rotores do micromotor foi usada uma corrente de 200mA para eletrodeposição, obtendo-se uma taxa de velocidade média de $0,5\mu\text{m}/\text{min}$.

Durante e ao final do processo de eletrodeposição, a integridade e o crescimento da estrutura devem ser monitorados, pois a estrutura não deve crescer acima da altura

do molde e a sua velocidade média de crescimento (obtida através desse monitoramento) nunca é conhecida com exatidão. Para esse monitoramento, são usados os equipamentos do LNLS mostrados na Figura 144. A foto da esquerda mostra o microscópio óptico usado para verificação visual da integridade da estrutura. Já a foto da direita mostra o perfilador (*surface profiler*) que mede a geometria e a altura das peças micro-fabricadas. Esse equipamento é usado inúmeras vezes durante o processo de microfabricação para monitoramento da altura de crescimento da eletrodeposição.



Figura 144 - Equipamentos usados no LNLS para monitoramento das estruturas.

Durante o monitoramento das estruturas dos rotores, observou-se que houve o descolamento de algumas partes do molde de resiste, o que mostra baixa aderência entre o resiste do molde do rotor e o Cobre da camada de sacrifício. Quando ocorre esse descolamento, o Níquel da eletrodeposição começa a crescer em regiões que deveriam estar cobertas pelo molde de resiste, formando estruturas erradas, como é o caso mostrado na Figura 145. Como pode ser observado na região superior esquerda indicada, o Níquel cresceu por baixo do resiste.

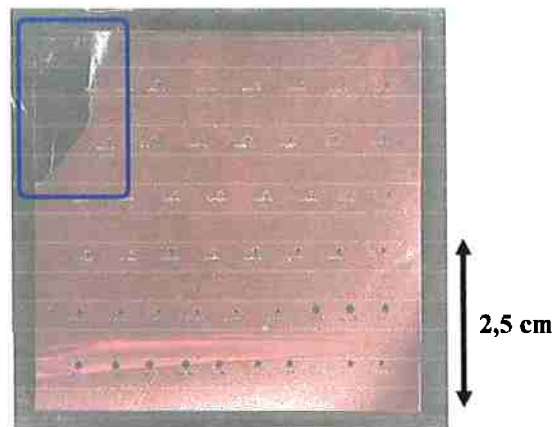


Figura 145 - Resultado de problema de descolamento do molde de resiste na placa da fabricação do rotor.

A solução para esse problema é depositar a camada de sacrifício de cobre após a deposição da camada do molde de resiste, pois a aderência do resiste é melhor na *seed layer*. Dessa forma, retomando a Figura 34 da introdução, os itens (c), (d), (e), (f) e (g) devem ser substituídos pela seqüência apresentada pela Figura 146 abaixo, seguindo a mesma lógica apresentada anteriormente.

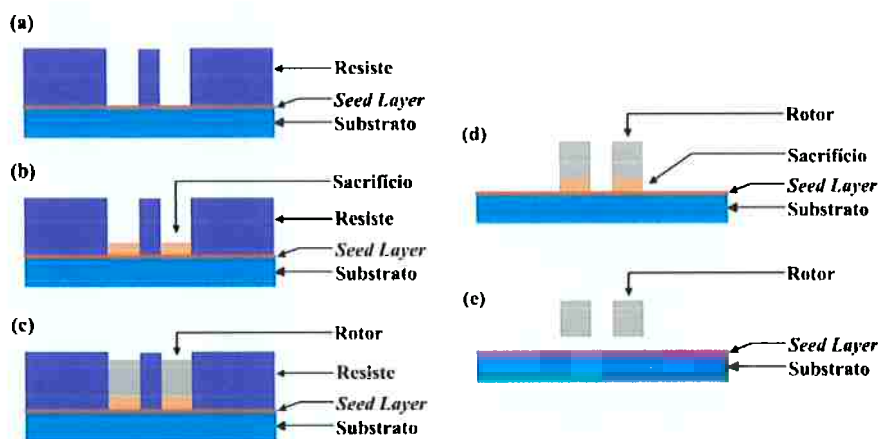


Figura 146 - Nova seqüência para microfabricação dos rotores.

A Figura 147 mostra a placa do processo de fabricação dos rotores no estágio representado pela Figura 146(d) em uma solução de HF para eliminação da camada de sacrifício e obtenção dos protótipos finalizados dos rotores. A remoção desses rotores é um processo lento de 2 a 3 dias com a ajuda periódica de um aparelho de ultra-som

para facilitar a espalhar a solução nas paredes da micro estrutura da camada se sacrificio.



Figura 147 - Foto da etapa de remoção da camada de sacrificio na nova seqüência de fabricação dos rotores.

Outro problema encontrado foi a dissolução do resiste SU-8 usado para fazer o molde no conjunto eixo/estator. Segundo *site* especializado nesse resiste (LORENZ, H. – MIMOTEC), esse é um problema comum ao próprio resiste e de grande ocorrência na literatura, tanto que, peculiarmente, é oferecido um prêmio de 6 mil dólares para quem conseguir resolver o problema de dissolução do SU-8. Esse problema acontece geralmente nas regiões estreitas das estruturas em que a substância de SU-8 fica presa à estrutura e de difícil remoção. Na fabricação dos protótipos dos estatores desse projeto, esse problema ocorreu também nas regiões entre os pólos dos estatores de grande largura, como é mostrado na Figura 148.

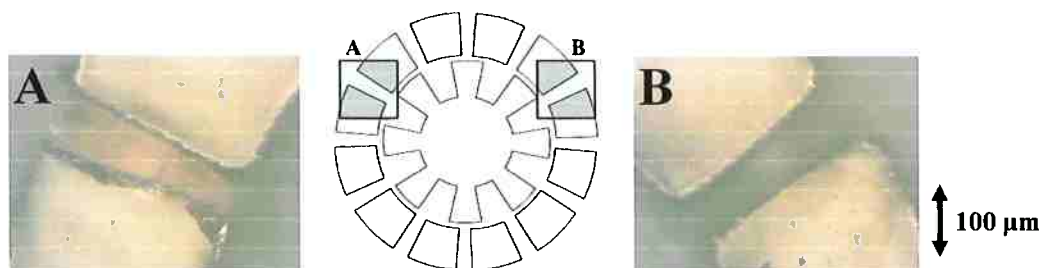


Figura 148 - Problema de dissolução do SU-8 na estrutura do estator s702025.

Como pode ser visto na Figura 148, em um mesmo protótipo de estator, temos a ocorrência desse problema do SU-8 em algumas regiões e a dissolução completa em outras, mostrando a aleatoriedade da ocorrência desse problema: no caso da região da

Figura 148A, temos o aparecimento desse problema e na região da Figura 148B, isso já não ocorre. Embora não seja muito visível na Figura 148A, na região em que o resiste não se dissolveu, a camada de ouro e titânio do *seed layer* também não foi removida (por estar encoberta pelo SU-8). Isso representa um grande problema para o protótipo, pois o trecho de *seed layer* que restou entre os pólos do estator faz o contato elétrico entre os mesmo, impedindo a aplicação de voltagem elétrica ideal.

Outro problema ocorrido foi a interferência entre o furo do eixo do rotor e o eixo da estrutura do estator. Embora tivesse sido previsto no desenho de CAD da máscara uma folga de 3 micra, foi constatado uma interferência de 4 micra. Esse problema pode ter ocorrido por causa da baixa resolução do fotolito usado ou por causa de possível crescimento irregular do resiste na placa de alumina, gerando um perfil transversal do molde de SU-8 imprevisível que diminuísse o raio do furo do eixo do rotor.

Por fim, com exceção dos problemas mencionados, as estruturas construídas se apresentaram dentro das especificações de projeto.

A Figura 149 abaixo mostra duas etapas da fabricação de um dos tipos de rotores. A primeira foto, mostra a etapa representada pela Figura 34(d), que mostra o molde de resiste do rotor. Já a segunda foto, mostra a etapa representada pela Figura 34(f), que mostra o rotor finalizado ainda preso na camada superficial e no substrato.



Figura 149 - Fabricação do protótipo de rotor r352020g4: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de Níquel.

A Figura 150 mostra duas etapas da fabricação de um dos tipos de estatores. A primeira foto, mostra a etapa representada pela Figura 31(f), que mostra o molde de resiste do estator (sobre a estrutura da trilha finalizada). Já a segunda foto, mostra a etapa representada pela Figura 31(i), que mostra o estator finalizado.

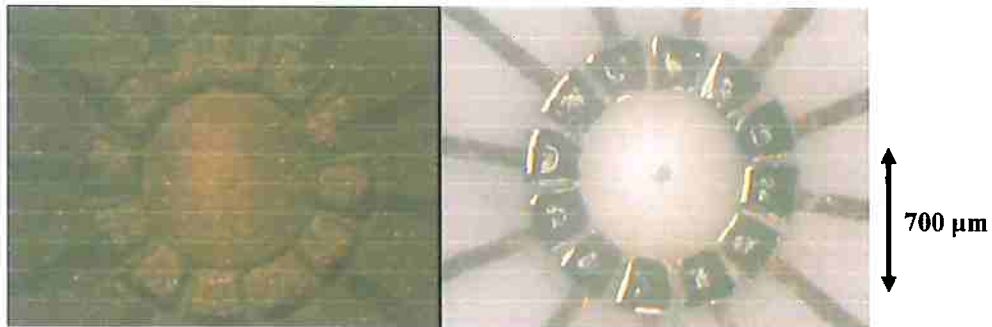


Figura 150 - Fabricação do protótipo de estator s702525: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de Níquel finalizada sobre a trilha elétrica.

Por fim, a Figura 151 mostra a placa da trilha com o conjunto eixo/estator finalizada, faltando apenas a colocação manual do rotor.

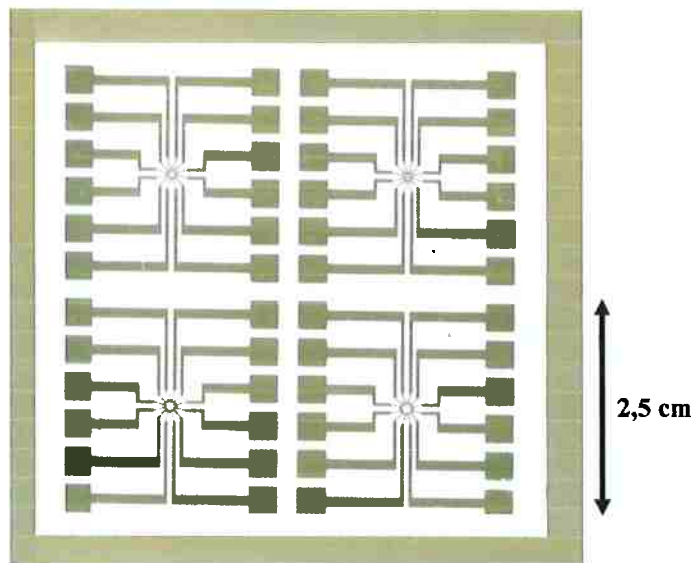


Figura 151 - Foto da placa final da estrutura do motor.

Na Figura 151 acima, devido à micro-escala dos motores, não é possível se visualizar as estruturas dos estatores e diferenciá-las. Entretanto, como já havia sido proposto, duas das quatro trilhas mostradas na figura apresentam as estruturas de *bushing* de ouro. A Figura 152 a seguir mostra essa estrutura em uma trilha do modelo t5045b e estator s501015.

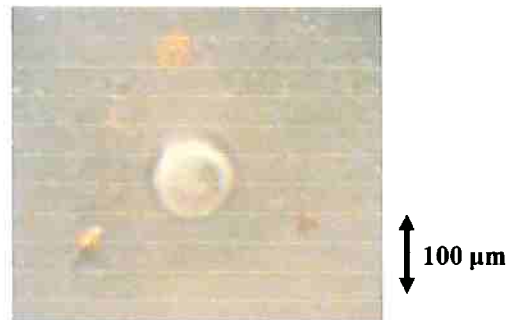


Figura 152 - Foto da estrutura do eixo e de *bushing* da trilha t5045 e do estator s501015.

Após a colocação manual do rotor na placa que contém a trilha e o conjunto eixo/estator, obtemos o micromotor finalizado, como é mostrado na Figura 153, que apresenta um estator s501020se e um rotor r401520.



Figura 153 - Foto da estrutura final do micromotor no caso de estator s501020se e rotor r401520.

Para testar a integridade geométrica dos protótipos construídos, os protótipos dos micromotores foram submetidos a um teste experimental relativamente simples: após a montagem do rotor no eixo do estator, foi usado um mini-tubo de ar para “soprar” o rotor para criar uma circulação de corrente de ar de forma a fazer o rotor girar dentro do estator. Para esse teste, se o rotor começa a girar significa que não há interferência entre o furo do rotor e o eixo, nem existe excentricidade na sua rotação a ponto de haver contato entre os dentes do rotor e os pólos do estator.

Nenhum protótipo de rotor construído conseguiu girar e satisfazer ao teste, o que indicou que havia interferência no eixo do motor para todos os modelos fabricados. Para melhor analisar o problema, foi necessário usar o microscópio eletrônico do LNLS

para melhor visualizar os detalhes de construção dos protótipos fabricados. As figuras a seguir mostram os detalhes de construção de um dos protótipos fabricados.

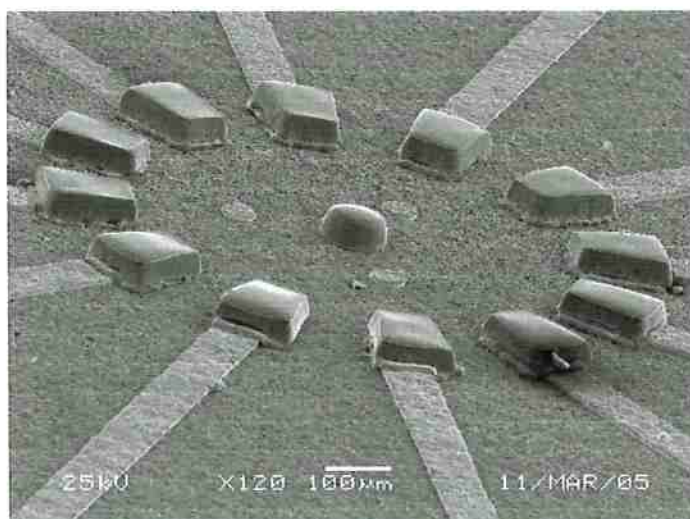


Figura 154 - Foto de microscópio eletrônico do estator s501515.

Na Figura 154, pode-se observar claramente que as estruturas dos pólos e do eixo não estão bem definidas, pois apresentam os cantos arredondados e algumas sobras de material nas suas laterais. A Figura 155 comprova esse problema de fabricação medindo uma diferença de mais de 11 μm entre o diâmetro da base do eixo e o diâmetro de sua superfície superior.

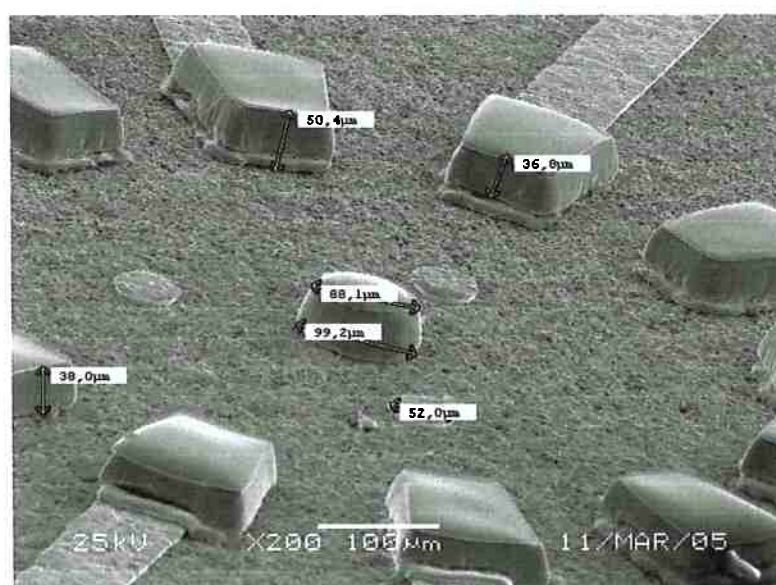


Figura 155 - Foto de microscópio eletrônico com dimensões do estator s501515.

Por fim, a Figura 156 mostra melhor os detalhes de fabricação no eixo e em um pólo, comprovando o que as figuras anteriores indicavam.

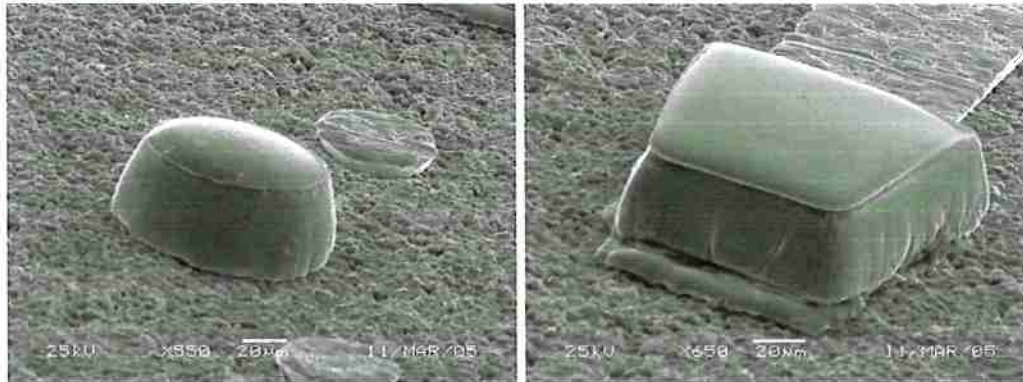


Figura 156 - Detalhes do eixo, à esquerda, e do pólo do estator, à direita.

Esses problemas de fabricação foram diagnosticados como sendo problemas com a resolução dos fotolitos usados. Portanto, para resolver esse problema (e também confirmar sua origem) foram feitos novos fotolitos usando a técnica de emulsão por fotorredução com o auxílio do CCS (Centro de Componentes Semicondutores) de Campinas. Teoricamente os novos fotolitos teriam melhor resolução e, conseqüentemente, resultariam em protótipos melhor definidos.

Os resultados obtidos comprovaram que a melhor resolução do fotolito influencia na melhor definição do protótipo, uma vez que os modelos construídos passaram no teste de circulação de corrente de ar e apresentaram melhor definição nas fotos do microscópio eletrônico, como mostram as figuras a seguir.

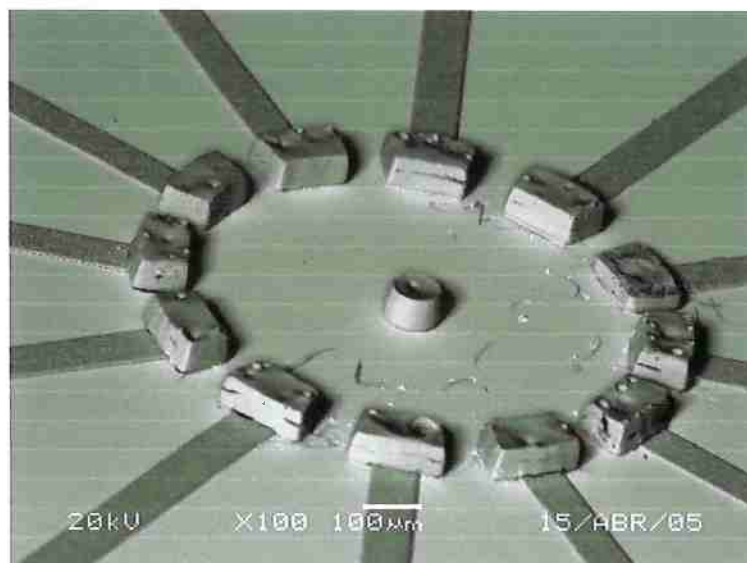


Figura 157 - Foto de microscópio eletrônico do estator s501020.



Figura 158 - Foto de microscópio eletrônico da montagem do estator s451520 e rotor r301020.



Figura 159 - Detalhes de construção do rotor r301020.

As figuras anteriores mostram que a definição das linhas de construção dos protótipos melhorou significativamente, mostrando a necessidade de fabricação dos foliolitos desses modelos de micromotores pelo processo de fotorredução.

A seguir são mostradas algumas figuras tiradas em microscópio eletrônico dos modelos finais dos protótipos fabricados.

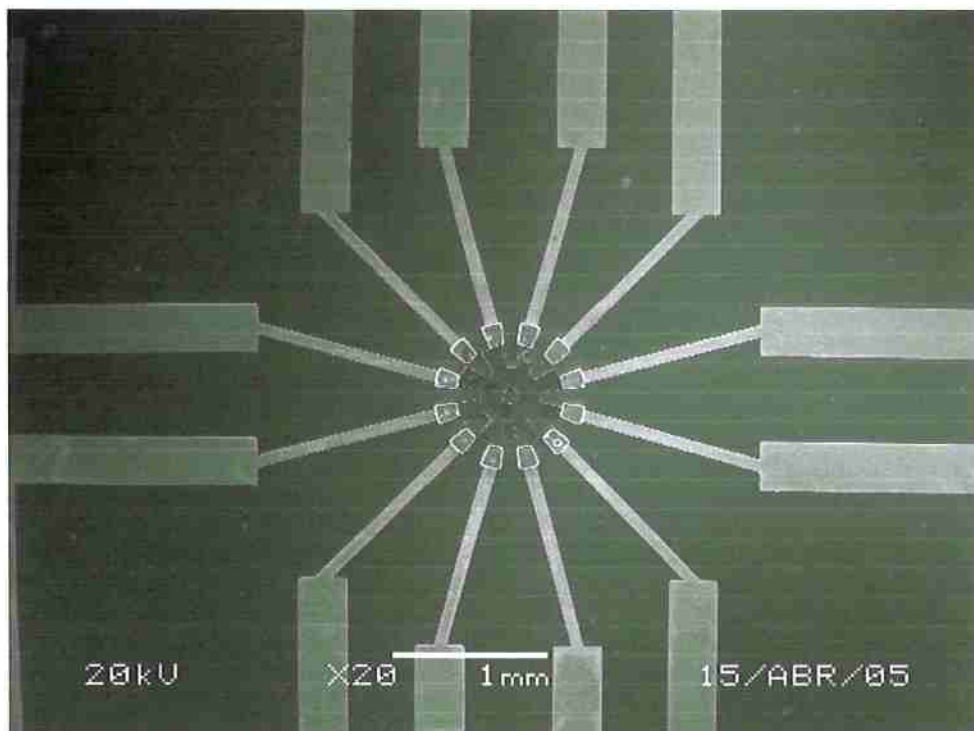


Figura 160 - Foto de microscópio eletrônico do modelo com estator s451520 e rotor r301020, sob vista superior.

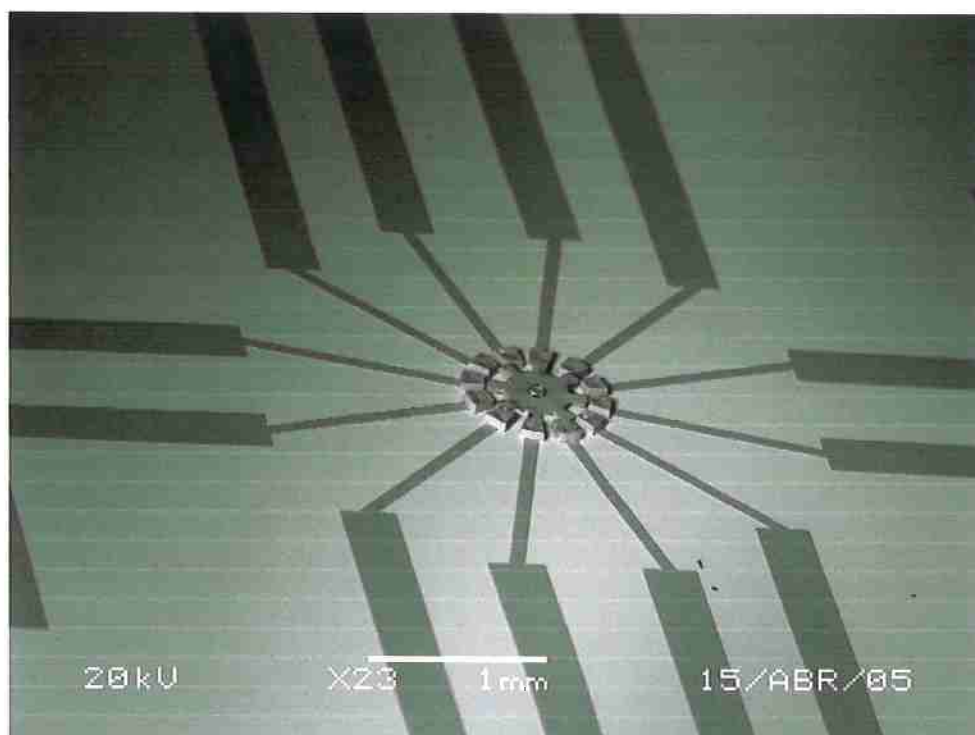


Figura 161 - Foto de microscópio eletrônico da montagem do estator s451520 e rotor r301020, sob vista diagonal.

8. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Nesse capítulo são descritos os resultados obtidos e os testes feitos com o software de otimização topológica do rotor do micromotor desenvolvido por esse projeto. Foram obtidos resultados para dois modelos de micromotor (16:4 e 12:8), usando duas malhas de finitos diferentes (um da baixa resolução e outra de alta resolução).

Inicialmente, para testar a validade dos resultados obtidos, os gradientes usados no método SIMPLX, desenvolvidos pelo método analítico no capítulo 3, foram comparados com os gradientes da função objetivo desenvolvidos através do método de diferenças finitas. Em todos os testes a diferença entre os dois gradientes não ultrapassou 2%. Isso confere confiabilidade ao cálculo dos gradientes que representam a principal entrada para a rotina SIMPLX que é a responsável pela atualização do modelo do material.

Vale destacar que os domínios de projeto usado no MOT para os casos de alta e de baixa resolução são mostrados na Figura 162 abaixo.

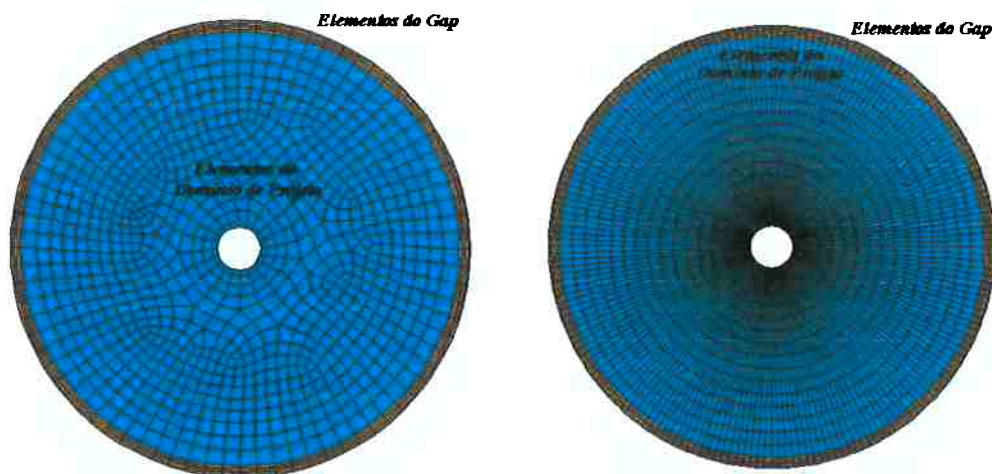


Figura 162 - Domínios de projeto discretizado para o MOT (à esquerda, de baixa resolução e, à direita, de alta resolução).

A Figura 162 mostra uma malha de elementos finitos com 908 elementos, para o modelo de baixa resolução, e uma malha de elementos finitos com 3072 elementos,

para o modelo de alta resolução, que compõem o domínio de projeto do MOT que representa a região do rotor do micromotor (região circular com 100 μm de raio externo, delimitando o raio do rotor, e 10 μm de raio interno, delimitando o furo do eixo no rotor). Na figura, essa região é representada pela cor azulada. Externo aos elementos do domínio de projeto, temos os elementos que representam o *gap* do micromotor (anel externo com 5 μm de espessura). Essa região de *gap*, que é discretizada com 400 elementos, para o modelo de baixa resolução, e com 960 elementos, para o modelo de alta resolução (dispostos de forma que a espessura do *gap* contém 5 camadas de elementos finitos para ambos os modelos da Figura 162), é representada na figura pela cor alaranjada.

A aplicação das condições de contorno de potencial elétrico ou carga elétrica, como já mencionado no capítulo 5, está apresentada no Anexo C.

A Tabela 16 mostra os parâmetros de MEF e de MOT usados para obtenção dos resultados da otimização que são apresentados logo adiante.

Parâmetros	Valores
MEF	
Permissividade ϵ_0 (C^2/Nm^2)	8,85E-09
Permissividade ϵ_r (C^2/Nm^2)	10
Potencial Elétrico (V)	10
Carga Elétrica (C)	0,00001
MOT	
Limite móvel 1	0,15
Limite móvel 2	0,10
Limite móvel 3	0,05
Expoente de penalização	2
Densidade inicial	1,00

Tabela 16 – Parâmetros usados no processo de Otimização Topológica.

A Tabela 16 mostra os valores de permissividade usados na otimização do micromotor, propriedades mencionadas no capítulo 3, na eq. (42). A tabela também mostra os valores de potencial e carga elétricos aplicados. Vale lembrar que somente é usado um tipo de aplicação de condições de contorno em cada processo de MOT (ou imposição de potenciais elétricos ao modelo, ou imposição de cargas elétricas). Entretanto, ambos os métodos resultam nos mesmos formatos de rotores otimizados, que estão apresentados logo adiante. A variação de seus valores também não influencia

o resultado final da otimização. A tabela também mostra os valores de limites móveis utilizados no processo de PLS, mostrado no capítulo 3, na Figura 26. O expoente de penalização utilizado para obtenção de resultados do MOT é igual a 2, como mostra a Tabela 16. Por fim, a tabela também define a densidade inicial utilizada (ou “chute inicial”) como igual a 1,00. Vale destacar que foi testada também a variação desse valor, no entanto, isso não alterou o resultado final da otimização.

Após alguns testes, modificações e correções no código fonte do software desenvolvido, obtiveram-se os formatos de rotor que são mostrados a seguir. Por apresentarem variação muito baixa no valor da função objetivo após 50 iterações, esses perfis de rotores são considerados otimizados. Entretanto, os métodos de otimização não asseguram que o resultado final obtido seja realmente o melhor resultado, ou seja, o valor máximo da função objetivo fornecido pelo software pode ser um máximo local da função objetivo (como é chamado na literatura) em vez de um máximo global. Essa é uma característica inerente aos métodos de otimização existentes. No entanto, há algumas maneiras de tentar forçar o método de otimização a tentar sair desse máximo local e tentar encontrar um máximo global, embora nenhum desses métodos assegure que o máximo encontrado é global. Um desses métodos, que foi usado nesse projeto, é conhecido como “Método da Continuidade”. Trata-se de usar um valor de penalização menor, como 1, nas primeiras iterações e depois usar o valor de penalização aconselhado (no caso desse projeto, como mencionado no capítulo 3, é igual a 2). Após o uso desse método, obtiveram-se os mesmos formatos de rotores, intensificando os resultados obtidos.

Outro fator que auxilia o processo de otimização que foi implementado nesse software foi um filtro para impedir problemas de “instabilidade xadrez” (ou *checkerboard*, como é conhecido na literatura internacional), como já mencionado. Para todos os resultados apresentados a seguir foi usado o filtro nas primeiras 10 iterações do programa. A Figura 163 mostra a diferença que o uso do filtro representa. Isso elimina elementos que possam se isolar dos demais no processo de otimização, resultando muitas vezes em peças de baixa qualidade.

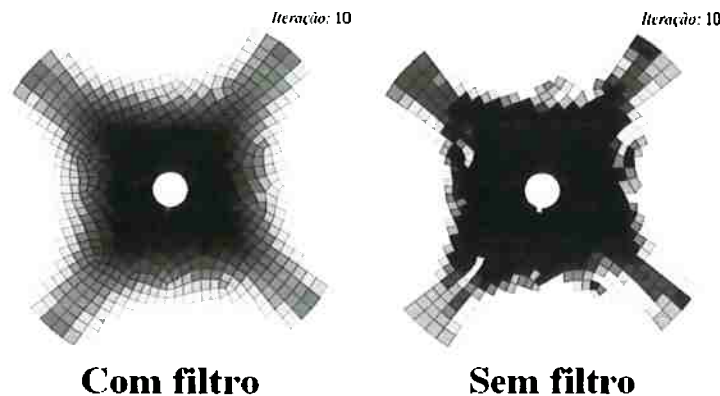


Figura 163 - Diferença do uso do filtro no processo de otimização.

Tendo em vista todas essas considerações, foi testada a otimização topológica do rotor para vários casos de restrição de volume, considerando chute inicial de densidades normalizadas iguais a 1 em toda estrutura (com exceção das densidades que representam o *gap* entre rotor e estator, como já discutido).

A seguir são mostrados os resultados do processo de otimização para vários casos experimentados. Primeiramente é otimizado um micromotor 16:4 para as duas resoluções discutidas nesse capítulo, uma vez que esse modelo já foi abordado usando o MOT na literatura (BYUN, 2002). Em seguida, é otimizado um micromotor 12:8 (o mesmo modelo simulado no capítulo 6) para as duas resoluções discutidas. Por fim, o resultado obtido para o modelo 12:8 é simulado em MEF utilizando o software ANSYS (usando a mesma metodologia do capítulo 6) para os dois acionamentos elétricos discutidos nas seções 6.1 e 6.2, a fim de se verificar a curva final de torque e, portanto, observar a eficiência da otimização em relação ao objetivo de se maximizar o torque do micromotor.

8.1. Otimização de micromotor 16:4

Primeiramente, tratando apenas com o modelo de baixa resolução (ou seja, 908 elementos no domínio do rotor) vamos analisar mais detalhadamente o processo de otimização do caso de 50% de volume como restrição. A Figura 164 a seguir mostra a situação da otimização durante 50 iterações.

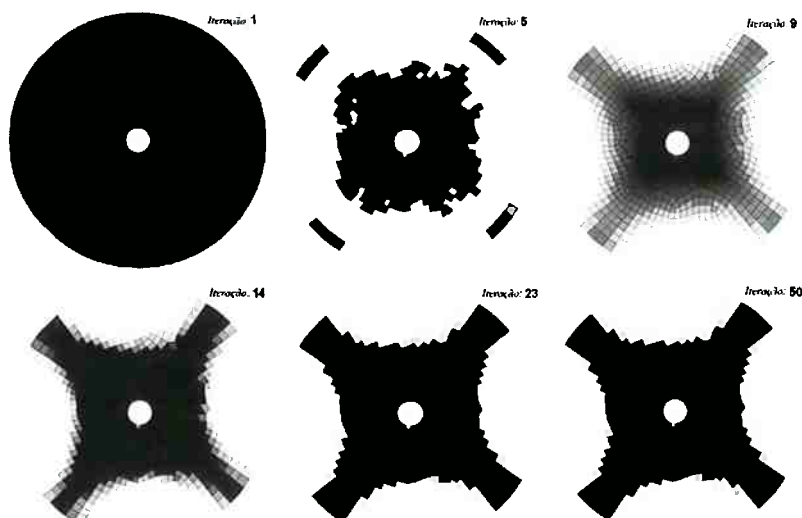


Figura 164 – Formato do rotor do micromotor durante 50 iterações de otimização.

Da iteração 1 a iteração 4, as densidades dos elementos diminuíram, mas a topologia do rotor permaneceu a mesma. Como pode ser observado na Figura 164, a partir da iteração 5, o perfil do rotor começa a se modificar tendendo ao resultado final na iteração 23, que não se modifica até a iteração 50.

A partir do mesmo teste, obtiveram-se os gráficos apresentados na Figura 165. Note que no gráfico do volume, na iteração 5, o valor do volume se estabiliza, o que significa que a restrição de 50% foi atingida. Isso é mostrado na Figura 164, uma vez que a estrutura do rotor começa a se diferenciar somente na iteração 5. Já os gráficos da função objetivo e da convergência mostram que a partir da iteração 23 não há aumento significativo na função objetivo e a convergência tende a zero, o que significa que ocorreu a convergência matemática do método.

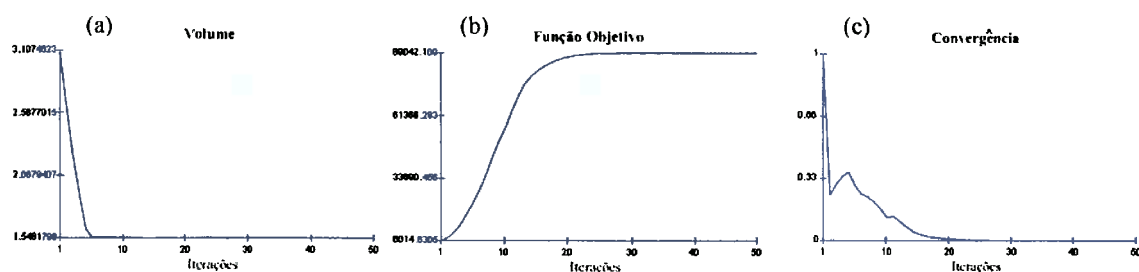


Figura 165 – Gráficos que mostram os resultados da otimização topológica do rotor com restrição de 50% de volume: a) o volume; b) a função objetivo; e c) a convergência.

Dessa forma, foram testados os vários casos de restrição de volume: 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%. O resultado final desses testes está apresentado nas figuras abaixo, para o modelo com baixa resolução.

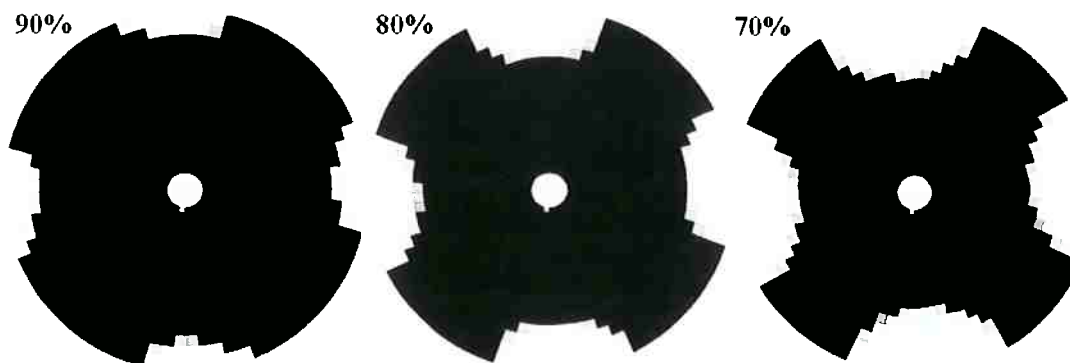


Figura 166 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.

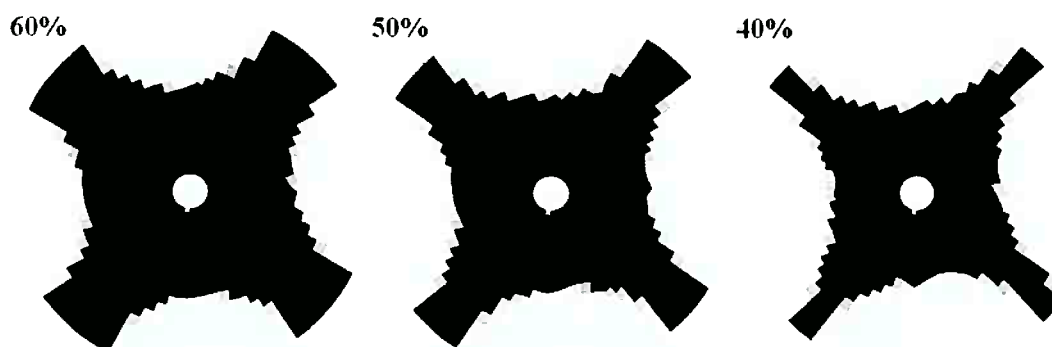


Figura 167 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.

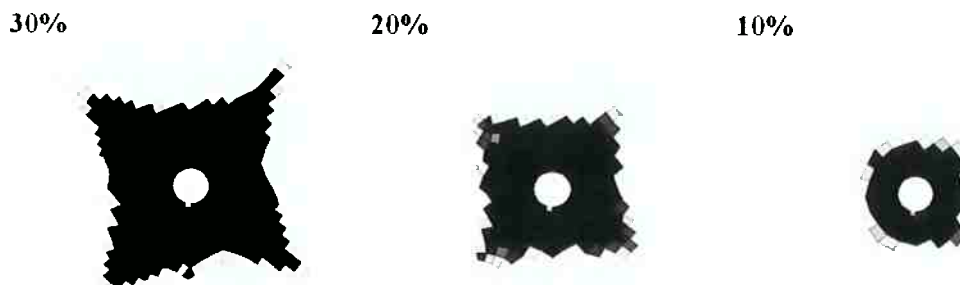


Figura 168 - Rotores otimizados de baixa resolução 16:4 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.

Já para o modelo com alta resolução (ou seja, 3072 elementos), mostrado na Figura 162, as figuras abaixo mostram testados realizados para vários casos de restrição de volume: 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%.

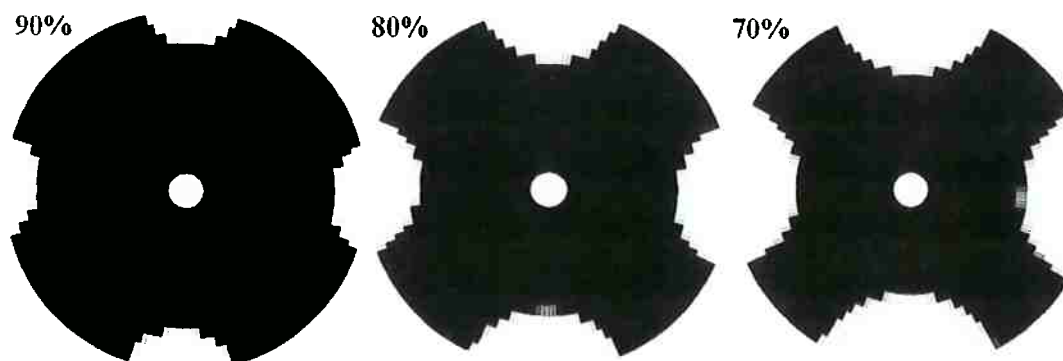


Figura 169 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.

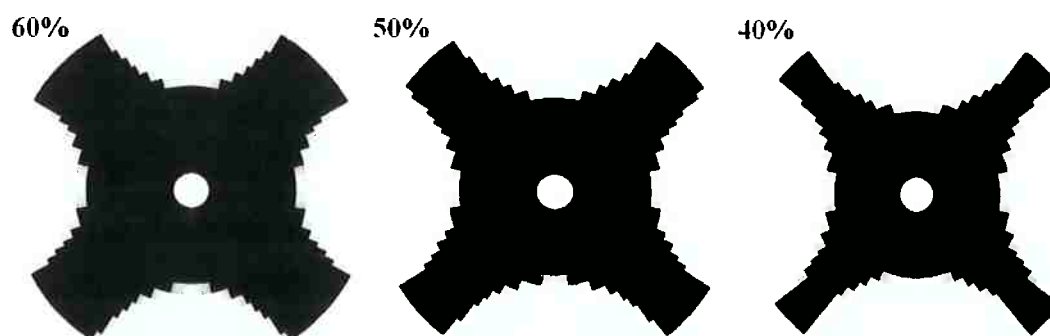


Figura 170 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.



Figura 171 - Rotores otimizados de alta resolução 16:4 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.

Os resultados do modelo de alta resolução demonstram menor assimetria que os resultados do modelo de baixa resolução e também mostram as mesmas características.

Analisando os resultados, constata-se que foi obtido o mesmo resultado que obtido por BYUN (2002), levando em consideração que neste trabalho são impostas diferentes restrições de volume (o que não é apresentado em BYUN, 2002).

A partir desses resultados é possível se levantar uma curva com os valores finais da função objetivo de cada caso. Essa curva está apresentada na Figura 172 a seguir. Como pode ser observado, a tendência da função objetivo é diminuir o material do motor. Por isso é necessário que haja uma restrição.

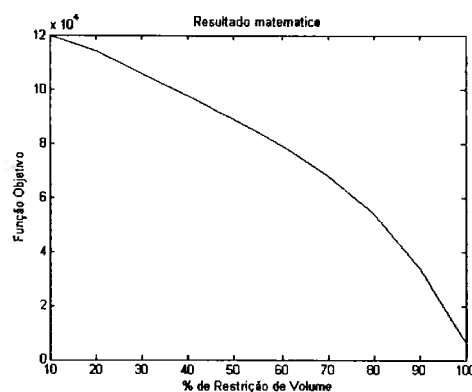


Figura 172 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume.

À medida que o valor da função objetivo vai aumentando, o formato do rotor vai diminuindo e perdendo uniformidade e significado físico. A baixo de 30% de restrição, o rotor chega a diminuir seu raio, o que o faria perder muito torque, perdendo sua funcionalidade e inviabilizando o formato otimizado para esses casos.

Dessa forma, o resultado matemático obtido deve ser ponderado fisicamente para que apresente bom rendimento e boa funcionalidade. Portanto, pode-se concluir que o melhor resultado é obtido em torno de 50% de restrição de volume, em que é obtido um valor alto de função objetivo e o formato do rotor não é comprometido.

8.2. Otimização de micromotor 12:8

Uma vez verificados os resultados obtidos para o micromotor 16:4, foram testados também modelos de micromotores 12:8, cujos resultados são mostrados logo adiante.

Para otimizar um micromotor 12:8 é necessário primeiro modificar as condições de contorno usadas para o modelo 16:4, mostradas no capítulo 4, na Figura 22 e na Figura 23. A Figura 173 abaixo mostra o domínio de MOT do rotor para um micromotor 12:8, que apresenta 12 pólos no estator e uma aplicação de potencial elétrico diferente do modelo 16:4.

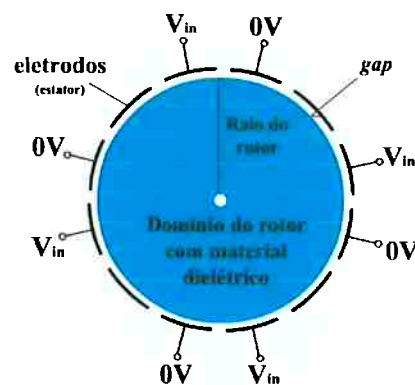


Figura 173 - Domínio de MOT do micromotor 12:8

Para o caso do micromotor 12:8, também é necessário redefinir os casos A e B que se aplicam na função objetivo, eq.(35), mostrados na figura abaixo.

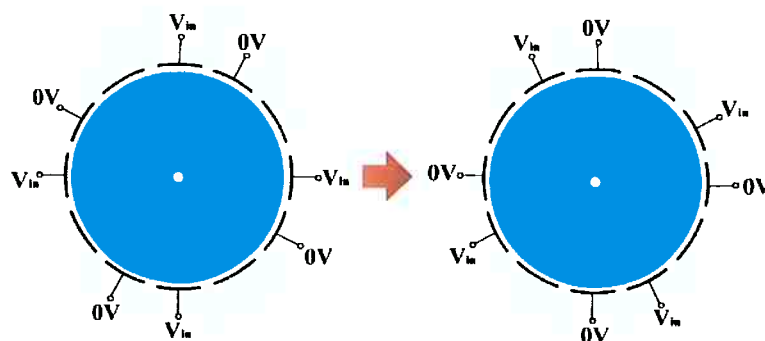


Figura 174 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B, para o micromotor 12:8.

Aplicando as condições de contorno mostradas na Figura 174, foi possível testar o software desenvolvido para um micromotor 12:8. A Figura 175 abaixo mostra os gráficos de volume, função objetivo e convergência dos resultados obtidos para o modelo de 50% de restrição de volume, como foi feito para analisar as respostas para o micromotor 16:4.

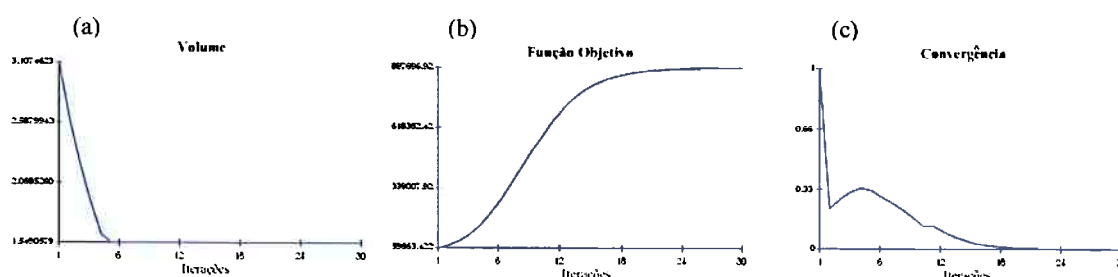


Figura 175 - Gráficos que mostram os resultados do MOT do rotor do micromotor 12:8 com restrição de 50% de volume: a) o volume; b) a função objetivo; e c) a convergência.

Como se pode observar na Figura 175, as características da convergência e do processo de MOT do micromotor 12:8 são similares às características do micromotor 16:4, mostradas na Figura 165, como o fato de o volume se estabilizar na iteração 5 e do perfil, da função objetivo e da convergência se estabilizaram na iteração 23.

Dessa forma, foram testados os vários casos de restrição de volume: 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%. O resultado final desses testes está apresentado nas figuras a seguir, para o modelo com baixa resolução.

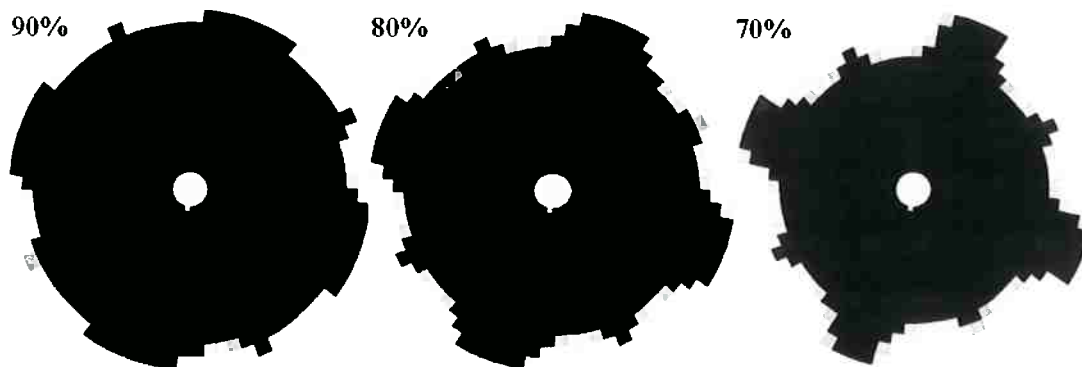


Figura 176 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.

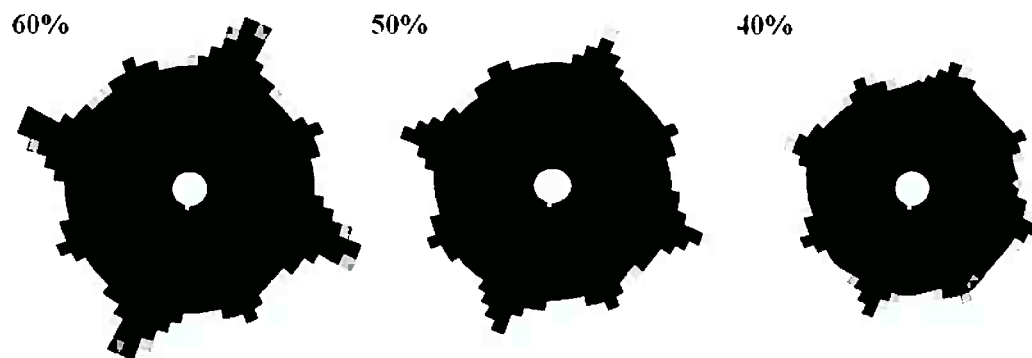


Figura 177 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.

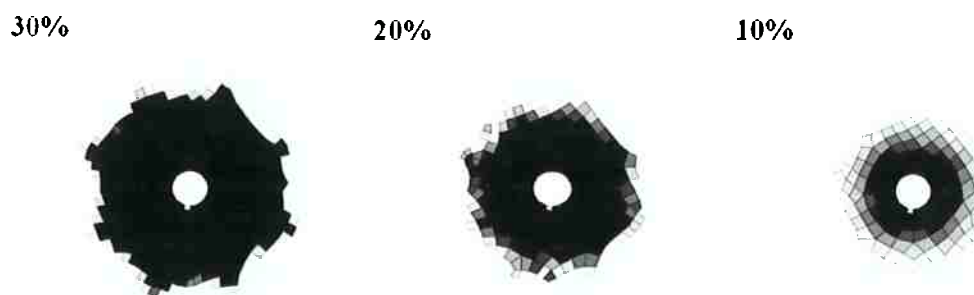


Figura 178 - Rotores otimizados de baixa resolução 12:8 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.

Já para o modelo com alta resolução (ou seja, 3072 elementos), mostrado na Figura 162, as figuras abaixo mostram testados realizados para vários casos de restrição de volume: 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%.

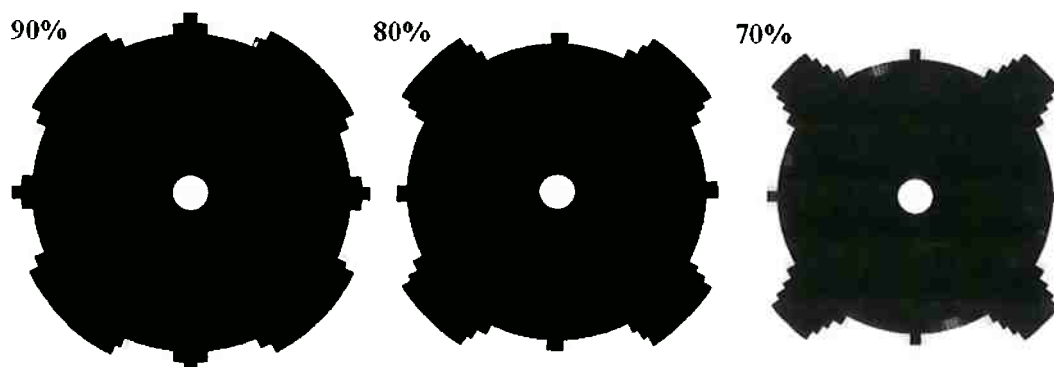


Figura 179 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.

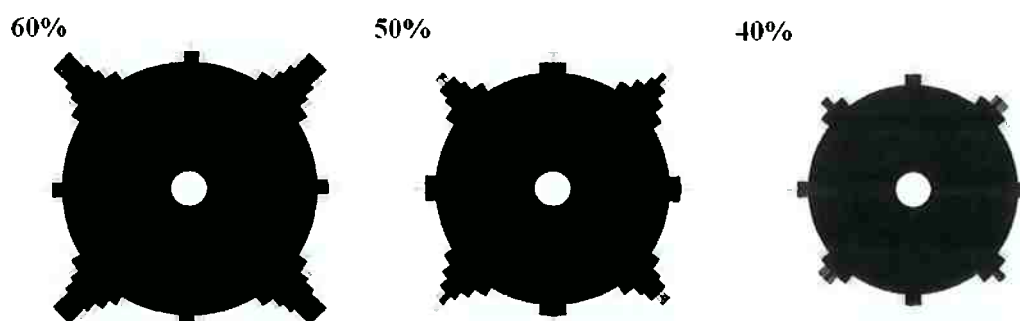


Figura 180 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.

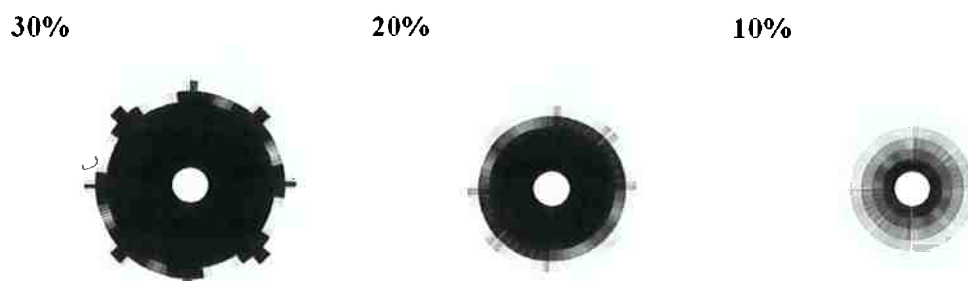


Figura 181 - Rotores otimizados de alta resolução 12:8 com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.

Os resultados do modelo de alta resolução demonstram menor assimetria que os resultados do modelo de baixa resolução e também mostram melhor definição do perfil otimizado. Como é mostrado nas figuras anteriores, nesse modelo 12:8, até os 50% não há a definição do perfil do micromotor e a melhor definição do perfil otimizado é em torno da resposta da restrição de 70% de volume.

Da mesma forma que foi feito para os resultados da otimização do modelo 16:4, a partir do resultados desse modelo 12:8 é possível se levantar uma curva com os valores finais da função objetivo de cada caso. Essa curva está apresentada na Figura 182 a seguir. Como pode ser observado, a tendência da função objetivo é diminuir o material do motor. Por isso é necessário que haja uma restrição.

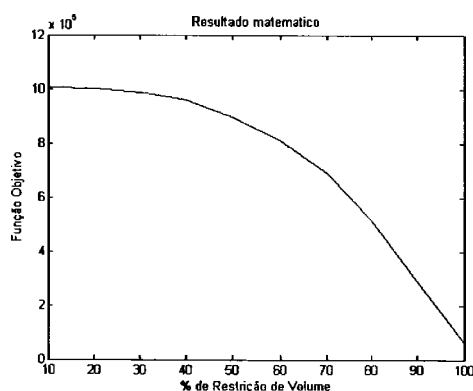


Figura 182 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume para o micromotor 12:8.

Como se pode observar nos perfis obtidos da otimização do micromotor 12:8, os rotores apresentam 4 dentes em vez de 8 (como é indica sua nomenclatura de 12 pólos e 8 dentes). Isso se dá ao fato de que a aplicação de voltagem a cada *switching* (mostrado na Figura 174) é basicamente distribuído em 4 pólos, como já foi discutido no capítulo 3 (vide Figura 13). Assim, o resultado da otimização indica que a cada *switching* são necessários apenas 4 dentes do rotor para o funcionamento do micromotor. O uso de um rotor com 8 dentes é um artifício usado para que, após cada *switching*, o dente do rotor esteja a meio passo (equivalente a 15°, tendo em vista que

os pólos são separados por 30° , que representa um passo completo) de defasagem, o que aumenta o torque médio do micromotor.

Dessa forma, supondo que o resultado mais importante da otimização é o perfil otimizado do dente do rotor, para se modelar um rotor com 8 dentes (atendendo à lógica do dente estar sempre a meio passo do alinhamento no começo de cada *switching*), basta sobrepor o perfil de dois rotores otimizados (como foi mostrado nas figuras anteriores, são rotores com 4 dentes) para se obter um rotor com 8 dentes, em que todos mantêm o perfil otimizado do dente, como é mostrado na figura abaixo para o modelo com 70% de restrição de volume.

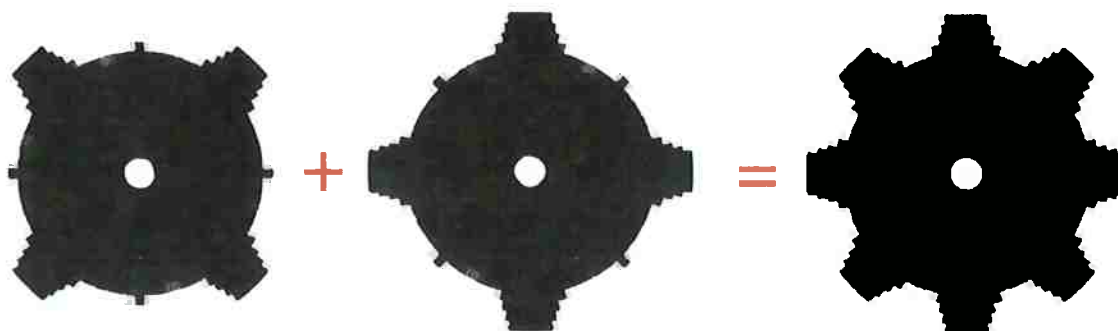


Figura 183 - Montagem de um rotor com 8 dentes a partir do modelo otimizado com 70% de volume.

8.3. Simulações do Resultado Final

Uma vez que foi obtido o perfil otimizado de micromotor 12:8, faz-se necessário simular um dos modelos otimizados para se verificar se o objetivo final de maximizar o torque foi atingido. Para isso, foi utilizado o modelo de alta resolução com restrição de 70% de volume, por apresentar largura do dente de 14° e altura do dente de $700\mu\text{m}$, o que é evidenciado pela Figura 184 a seguir.

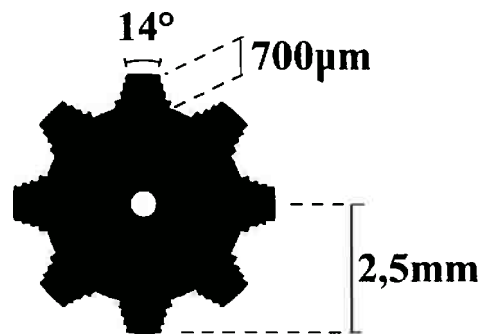


Figura 184 – Dimensões do rotor do micromotor 12:8 otimizado com 70% de volume.

Uma vez que o modelo otimizado com 70% de volume apresenta as dimensões mostradas na Figura 184 acima, é possível fazer uma comparação direta entre esse modelo e os modelos simulados no capítulo 6 a partir da Tabela 7 (que apresenta as mesmas dimensões da Figura 184 acima para o rotor). Assim, a curva de torque obtida para esse modelo otimizado pode ser comparada com as curvas mostradas na Figura 51 (para o modelo com rotor com potencial elétrico flutuante, que apresenta as mesmas condições de contorno usadas na otimização desse modelo 12:8) e na Figura 72 (para o modelo com aplicação de potencial elétrico no rotor, que tem condições de contorno diferente das usadas na otimização desse modelo).

Para simular esse modelo otimizado, foi usado o arquivo em APDL mostrado na Figura 39, que vem direto do software de otimizado com o contorno exato (sem interpretações) do modelo otimizado, como foi descrito no capítulo 5.

Dessa forma, foram levantadas duas curvas de torque, usando a metodologia desenvolvida no capítulo 6 sobre simulação computacional: uma curva considerando o rotor com potencial elétrico flutuante (como na seção 6.2) e outra com aplicação de potencial elétrico (como na seção 6.1).

8.3.1. Simulação do Rotor com Potencial Elétrico Flutuante

Para levantar a curva de torque desse modelo otimizado (micromotor 12:8 de alta resolução com 70% de volume), foi necessário criar um modelo de finitos a partir do contorno final do rotor, de forma análoga ao que foi feito na seção 6.2. Esse modelo de MEF é mostrado na Figura 185 abaixo.

É importante destacar que esse modelo com rotor de potencial elétrico flutuante apresenta as mesmas condições de contorno do MOT mostrado na Figura 174.

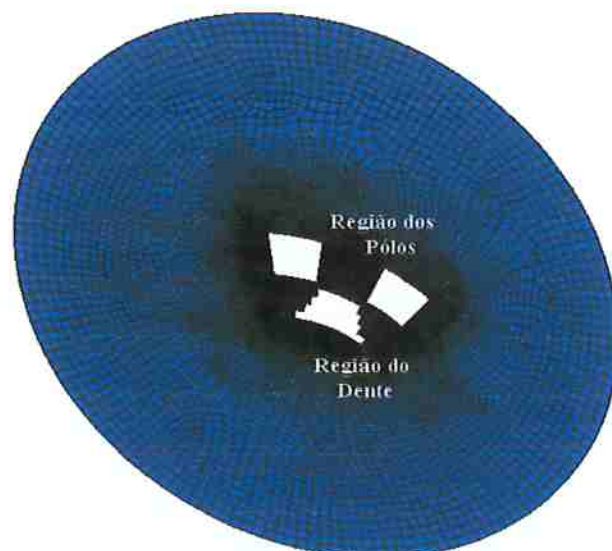


Figura 185 - Modelo de MEF para o micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.

A Figura 186 abaixo mostra a distribuição do campo elétrico nesse modelo de MEF.

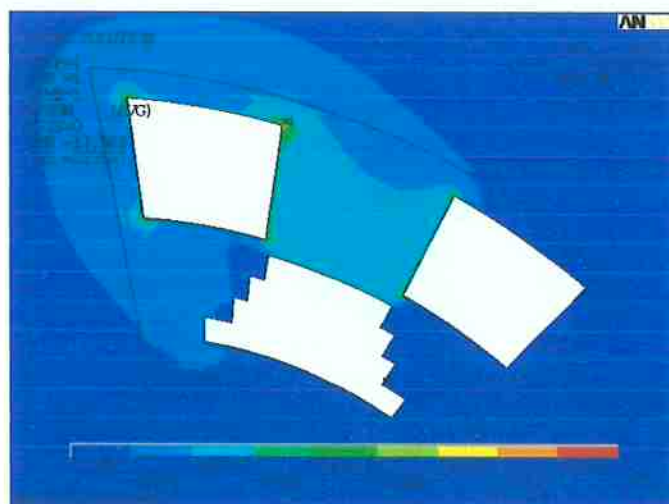


Figura 186 - Distribuição do campo elétrico no modelo de MEF do micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.

Por fim, usando a mesma metodologia apresentada no capítulo 6, foi obtida a curva de torque para esse modelo, que está apresentada na figura abaixo juntamente com a curva de torque do modelo padrão discutido na seção 6.2.

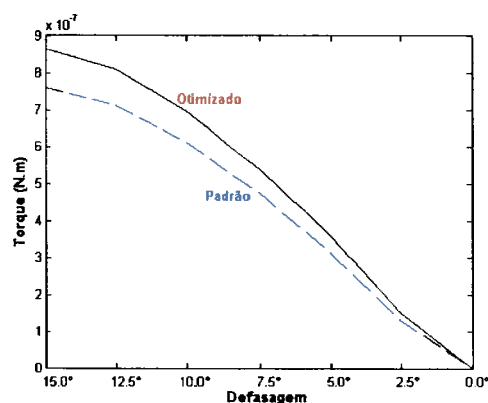


Figura 187 - Curva de torque do modelo otimizado com rotor de potencial elétrico flutuante.

Observando a figura acima, constata-se que o torque do modelo otimizado, como o esperado, é maior que o torque do modelo comum padrão. Isso pode ser justificado pelo aumento da área do dente do rotor, que representa uma maior inserção do rotor no campo elétrico gerado entre os pólos do estator.

Dessa forma, é comprovada a eficácia do processo de otimização do micromotor 12:8.

8.3.2. Simulação do Rotor com Potencial Elétrico Aplicado

Para obter a curva de torque do modelo otimizado quando se aplica potencial elétrico é necessário também se criar um novo modelo de MEF, da mesma forma que foi feito na seção 6.1. Esse novo modelo é mostrado na figura abaixo.

Vale lembrar que esse modelo não segue as mesmas condições de contorno usadas para a otimização do micromotor 12:8, uma vez que é aplicado potencial elétrico no rotor.

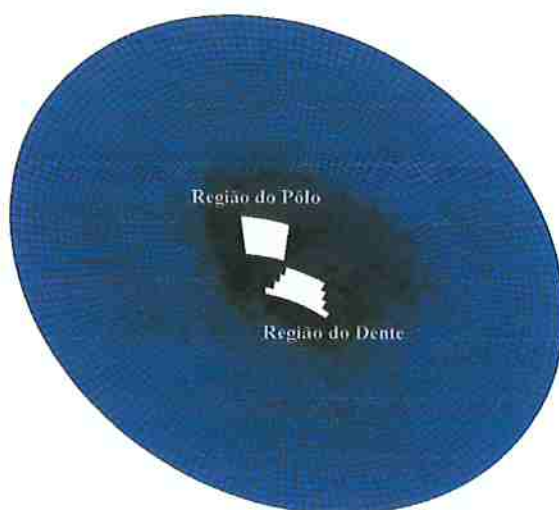


Figura 188 - Modelo de MEF para o micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.

A Figura 189 abaixo mostra a distribuição do campo elétrico nesse modelo de MEF.

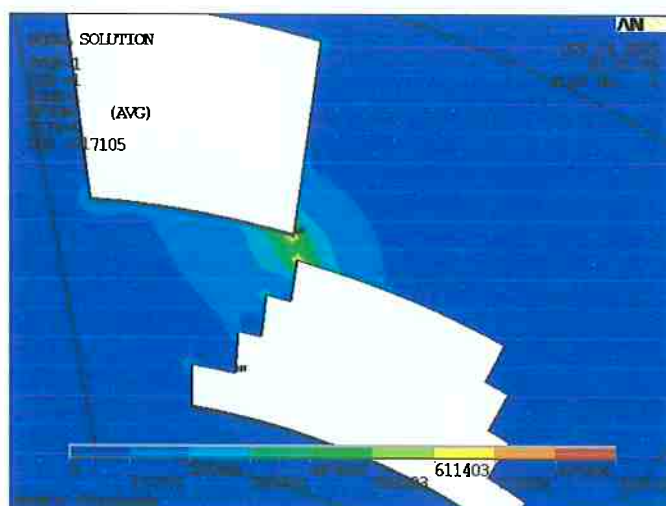


Figura 189 - Distribuição do campo elétrico no modelo de MEF do micromotor otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.

A partir desse modelo de MEF, foi obtida sua curva de torque, mostrada na Figura 190 abaixo.

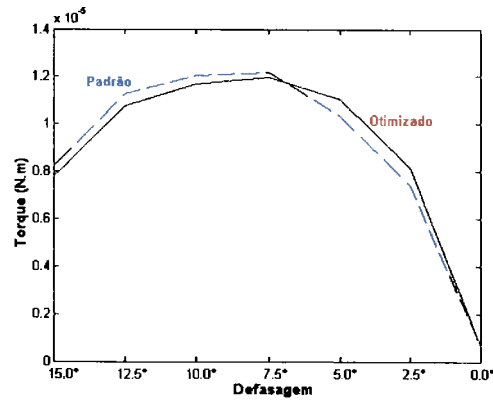


Figura 190 - Curva de torque do modelo otimizado com rotor de potencial elétrico aplicado.

A figura mostra que para o modelo com aplicação de potencial elétrico no rotor (o que não é a mesma condição de contorno aplicada para obtenção do perfil otimizado no MOT) o torque inicial é menor e o torque final é um pouco maior em relação à curva de torque do modelo padrão (vide seção 6.1). Uma vez que essa não é a mesma aplicação para que foi otimizado o rotor, o fato de a curva de torque apresentar um torque ligeiramente inferior não influi na eficiência do modelo otimizado.

9. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho é o estudo de um projeto otimizado de um micromotor eletrostático através de três vertentes: simulação computacional de MEF de um modelo computacional de um micromotor para estudar a influência dos seus parâmetros de projeto no seu torque final; desenvolvimento de um projeto de protótipo de micromotor eletrostático e microfabricação de um protótipo do mesmo; e implementação de um programa de Otimização Topológica em linguagem C para micromotores eletrostático.

Na parte de simulação computacional através do MEF (no capítulo 6), foi usado o software comercial ANSYS para levantar uma curva de torque. Foram simulados 4 modelos de MEF envolvendo duas geometrias de micromotor 12:8 diferentes e dois tipos de acionamentos elétricos diferentes (um com aplicação de potencial elétrico no rotor e outro com rotor de potencial elétrico flutuante). Para cada modelo foram feitas várias análises simulando a variação de parâmetros de projeto, como: raio do rotor, gap, espessura, largura dos dentes do rotor e dos pólos do estator, voltagem elétrica aplicada entre outros. Para cada análise foi obtido uma curva de tendência do torque indicando para que variação dos parâmetros de projeto o torque aumenta, diminui ou se mantém constante. Também foi analisada a questão do atrito tanto no eixo quanto na base do rotor, concluindo para qual modelo o atrito é menor.

Quanto à parte do projeto de protótipos e sua microfabricação (capítulo 7), esse projeto contou com o auxílio do Laboratório de Microfabricação do LNLS (Laboratório Nacional Luz Síncrotron). A partir de uma rotina de MATLAB para sistematizar o desenho de modelos diferente de micromotor, foram projetados e em seguida fabricados 51 tipos de protótipos de rotores, 12 protótipos diferentes de estatores e 4 de trilhas elétricas, resultando em 80 combinações para montagem dos protótipos. A fabricação foi concluída com sucesso.

Por fim, também foi desenvolvido nesse projeto um software de otimização para o rotor do micromotor eletrostático através do Método de Otimização Topológica em linguagem C, com o objetivo de maximizar seu torque final (capítulo 5). Também foi desenvolvida uma interface em Flash, usando linguagem ActionScript.

Assim, usando esse software de MOT, foram obtidos vários perfis de rotores, buscando encontrar sua topologia ótima para torque máximo (capítulo 8). Foram otimizados dois modelos de micromotores (16:4 e 12:8) para duas resoluções diferentes. A partir desse último modelo 12:8, foram levantadas curvas de torque a partir de novas simulações computacionais no ANSYS, considerando dois modos diferentes de aplicação de potencial elétrico no micromotor. Essas curvas foram comparadas com as curvas de torque obtidas no capítulo 6 (sobre simulação computacional) e constatou-se que para o modelo com rotor de potencial elétrico flutuante o torque do modelo otimizado é superior ao modelo padrão e, para o caso do rotor com aplicação de potencial elétrico, o torque do modelo otimizado é levemente inferior ao torque do modelo padrão.

Dada a importância das conclusões obtidas, os resultados desse projeto permitiram a publicação de um artigo no COBEM2005 com o título de “*Optimized Design of an Electrostatic Micromotor*”. O desenvolvimento desse trabalho também permitiu que o projeto de micromotores eletrostáticos em parceria com o LNLS continue sendo desenvolvido no departamento.

Dessa forma, portanto, todos os objetivos desse projeto foram atingidos com sucesso.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS - Sistema HELP do software comercial ANSYS 8.0; Capítulos 5, 14 e 15, 2004.
- BART, S. F. et al. "Electric Micromotor Dynamics"; Transactions on Electron Devices, IEEE, Vol. 39, No. 3, pp.566-575, janeiro 1992.
- BATHE, K. J., "Finite element procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 07632, USA, 1996.
- BENDSØE, M. P., "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem", Structural Optimization, 1, pp. 192-202, 1989.
- BENDSØE, M. P., KIKUCHI, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71, pp. 197-224, 1988.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O.; "Topology Optimization – Theory, Methods and Applications", Springer Ed., 2003.
- BENDSØE, M.P., RODRIGUES, H.C., "Integrated Topology and Boundary Shape Optimization of 2-D Solids", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 87, pp 15-34, 1991.
- BERKELEY – UNIVERSITY OF CALIFORNIA: Physicists build world's smallest motor using nanotubes and etched silicon, by Robert Sanders - http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23_motor.shtml - 22/04/2004.
- BRAUNSTEIN, A., "Curso de eletrodeposição do cobre e ligas de cobre", Cebraco, São Paulo, Vol.1, 1973.
- BYUN, J. K., HAHN, S. Y., PARK, I. H., "Topology optimization of electrical devices using mutual energy and sensitivity," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, pp. 3718–3720, 1999.
- BYUN, J.; PARK, I.; HAHN, S.; "Topology Optimization of Electrostatic Actuator Using Design Sensitivity" Transactions on Magnetics IEEE, Vol. 38, No. 2, pp. 1053-1056, março de 2002.
- CANFIELD, S., Frecker, M. I., "Topology Optimization of Compliant Mechanical Amplifiers for Piezoelectric Actuators", Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.20, p.269-279, 2000.

- CARDOSO, E.L., FONSECA, J.S.O., "Intermediate density reduction and Complexity Control in the Topology Optimization", 20th Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE'99), Brazil, 1999.
- CHENG, T.K., OLHOFF, N., "An Investigation Concerning Optimal Design of Solid Elastic Plates", *International Journal of Solids Structures*, 17, pp. 305-323, 1981.
- CHENG, T.K., OLHOFF, N., "Regularized Formulation for Optimal Design of Axisymmetric Plates", *International Journal of Solids Structures*, 18-2, 153-169, 1982.
- CHIEN-HUNG, H.; et al.; "Ultrathick SU-8 mold formations and removal, and its applications to the fabrication of LIGA-like micromotors with embedded roots"; *Sensors and Actuators A* 102, pp. 130-138, 2002.
- CHOI, K.K., SEONG, K.K., "A Domain Method for Shape Design Sensitivity Analysis of Built-up Structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 57, pp 1-16, 1986.
- DANTZIG, G.B., "Linear Programming and Extensions", Princeton, New Jersey, 1963.
- DELFINO, F.; ROSSI, M.; "A New FEM Approach for Field and Torque Simulation of Electrostatic Microactuators"; *Journal Of Microelectromechanical Systems*, IEEE, Vol. 11, No. 4; pp.362-371, 2002
- DÍAZ, A., SIGMUND, O., "Checkerboard Patterns in Layout Optimization", *Structural Optimization*, 10, pp. 40-45, 1995.
- DÍAZ, A.R., BENDSØE, M. P., "Shape Optimization of Structures for Multiple Loading Conditions Using Homogenization Method", *Structural Optimization*, 4, 17-22, 1992.
- DÍAZ, A.R., KIKUCHI, N., "Solution to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problems Using a Homogenization Method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35, pp. 1487-1502, 1992.
- DUFOUR I., et al.; "Simulation of self-control of an electrostatic micromotor for an intravascular echographic system"; *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 62, Issues 1-3, Pages 748-751, July 1997
- FRANGOULT, A. G.; SUNDARAM, K. B.; "Design and fabrication process for electrostatic side-drive motors"; *Journal of Micromech. Microeng.* 5 – 1995; University of Florida, Orlando, pp. 11-17, EUA, 1994.

HAFTKA, R.T., GANDHI, R.V., "Structural Shape Optimization – A survey", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 57, pp. 91-106, 1986.

HAFTKA, R.T., Gürdal, Z., Kamat, M.P., "Element of Structural Optimization", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.

HASSANI, B., HINTON, E., "A Review of Homogenization and Topology Optimization, II- Analytical and numerical solution of homogenization equations", *Computer and Structures*, 69, pp. 719-738, 1998.

HASSANI, B., HINTON, E., "A Review of Homogenization and Topology Optimization, I- Homogenization theory for media with periodic structure", *Computer and Structures*, 69, pp. 707-717, 1998.

INSTITUTE OF ELECTROSTATICS - JAPAN: "Handbook of Electrostatics" Ohm co. (1981)

ISHIHARA, H.; ARAI, F.; FUKUDA, T.; "Micro Mechatronics and Micro Actuators"; *Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME*, Vol. 1, No. 1, pp.68-79, março 1996.

JOHANSSON, T.B., et al.; "Technique for finding the optimum geometry of electrostatic micromotors", *Transactions on Industry Applications, IEEE*, Vol. 30, No.4, pp. 912-919, julho de 1994.

JONSMANN, J., SIGMUND, O., BOUWSTRA, S., "Compliant Thermal Microactuators", *Sensors and Actuators*, vol. 76, pp. 463-469, 1999.

KONTARINIS, D. A.; et al.; "A tactile shape sensing and display system for teleoperation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, pp. 641–646, May 1995.

KUCUKKOMURLER, A.; GARVERICK, S. L.; "Optimized step controller for a salien-pole micromotor"; *Case Western Reserve University, Electrical Engineering and Computer Science, Journal Of Microelectromechanical Systems, IEEE*, pp.362-366, 2000

LARA, D.S., FERREIRA, L.O.S., SWART, J.W., "Advances in the Process and in the Methodology of Emulsion Optical Masks Construction", *Centro de Componentes Semicondutores – UNICAMP*, 2001.

LARSEN, K. P.; "Metallic Microstructures on Silicon - Investigation of Reliability Properties of Electroplated Nickel used for Microstructures."; *Tese de Mestrado*,

- Mikroelektronik Centret, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca, October 31, 2001
- LEFÈVRE, Y., et al.; “First steps towards design, simulation, modeling and fabrication of electrostatic micromotors”; *Sensors and Actuators*, pp-645-648, 1995.
- LORENZ H. - MIMOTEC; “SU-8: A Thick Photo-resist for MEMS” - <http://aveclafaux.freesevers.com/SU-8.html> - Acesso em: 01/12/2004.
- MADOU, M. J., “Fundamentals of Microfabrication”, CRC Press, EUA, 1997.
- MOAVENI, S.; “Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS”, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- MOURLAS, N. J., et al.; “Exploring Polysilicon Micromotors for Data Storage Micro Disks”; Case Western Reserve University, Department of Electrical Engineering and Applied Physics, Cleveland, OH, EUA, *Journal Of Microelectromechanical Systems*, IEEE, pp.198-203, 1996.
- NEUMANN, J. J.; ‘MEMS (Microelectromechanical Systems) Audio Devices- Dreams and Realities’, Audio Engineering Society Convention paper, 2003.
- OLHOFF, N., BENDSØE, M.P., RASMUSSEN, J., “On CAD-integrated Structural Topology and Design Optimization”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89, pp 259-279, 1991.
- OLHOFF, N., Kog, L., Thomsen, J., “Bi-material Topology Optimization”, In: Kerskovites J., editor, *Structural Optimization*, 93, COPPE/Federal University of Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 327-334, 1993.
- PARK, Y.K., “Extensions of Optimal Layout Design Using Homogenization Method”, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 1995.
- PETERSSON, J., SIGMUND, O., “Slope constrained topology optimization”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.41, pp. 1417-1434, 1998.
- PRESS, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., “Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing”, pp. 430-444, Cambridge University Press, 1999.
- RAÍ-CHOUDHURY, P.; “MEMS and MOEMS Technology and Applications”; Spie Press; EUA; 2000.

- RIBAS, R. P.; 'Microsistemas aplicados(MEMS)' ; Instituto de Informática – UFRGS, 2000.
- RIETZ, A., “Sufficiency of Finite Exponent in SIMP (Power Law) Methods”, *Struct Multidisc*, Springer-Verlag, 21, pp. 159-163, 2001.
- RODRIGUES, H., FERNANDES, P., “Material Based Model for Topology Optimization of Thermoelastic Structures”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38.12, pp. 1951-1965, 1995.
- SERWAY, R. A.; “Física 3 para Cientistas e Engenheiros – Eletricidade, Magnetismo e Ótica”, 3ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.
- SIGMUND, O., “Design of Multiphysics Actuators Using Topology Optimization – Part I: One-material Structures”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.190, p.6577-6604, 2001.
- SIGMUND, O., “Design of Multiphysics Actuators Using Topology Optimization – Part I: One-material Structures”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.190, p.6605-6627, 2001.
- SILVA, E.C.N., et al., “Optimization Methods Applied to Material and Flextensional Actuator Design Using Homogenization Method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 172, pp. 241-271, 1999.
- SILVA, E.C.N., NISHIWAKI, S., KIKUCHI, N., “Topology Optimization Design of Flextensional Actuators”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 47, pp. 657-671, 2000.
- SUZUKI, K., KIKUCHI, N., “A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 93, pp. 291-318, 1991.
- SWAN, C., KOSAKA, I., “Voigt-Reuss Topology Optimization for Structures with Linear Elastic Material Behaviour”, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 3033-3057, 1997.
- TAI, Y. C.; “Micromotors”; The Caltech Micromachinig Group, Electrical Engineering, California Institute of Technology; *Jounal Of Microelectromechanical Systems*, IEEE, pp.8-11, 1995.
- TAVROW L.S., BART, S. F., LANG, J. H.; “Operational Characteristics of Microfabricated Electric Motors”; MIT; *Transactions on Electron Devices*, IEEE,

pp.877-881, 1991.

TENDICK, F. ; et al. ; “Applications of micromechatronics in minimally invasive surgery”, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.3, pp.34-42, March 1998.

THOMAS, H.L., VANDERPLAATS, G.N., SHYY, Y.K., “A Study of Move Limit Adjustment Strategies in the Approximation Concepts Approach to Structural Synthesis”, AIAA-VMA Engineering, pp. 507-512, 1992.

THOMSEN, J., “Topology Optimization of Structures Composed of One or Two Materials”, Structural Optimization, 5, pp. 108-115, 1992.

TURTELTaub, S., “Optimal Material Properties for Transient Problems”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.22, p.157-166, 2001.

UNIVERSITY OF TOKYO: High-power Electrostatic Motor – http://www.intellect.pe.utokyo.ac.jp/research/es_motor/es_motor_e.html - Acesso em: 22/04/2004.

WANG, S., KANG, J., NOH, J., “Topology optimization of a single-phase induction motor for rotary compressor”, IEEE Transactions on magnetic, Vol.40, n°3, p.1591-1596, 2004.

WIAK, S.; DUMANIA, P.; LISIK, Z.; “Silicon Electrostatic Micromotor”; 10th International POWER ELECTRONICS and MOTION CONTROL Conference, EPE-PEMC, Croacia, Vol.10, pp.114-119, 2002.

XINLI W.; SHUMEI C.; SHUKANG C.; “Advantages of Electrostatic Micromotor and Its Application to Medical Instruments”; Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, China; Journal Of Microelectromechanical Systems, IEEE, pp. 2466-2468, 2002.

YASSEEN, A. A.; et al.; "Diffraction Grating Scanners Using Polysilicon Micromotors" Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, Vol. 5, No. 1, pp.75-82, janeiro 1999.

YASSEEN, A. A.; et al.; “A Rotary Electrostatic Micromotor 1x 8 Optical Switch”, 1999.

YOO, J., KIKUCHI, N., “Topology Optimization in Magnetic Fields Using Homogenization Design Method”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 48, pp. 1463-1479, 2000.

APÊNDICE A

Condições de Contorno de Dirichlet

Para introduzir o método das Condições de Contorno de Dirichlet, vamos considerar primeiro o exemplo de uma equação de MEF eletrostático com quatro graus de liberdade, como segue abaixo.

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (82)$$

Nesse exemplo, o valor do primeiro grau de liberdade da matriz de potencial elétrico está prescrito, ou seja, é uma imposição do problema. Para resolver o problema da mesma forma que se resolve um problema em que somente a carga elétrica é imposta, devemos considerar que este grau de liberdade é uma variável e devemos garantir que, após a resolução do sistema, essa variável tenha o valor prescrito, como mostra a equação abaixo:

$$\phi_1 = \bar{\phi}_1 \quad (83)$$

Para impor essa condição no problema, devemos modificar a matriz de rigidez zerando os termos k_{1j} e k_{i1} (onde $i=2,3,4$ e $j=2,3,4$) e impondo valor unitário à variável k_{11} , como mostra a equação abaixo. Para impor essas modificações na matriz de rigidez, deve-se compensar a matriz de carga elétrica como é mostrado na equação abaixo.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ 0 & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ 0 & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ q_2 - k_{21}\bar{\phi}_1 \\ q_3 - k_{31}\bar{\phi}_1 \\ q_4 - k_{41}\bar{\phi}_1 \end{bmatrix} \quad (84)$$

Dessa forma, toda vez que um grau de liberdade é prescrito deve-se seguir esse método para obter uma equação final de MEF que possa ser solucionada matematicamente.

APÊNDICE B

Comparação de Resultados da rotina de MEF com o ANSYS

Para certificar que a rotina de MEF do programa desenvolvido está correta, deve-se primeiro realizar alguns testes somente da parte de MEF do programa desenvolvido e alguns testes no ANSYS (usando o elemento PLANE121, como já discutido) para comparar os resultados e confirmar o funcionamento correto da rotina de MEF.

Dessa forma, devemos criar diferentes malhas de elementos finitos com domínios de geometrias diversas e aplicar cargas elétricas em alguns nós e aterrar outros para se fazer a comparação de resultados.

Domínio Quadrado

Nessa segunda comparação, vamos usar um domínio quadrado de MEF, com dimensões de $200\mu\text{m}$ de lado e discretização de 400 elementos, com cargas de 40C em 2 pontas do quadrado e restrição de 0V em outra duas pontas, como mostra a Figura 191 abaixo.

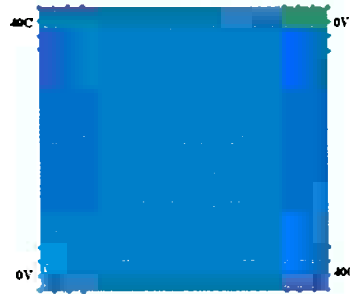


Figura 191 - Malha de MEF quadrada usada nessa comparação.

Resolvendo esse problema em ANSYS e em seguida na rotina de MEF desenvolvida, obtiveram-se as seguintes distribuições de potencial elétrico nodal na malha de finitos.

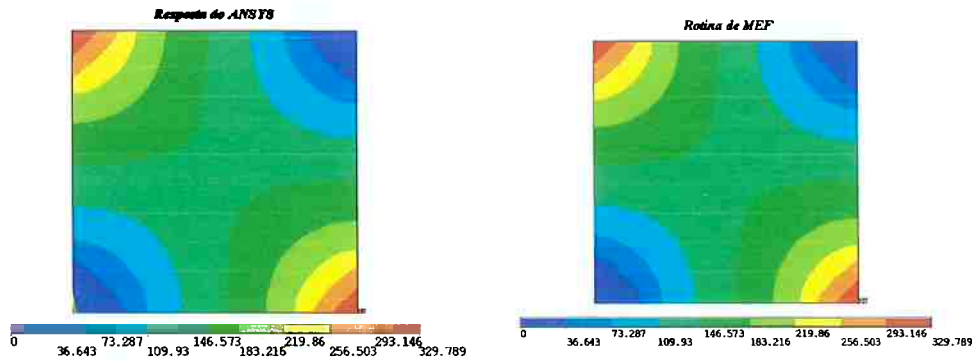


Figura 192 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).

Comparando os valores de potencial elétrico máximo nas duas respostas, obtemos que ambas cedem o valor de 329.789V. Dessa forma, temos que o programa de MEF desenvolvido também está correto na análise do domínio viável.

Domínio do Micromotor Eletrostático

Nessa comparação, temos o mesmo domínio (mesmas dimensões e número de elementos) que é analisado na otimização do micromotor eletrostático, que é um domínio parecido com o domínio circular com um furo no meio para ser o eixo do rotor, apresentado no capítulo 8. As cargas elétricas e as restrições são iguais às aplicadas no exemplo do domínio circular, como pode ser visto na Figura 193 abaixo.

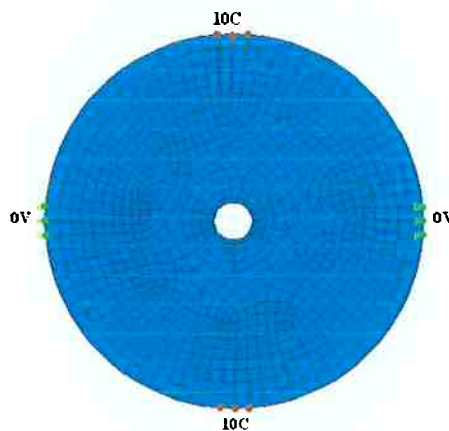


Figura 193 - Malha de MEF circular usada nessa comparação.

Esse problema foi resolvido no ANSYS e no programa de MEF. A seguir são mostrados os resultados obtidos.

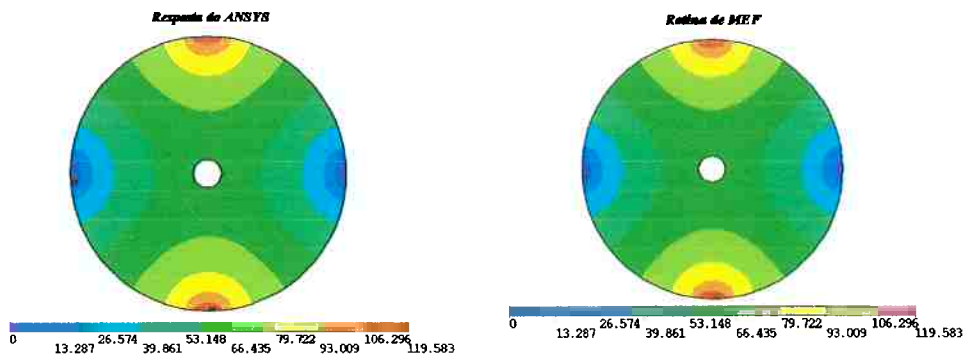


Figura 194 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).

Como pode ser observado, não somente a distribuição de potenciais é igual, como também o valor máximo de 119.583V.

APÊNDICE C

Padronização do modelo de ANSYS para leitura da rotina de MATLAB

Como já mencionado no capítulo 5, há a necessidade da padronização do modelo de ANSYS para que o programa desenvolvido possa interpretar algumas características do micromotor (como os nós que representam os pólos ativos do estator e como os elementos da malha que representam o *gap* entre rotor e estator).

Vale ressaltar que o modelo de MEF mostrado nas figuras a seguir é o mesmo modelo usado no processo de MOT apresentado no capítulo 8 para o micromotor 16:4 com baixa resolução. A aplicação das condições de contorno dos casos A e B para modelos de alta resolução ou para o micromotor 12:8 é realizada de forma análoga.

A primeira padronização a se considerar é a definição dos eletrodos do modelo para o caso A e para o caso B. A Figura 195 abaixo mostra como devem ser impostos os eletrodos.

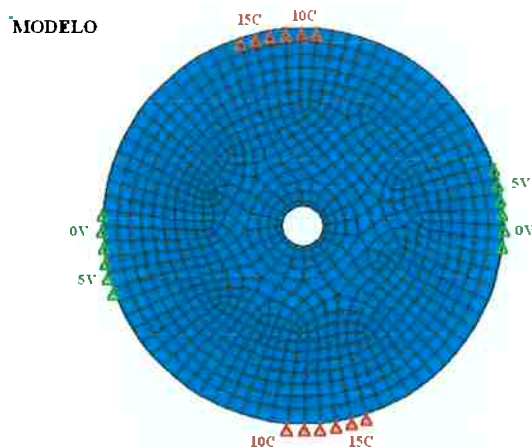


Figura 195 - Modelo de finitos do ANSYS para interpretação dos eletrodos no programa desenvolvido.

Como na rotina de MEF do software desenvolvido os nós com potencial elétrico nulo são tratados diferentemente dos com potencial elétrico (pois os nós com potencial nulo não são considerados na matriz de rigidez elétrica), deve-se diferenciar esses nós (que representam os eletrodos aterrados e os eletrodos ativos, respectivamente). Para isso, é imposto ao eletrodo ativo carga elétrica e ao eletrodo aterrado voltagem elétrica, como mostra a Figura 195 acima. Dessa forma, para representar os eletrodos do caso A,

define-se 0V e 10C para seus eletrodos e, para representar o caso B, define-se 5V e 15C, como é mostrado na Figura 196 a seguir. Esses valores não têm significado além de marcarem os nós que receberam os valores corretos de voltagem, ou carga elétrica, pelo próprio software de otimização.

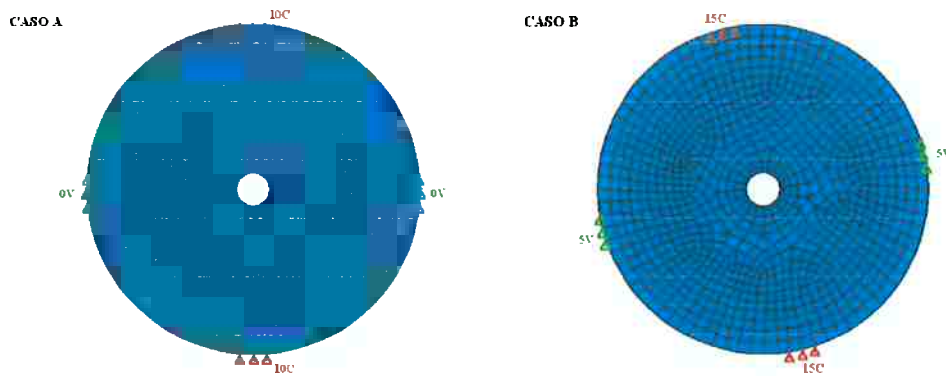


Figura 196 - Imposição de voltagem e carga elétrica padronizada para o caso A (à esquerda) e para o caso B (à direita).

O segundo fator a ser padronizado é a marcação dos elementos que representam o *gap*. Isso se faz necessário, pois esses elementos terão sua densidade normalizada fixa durante o processo de otimização (pois tem a mesma permissividade do ar), o que significa que esses elementos fazem parte da malha de finitos para a rotina de MEF, mas não entram no cálculo da otimização na parte de MOT do software desenvolvido.

Primeiramente, deve-se ressaltar que essa padronização deve ser feita antes da imposição das condições de contorno no ANSYS, mostrado anteriormente. Para que o software de otimização reconheça os elementos que fazem parte do *gap*, estes elementos devem ser numerados seqüencialmente depois dos elementos que constituem o material do rotor e devem ter numeração 2 para o tipo de elemento. Isso significa que após a criação dos elementos do rotor no ANSYS, deve-se criar os elementos do *gap* (garantindo a seqüência mencionada) e usando outro tipo de elemento (garantindo a numeração dele). Somente dessa forma a malha criada pelo ANSYS será interpretada corretamente pelo software de otimização desenvolvido.

Como pode ser visto na Figura 162, o *gap* é composto por uma camada de 5 elementos na direção axial, pois há a necessidade dessa região apresentar alta discretização por causa do alto valor de seus gradientes de energia.

APÊNDICE D

Introdução aos conceitos de CAD da interface do software desenvolvido

Para o desenvolvimento da interface do software de otimização topológica desse projeto, é necessário introduzir a formulação de mudança de sistemas de coordenadas, uma vez que se faz necessário transferir o modelo de micromotor (malha de elementos finitos) do sistema de coordenadas do ANSYS para o sistema de coordenadas de visualização da interface. Dessa forma, observando a Figura 197 a seguir, o objetivo da transformação de coordenadas seria encontrar as coordenadas do sistema $[x_1, y_1, z_1]$ em relação a um objeto com coordenadas o sistema $[x_2, y_2, z_2]$, ambos no plano $z=0$.

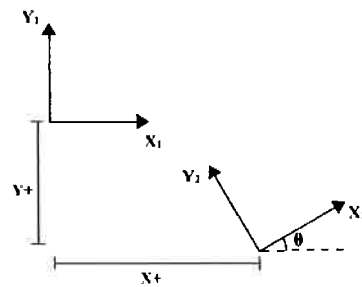


Figura 197 - Mudança de coordenadas no plano $z=0$.

Para essa transformação de coordenadas genéricas, temos a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & X+ \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & Y+ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (85)$$

Também se deve levar em conta o caso em que há um fator de escala entre 2 sistemas de coordenadas, assim, temos a seguinte equação para mudança entre 2 sistemas que apresentam um fator de escala, F:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = F \cdot \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (86)$$

ANEXO A

Rotina de MATLAB para construção do modelo do projeto do motor em ANSYS

Essa rotina de MATLAB foi usada para construção do modelo de Elementos Finitos de um par de dente do rotor e pólo do estator no software comercial ANSYS. Essa rotina gera um arquivo em APDL (linguagem de modelagem do ANSYS) para simulação computacional do micromotor.

(código completo será entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO B

Software de otimização do micromotor eletrostático desenvolvido em linguagem C

Nesse anexo está contido todo código fonte do software desenvolvido nesse projeto para otimização do projeto do rotor de um micromotor eletrostático 16:4. O fluxograma de arquivos de entrada e saída desse software está apresentado no capítulo 5.

(código completo será entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO C

Rotina de MATLAB para entradas do software de otimização

Nesse anexo está contida a rotina de MATLAB usada para gerar a entrada do software de otimização desenvolvido (contido no Anexo B), de acordo com o explicado no capítulo 5.

(código completo será entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO D

Tabela de Excel com parâmetros dos protótipos

Essa tabela contém as informações da geometria dos protótipos fabricados nesse projeto, juntamente com sua nomenclatura. Quando exportada em TXT essa tabela é entrada para rotina de MATLAB do Anexo E.

Caso	Estator			Rotor			Gap	Relação Estator/Rotor	
	Raio externo	pólo		Raio	dente			Nomenclatura	
		altura	largura		altura	largura		Estator	Rotor
1	750	250	20	496	250	20	4	s752520	r502520g4
2	750	250	20	496	250	25	4	s752520	r502525g4
3	750	250	20	496	200	20	4	s752520	r502020g4
4	750	250	20	496	200	25	4	s752520	r502025g4
5	750	200	25	546	250	20	4	s752025	r552520g4
6	750	200	25	546	250	25	4	s752025	r552525g4
7	750	200	25	546	250	30	4	s752025	r552530g4
8	750	200	25	546	200	20	4	s752025	r552020g4
9	750	200	25	546	200	25	4	s752025	r552025g4
10	750	200	25	546	200	30	4	s752025	r552030g4
11	750	150	25	596	200	20	4	s751525	r602020g4
12	750	150	25	596	200	25	4	s751525	r602025g4
13	750	150	25	596	200	30	4	s751525	r602030g4
14	700	250	20	446	200	20	4	s702520	r452020g4
15	700	250	20	446	200	25	4	s702520	r452025g4
16	700	250	20	446	150	20	4	s702520	r451520g4
17	700	250	20	446	150	25	4	s702520	r451525g4
18	700	250	25	446	200	20	4	s702525	r452020g4
19	700	250	25	446	200	25	4	s702525	r452025g4
20	700	250	25	446	200	30	4	s702525	r452030g4
21	700	250	25	446	150	20	4	s702525	r451520g4
22	700	250	25	446	150	25	4	s702525	r451525g4
23	700	250	25	446	150	30	4	s702525	r451530g4
24	700	250	25	442	200	20	8	s702525	r452020g8
25	700	250	25	442	200	25	8	s702525	r452025g8
26	700	250	25	442	200	30	8	s702525	r452030g8
27	700	200	25	496	150	20	4	s702025	r501520g4
28	700	200	25	496	150	25	4	s702025	r501525g4
29	700	200	25	496	150	30	4	s702025	r501530g4
30	500	150	15	346	200	15	4	s501515	r352015g4
31	500	150	15	346	200	20	4	s501515	r352020g4
32	500	150	15	346	200	25	4	s501515	r352025g4
33	500	150	15	346	150	15	4	s501515	r351515g4
34	500	150	15	346	150	20	4	s501515	r351520g4
35	500	150	15	346	150	25	4	s501515	r351525g4
36	500	150	20	346	200	15	4	s501520	r352015g4

37	500	150	20	346	200	20	4	s501520	r352020g4
38	500	150	20	346	200	25	4	s501520	r352025g4
39	500	150	20	346	150	15	4	s501520	r351515g4
40	500	150	20	346	150	20	4	s501520	r351520g4
41	500	150	20	346	150	25	4	s501520	r351525g4
42	500	150	15	342	150	15	8	s501515	r351515g8
43	500	150	20	342	150	20	8	s501520	r351520g8
44	500	150	20	342	150	25	8	s501520	r351525g8
45	500	100	20	396	150	20	4	s501020	r401520g4
46	500	100	20	396	150	25	4	s501020	r401525g4
47	500	100	20	396	150	30	4	s501020	r401530g4
48	500	100	20	396	100	20	4	s501020	r401020g4
49	500	100	20	396	100	25	4	s501020	r401025g4
50	500	100	20	396	100	30	4	s501020	r401030g4
51	500	100	25	396	150	20	4	s501025	r401520g4
52	500	100	25	396	150	25	4	s501025	r401525g4
53	500	100	25	396	150	30	4	s501025	r401530g4
54	500	100	25	396	100	20	4	s501025	r401020g4
55	500	100	25	396	100	25	4	s501025	r401025g4
56	500	100	25	396	100	30	4	s501025	r401030g4
57	500	100	20	392	100	20	8	s501020	r401020g8
58	500	100	20	392	100	25	8	s501020	r401025g8
59	500	100	25	392	100	25	8	s501025	r401025g8
60	500	100	25	392	100	30	8	s501025	r401030g8
61	450	150	20	296	100	20	4	s451520	r301020g4
62	450	150	20	296	100	25	4	s451520	r301025g4
63	450	150	20	292	100	20	8	s451520	r301020g8
64	450	150	20	292	100	25	8	s451520	r301025g8
ESPECIAIS:									
Estator com bushing de 3 pinos									
65	500	100	20	396	150	20	4	s501020b3	r401520g4
66	500	100	20	396	150	25	4	s501020b3	r401525g4
67	500	100	20	396	150	30	4	s501020b3	r401530g4
68	500	100	20	396	150	20	4	s501020b3	r401520g4
69	500	100	20	396	150	25	4	s501020b3	r401525g4
70	500	100	20	396	150	30	4	s501020b3	r401530g4
Estator sem eixo									
71	500	100	20	396	150	20	4	s501020se	r401520g4
72	500	100	20	396	150	25	4	s501020se	r401525g4
73	500	100	20	396	150	30	4	s501020se	r401530g4
74	500	100	20	396	150	20	4	s501020se	r401520g4
75	500	100	20	396	150	25	4	s501020se	r401525g4
76	500	100	20	396	150	30	4	s501020se	r401530g4
Rotor de 4 dentes									
77	500	100	25	396	150	25	4	s501025	r401525g4d
78	500	100	25	396	150	30	4	s501025	r401530g4d
79	500	100	25	396	150	35	4	s501025	r401535g4d
Rotor com 5 Furos									
80	450	150	20	292	100	20	4	s451520	r301020g4F

ANEXO E

Rotina de MATLAB para gerar arquivo em AutoLISP dos desenhos do micromotor

Essa rotina de MATLAB gera um arquivo TXT na linguagem AutoLisp (linguagem própria do AutoCAD), para modelagem do projeto dos protótipos de micromotores desse trabalho, de acordo com os parâmetros da tabela apresentado no Anexo D.

(código completo será entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO F

Sub-rotina de MATLAB para gerar arquivo em ActionScript para interface

Essa rotina de MATLAB é chamada pela rotina apresentada no Anexo C e gera um arquivo TXT em linguagem ActionScript 2.0 (linguagem para implementações em Flash), para construção de parte da interface do software desenvolvido.

(código completo será entregue em CD durante a apresentação)