

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO DE FIBRAS POROSAS COM INCLUSÕES METÁLICAS PARA GUIAMENTO
EM THz

MARKOS PAULO CARDOSO

DM 34/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARKOS PAULO CARDOSO

ESTUDO DE FIBRAS POROSAS COM INCLUSÕES METÁLICAS PARA GUIAMENTO
EM THz

DM 34/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARKOS PAULO CARDOSO

ESTUDO DE FIBRAS POROSAS COM INCLUSÕES METÁLICAS PARA GUIAMENTO
EM THz

Dissertação submetida a banca examinadora do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO DE FIBRAS POROSAS COM INCLUSÕES METÁLICAS PARA GUIAMENTO
EM THz

AUTOR: MARKOS PAULO CARDOSO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM / /

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Anderson Oliveira Silva
(Co-orientador CEFET-RJ)

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(Avaliador Interno PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. João Cláudio Chamma Carvalho
(Avaliador externo UFPA- Castanhal)

VISTO

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

- A Deus pelo dom da vida, e por me amparar sempre que necessário.
- Aos meus pais Rudiberto A. Cardoso e Lorinez D. Cardoso, pelo apoio imensurável que me fez chegar na pós graduação.
- Ao meu irmão Luiz E. Cardoso, pelo apoio e pelos conselhos.
- Ao Prof. Dr. João C. W. A. Costa pela amizade e orientação desde a primeira bolsa de iniciação científica.
- Ao Prof. Dr. Anderson O. Silva pela amizade, orientação, paciência e incentivo desde a primeira bolsa de iniciação científica.
- A Patrick Gaia pelo apoio operacional.
- A Sabrina Cardoso pelo apoio e puxões de orelha.
- Aos meus amigos Acir, Armando, Eduardo, Diego, Erick, Fofó, Nicolas, Kevin, Rodrigo, Cesar, Luis, Paulo, Cristiano pelas horas de lazer e lições de vida.
- Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro e operacional durante a graduação e mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	1
LISTA DE TABELAS	7
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 – Radiação Terahertz	10
1.2 – Breve histórico do desenvolvimento da Plasmônica	13
1.3 – Objetivos.....	16
2 DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE FIBRAS MICROESTRUTURADAS PARA GUIAMENTO EM THz	18
2.1 Guias de onda para faixa THz.....	18
2.1.1 Parâmetros físicos das fibras	20
2.1.1.1 Modos guiados e índice efetivo	20
2.1.1.2 Número de modos.....	21
2.1.1.3 Perda efetiva do material (Effective material loss – EML)	21
2.1.1.4 Fração de potência.....	22
2.1.1.5 Dispersão Cromática.....	23
2.2 Equacionamento do COMSOL Multiphysics	24
2.2.1 Propagação eletromagnética THz.....	24
2.3 Polímeros Especiais	27
2.4 Avaliação Numérica de Fibras Terahertz	29
2.4.1 Microwires.....	30
2.4.1.1 Distribuição de campo elétrico e de potência modal	32
2.4.1.2 Fração de potência	35
2.4.1.3 Perda por absorção.....	36
2.4.2 Fibras porosas	37
2.4.2.1 Potência Modal	39
2.4.2.2 Índice efetivo	42
2.4.2.3 Fração de potência	43
2.4.2.4 Perda efetiva do material (EML)	45
2.4.2.5 Dispersão Cromática (β_2).....	46

3 FIBRAS ESPECIAIS PARA GUIAMENTO EM THz	47
3.1 Fibra Porosa com defeito central	47
3.1.1 Potência modal	49
3.1.2 Índice efetivo.....	53
3.1.3 Fração de potência.....	54
3.1.4 Perda efetiva do material (EML).....	55
3.1.5 Dispersão cromática	56
3.2 Fibra porosa com defeito central e inclusão de um anel de ouro.....	57
3.2.1 Potência modal	60
3.2.2 Índice efetivo.....	63
3.2.3 Fração de potência.....	64
3.2.4 Perda efetiva do material (EML).....	66
3.2.5 Dispersão cromática	66
3.3 Fibra porosa tipo D com defeito central	67
3.3.1 Potência modal	69
3.3.2 Índice efetivo.....	72
3.3.3 Fração de potência.....	73
3.3.4 Perda efetiva do material (EML).....	75
3.3.5 Dispersão cromática	76
3.4 Fibra porosa tipo D com defeito central e com inclusão de uma película de ouro	77
3.4.1 Potência modal	79
3.4.2 Índice efetivo.....	81
3.4.3 Fração de potência.....	82
3.4.4 Perda efetiva do material (EML).....	84
3.4.5 Dispersão cromática	85
3.5 Fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de um anel de ouro.....	85
3.5.1 Potência modal	87
3.5.2 Índice efetivo.....	90
3.5.3 Fração de potência.....	91
3.5.4 Perda efetiva do material (EML).....	93
3.5.5 Dispersão cromática	94
CONCLUSÃO.....	96
CONTRIBUIÇÕES	99

REFERÊNCIAS 100

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 1 As frequências específicas do espectro eletromagnético [3].....	10
FIG 2 Geometria das estruturas de guias de ondas para THz: (a) um guia de onda de divisão retangular (b) um guia de onda tubo [9].	12
FIG 3 PCF's construídas por [12], o canto direito apresenta o corte transversal, onde o núcleo (parte sólida) e a casca (tubos ocos) são feitos de Teflon.	13
FIG 4 Secção transversal de uma fibra porosa para guiamento em THz [13].....	13
FIG 5 Cálice de Licurgo atualmente exibido no Museu Britânico.....	14
FIG 6 Representação esquemática da configuração de Kretschmann [16].	15
FIG 7 Guias de onda convencionais metálicos (a) circular (b) retangular [29].	18
FIG 8 Esquemático de uma fibra óptica onde $n_1 > n_2$ [29].	19
FIG 9 Índice de refração para diferentes polímeros em frequências THz [34].	29
FIG 10 Secção transversal do microwire com diâmetro D.....	30
FIG 11 Curvas de dispersão dos modos suportados pelo microwire de (a)500um, (b)400um e (c)200um de diâmetro em função da frequência.	32
FIG 12 Distribuição de potência modal normalizada e componentes de campo elétrico (setas brancas) para as polarizações do modo fundamental do microwire de 200um nas frequências de (a) 1 THz, (b) 2 THz e (c) 3 THz.....	34
FIG 13 Distribuição de potência modal normalizada e componentes de campo elétrico (setas brancas) para as polarizações do modo fundamental do microwire de 400um nas frequências de (a) 1 THz, (b) 2 THz e (c) 3 THz	35
FIG 14 Fração de potência no núcleo (polímero) dos microwires em função da frequência...36	36
FIG 15 Fração de potência na casca (ar) dos microwires em função da frequência.	36
FIG 16 Perda por absorção dos microwires de Topas para 200,400 e 500um de diâmetro.	37
FIG 17 Esquemático de uma fibra porosa e seus parâmetros geométricos d, D e Λ	38
FIG 18 Fibras microestruturadas com diferentes razões de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9 e suas diferentes porosidades, p.....	39
FIG 19 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	40

FIG 20 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	41
FIG 21 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	42
FIG 22 Índices efetivo das fibras microestruturadas com $\Lambda=37.31[\mu\text{m}]$ e vários valores de d/Λ .	43
FIG 23 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	44
FIG 24 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	44
FIG 25 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	45
FIG 26 Perda efetiva do material da fibra microestruturada confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	46
FIG 27 Dispersão cromática da fibra microestruturada confeccionado com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	46
FIG 28 Esquemático da fibra porosa com defeito central de diâmetro $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.	48
FIG 29 Fibra porosa com defeito central de diâmetro $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$. de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.	49
FIG 30 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	51
FIG 31 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	52
FIG 32 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	53

FIG 33 Índices efetivos das fibras microestruturadas de defeito central com $\Lambda=37.31[\mu\text{m}]$ e vários valores de d/Λ .	53
FIG 34 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	54
FIG 35 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	55
FIG 36 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	55
FIG 37 Perda efetiva do material da fibra porosa com defeito central confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	56
FIG 38 Dispersão cromática da fibra porosa com defeito central confeccionada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	57
FIG 39 Esquemático da fibra porosa com defeito central e um anel de ouro de $0.2\mu\text{m}$ de espessura, o diâmetro do defeito central é $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.	58
FIG 40 Fibras porosa com defeito central e um anel de ouro de $0.2\mu\text{m}$ de espessura (área vermelha) com diferentes razões de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.	59
FIG 41 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0.5 [THz] , (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz] .	61
FIG 42 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0.5 [THz] , (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz] .	62
FIG 43 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0.5 [THz] , (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz] .	63
FIG 44 Índices de modo efetivo das fibras porosas com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	64
FIG 45 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	65
FIG 46 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	65
FIG 47 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	65

FIG 48 Perda efetiva do material da fibra porosa com anel de ouro confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	66
FIG 49 Dispersão cromática da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .	67
FIG 50 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central, o diâmetro do defeito central é $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.	68
FIG 51 Fibra porosa tipo D com defeito central de diâmetro $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$. de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.	69
FIG 52 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	70
FIG 53 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	71
FIG 54 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].	72
FIG 55 Índices efetivo das fibras porosas tipo D com defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	73
FIG 56 Fração normalizada de potência presente no material da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	74
FIG 57 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	74
FIG 58 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	75
FIG 59 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D com defeito central, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .	76
FIG 60 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .	77
FIG 61 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de uma película de ouro, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.	78
FIG 62 Fibra porosa tipo D sem furo central com inclusão de uma película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .	79

FIG 63 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].....	80
FIG 64 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].....	80
FIG 65 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].....	81
FIG 66 Índice efetivo da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	82
FIG 67 Fração de potência normalizada presente no material dielétrico da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	83
FIG 68 Fração de potência normalizada presente nos furos de ar da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	83
FIG 69 Fração de potência normalizada presente na casca da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	84
FIG 70 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D com película de ouro, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ	84
FIG 71 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ	85
FIG 72 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de um anel de ouro, o diâmetro do defeito central é $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$	86
FIG 73 Fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	87
FIG 74 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].....	88
FIG 75 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].....	89
FIG 76 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].....	90

FIG 77 Índice efetivo da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	91
FIG 78 Fração de potência normalizada presente no material dielétrico da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	92
FIG 79 Fração de potência normalizada presente nos furos de ar da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	92
FIG 80 Fração de potência normalizada presente na casca da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ	93
FIG 81 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm , com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ	94
FIG 82 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Características de polímeros na frequência de 1THz (adaptado de [29])	28
--	----

RESUMO

O guiamento de ondas THz tem se mostrado de grande importância na melhoria da performance das configurações de espectroscopia, imagem e sensoriamento. Um dos maiores desafios na concepção dessas estruturas é a mitigação das altas perdas apresentadas pelo meio dielétrico na faixa espectral THz (0.1 até 10 THz). Este trabalho realiza a modelagem numérica de fibras porosas com inclusões de ouro para guiamento em THz. O design dessas interfaces metal-dielétricas é capaz de confinar as ondas THz nas regiões de ar da fibra porosa através da excitação de plasmons de superfície, modos que resultam da interação ressonante entre a radiação eletromagnética incidente e a oscilação coletiva de elétrons livres na superfície metálica. É evidenciado que a partir de um projeto adequado da camada de ouro, as perdas efetivas podem ser reduzidas e uma dispersão cromática zero pode ser alcançada como resultado do acoplamento entre os modos da fibra e os plasmons de superfície.

Palavras-Chaves: Fibras porosas, Terahertz, Plasmons de Superfície.

ABSTRACT

The guidance of THz waves has been found of great importance to improve the performance of spectroscopy, imaging and sensing setups. One of the major challenges in designing such structures is the mitigation of the high losses presented by dielectric media in the THz spectral range (0.1 up to 10 THz). This work performs an analytical and numerical modeling of porous fibers with gold inclusions for THz guidance. The design of these metal-dielectric interface is capable to confine THz waves in the air region of the porous fiber, through the excitation of surface plasmons, modes that result from the resonant interaction between the incident electromagnetic radiation and the collective oscillation of free electrons on the metal surface. It is shown that from a suitable design of the gold layer, the effective losses can be reduced and a zero chromatic dispersion can be achieved as result of the coupling between the fiber modes and the surface plasmons.

Keywords: Porous fibers, Terahertz, Surface Plasmons.

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentado a motivação do trabalho na faixa de frequência de Terahertz assim como um breve histórico de tecnologias nesta região espectral. Como, neste trabalho, são abordados efeitos resultantes da excitação de modos plasmônicos em THz, serão também apresentados neste capítulo os principais conceitos acerca de ondas plasmônicas. Na sequência, serão traçados os objetivos desse trabalho levando em consideração as características que permitem obter melhores relações de compromisso entre perdas e dispersão.

1.1 – Radiação Terahertz

É a radiação localizada na faixa de 0.1 THz até 10 THz, está localizada entre a região de micro-ondas e a infravermelho [1]. Essa gama de frequência foi pouco explorada no passado devido suas altas perdas em meios dielétricos além da dificuldade de se obter fontes e detectores THz eficientes e compactos. Isso fez com que essa faixa ficasse conhecida como “gap THz” [2].

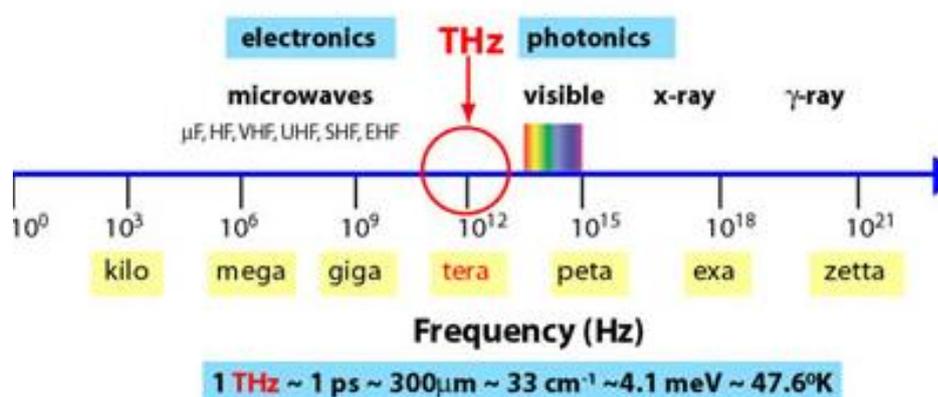


FIG 1 As frequências específicas do espectro eletromagnético [3].

No início dessa década, houve um enorme progresso nas técnicas de geração e detecção de ondas THz, porém, esses sistemas eram na maior parte robustos e volumosos e utilizavam o espaço livre para propagação devido à falta de guias de onda de baixas perdas nessa região espectral [2]. Portanto, tornar esses sistemas flexíveis, diminuir suas dimensões, e reduzir suas perdas de transmissão, tornou-se um desafio. Uma das soluções consiste em substituir a componente do espaço livre por estruturas de guiamento.

Esse tipo de abordagem proporciona uma melhoria drástica no desempenho do sistema, confiabilidade e nível de integração para sistemas THz. Múltiplos trabalhos de pesquisa teórica e experimental sobre guias de onda THz tem sido reportados, como tubos dielétricos revestidos de metal [4], fios metálicos [5] [6], fibras de Bragg [7]. As soluções de guias de onda apresentadas são baseadas em fios metálicos e fibras dielétricas micrométricas, onde uma barra sólida atua como núcleo de alto índice de refração e o ar que o circunda como a casca. O modo fundamental guiado se concentra majoritariamente no revestimento de ar circundante e, portanto, apresenta baixa perda [5],[6] e [8]. Entretanto, existe uma desvantagem para esse tipo de fibras e para os fios metálicos, que a maior parte do campo se propaga fora do núcleo, resultando assim num forte acoplamento com o ambiente externo.

Em 2006, Nagel *et al.* [9] relataram a adição de um furo de ar dentro de um núcleo sólido, como mostrado na FIG 02 (a) e (b), isso fez com que o campo guiado no furo de ar aumentasse, diminuindo assim a perda por absorção, contudo as perdas devido ao material ainda eram altas.

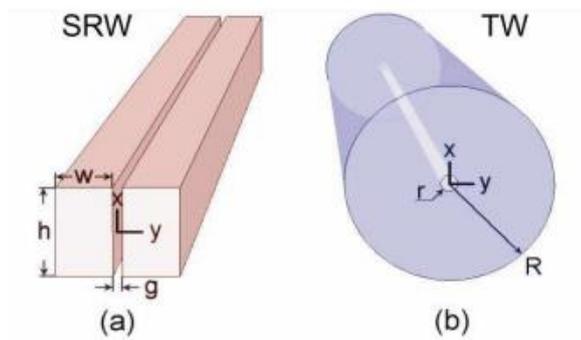


FIG 2 Geometria das estruturas de guias de ondas para THz: (a) um guia de onda de divisão retangular (b) um guia de onda tubo [9].

Para solucionar tal problema, duas linhas de pesquisa são majoritariamente seguidas: uma é a utilização de alguns polímeros para guiamento nessa faixa de THz [10]-[11], e a outra emprega a criação de interfaces metal dielétrico para a manipulação de plasmons polaritons de superfície (SPP-*Surface Plasmon Polariton*).

Goto *et al.* [12], demonstraram uma das primeiras utilizações de polímeros para confecção de guias de onda em THz. Em seu trabalho foi utilizado Teflon para confecção de uma (PCF – *Photonic Crystal Fiber*) para guiamento em THz, como é mostrado na FIG 03. Entretanto, grande parte da potência guiada se concentrava no núcleo sólido, resultando assim em uma perda por absorção do material elevada.

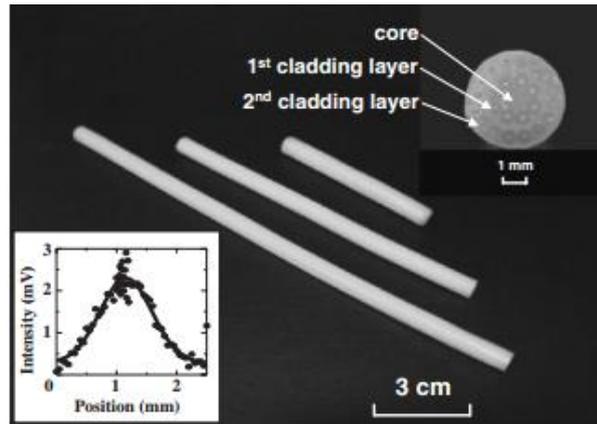


FIG 3 PCF's construídas por [12], o canto superior direito apresenta o corte transversal, onde o núcleo (parte sólida) e a casca (tubos ocios) são feitos de Teflon.

Uma das primeiras abordagens para a controle de perdas no material foi apresentada em 2008 por Hassani *et al.* [13], com uma fibra porosa de arranjo hexagonal para guiamento em THz, como é mostrado na FIG 04. Nessa configuração a potência guiada se concentrava nos furos de ar, diminuindo assim a perda por absorção no material.

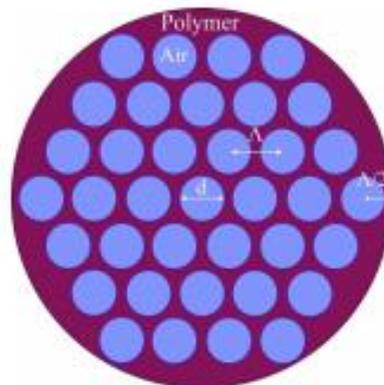


FIG 4 Secção transversal de uma fibra porosa para guiamento em THz [13].

Na próxima seção será apresentado um breve histórico a respeito de SPP's e como essa tecnologia pode ser utilizada para diminuir perdas de transmissão em um guia de onda.

1.2 – Breve histórico do desenvolvimento da Plasmônica

A plasmônica é o seguimento da fotônica que investiga a geração e propagação de SPP's, modos eletromagnéticos que ficam confinados à interface condutor-dielétrico devido à interação ressonante entre fótons incidentes e elétrons livres na superfície condutora. Na ressonância plasmônica, a potência pode ser confinada e amplificada a um comprimento de onda efetivo bem menor do que aquele da luz incidente [14].

O primeiro relato da utilização dessa tecnologia data o século IV, o Cálice de Licurgo, FIG 05, é um cálice de vidro fabricado na Roma antiga, o qual possui a propriedade de mudar de cor conforme a direção em que é iluminado. Esse fenômeno intrigou cientistas por anos, e apenas em 1990 um grupo de pesquisadores ingleses observaram com ajuda de um microscópio eletrônico que nos fragmentos de vidro do cálice haviam nano partículas de prata e ouro. Esse arranjo absorvia os comprimentos de onda mais curtos e espalhava radiação de comprimentos mais longos [14].



FIG 5 Cálice de Licurgo atualmente exibido no Museu Britânico.

Em 1983, Liedberg [15] demonstrou pela primeira vez o funcionamento de ressonância plasmônica como bio-sensores. Em seu estudo Liedberg utilizou um método prático para excitar plamons de superfície. Esse método sugerido por Kretschmann em 1971

consiste em propagar a luz através de um prisma, onde à uma das faces é aplicada uma película de metal. A excitação de SPP's ocorre a partir da reflexão total da luz na interface prisma-metal [16] como é mostrado na FIG 06.

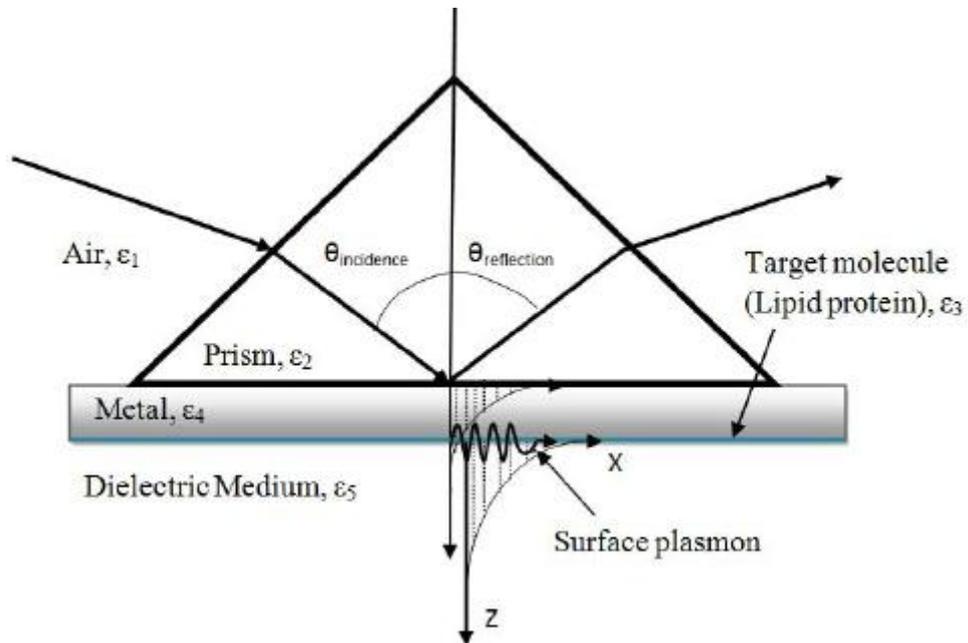


FIG 6 Representação esquemática da configuração de Kretschmann [16].

Jorgenson e Yee [17] construíram em 1993 o primeiro sensor SPR (*Surface Plasmon Resonance*) baseado em fibra óptica. O trabalho era a substituição do prisma (configuração de Kretschmann) pela fibra óptica. O elemento sensor da fibra consistia na remoção de uma seção da casca da fibra e conseqüente deposição de um filme metálico sobre o núcleo. A interação da luz guiada na fibra com os elétrons da superfície metálica permitia a geração dos SPP's. Nesse experimento alguns parâmetros de sensoriamento como alteração do índice de refração do meio e espessura da película metálica foram determinados pela medição da distribuição espectral da luz transmitida pela fibra. Este tipo de sensor de fibra ótica baseado em SPP's é capaz de apresentar uma alta sensibilidade a variações diminutas do índice de refração e com um curto tempo de resposta [18].

O ponto central da tecnologia de geração e transmissão de SPP's reside na possibilidade de construir dispositivos fotônicos de dimensões bem menores que o comprimento de onda da luz, conforme discutido em [14]. Como será discutida mais adiante neste texto, a excitação de SPP's é obtida mediante a estruturação de uma interface entre dois meios cujas partes reais das permissividades possuem sinais opostos, o que é tipicamente alcançado empregando um condutor e um dielétrico [19].

Apesar da plasmônica ter sido aplicada inicialmente em grande parte na faixa óptica ela também pode auxiliar na implementação ou aperfeiçoamento de dispositivos em faixas espectrais mais baixas. Um grande exemplo disso é a utilização de SPP's na construção de guias de onda para a faixa de THz. A justificativa para tal fim se deve a essa tecnologia possuir grande potencial em imagem, espectroscopia, sensoriamento, segurança, comunicações [20,21,22]. Os níveis de perdas e dispersão obtidos permitem o projeto de guias de onda práticos em THz [23].

As principais configurações de guias de onda em THz utilizando SPP's são fibras microestruturadas com inclusões metálicas e fibras tipo "D", cobertas com película condutora [24]. Também há estudos que incluem o revestimento residual complementar da fibra [25], a combinação de várias camadas de metal [26], a utilização de uma sobre camada, colocada depois do metal [24, 25, 26], entre outros. Nestes casos, o objetivo é a diminuição das perdas, redução da dispersão, além de aumentar a sensibilidade para aplicações em sensoriamento.

1.3 – Objetivos

A plasmônica é a tecnologia que explora como campos eletromagnéticos podem ser confinados em dimensões menores que o comprimento de onda da luz. Esse processo é baseado na interação entre fótons presentes na luz e elétrons livres presentes em superfícies metálicas, fazendo com que haja um forte confinamento da potência em uma região diminuta.

Através dessa tecnologia visamos obter perdas menores do material e diminuir o efeito da dispersão cromática em fibras microestruturadas para guiamento em THz.

Neste trabalho são investigadas como SPP's podem auxiliar na obtenção de guias de onda em THz com baixas perdas e dispersão reduzida. A análise dessas estruturas é realizada através do programa comercial COMSOL [27], o qual utiliza o método dos elementos finitos (FEM) para realização de simulações computacionais.

2 DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE FIBRAS MICROESTRUTURADAS PARA GUIAMENTO EM THz

Neste capítulo será apresentado o objeto de estudo deste trabalho, os tipos de estruturas estudados, material utilizado para confecção dessas estruturas e suas características para guiamento na faixa de THz. Após isso, será apresentado o método numérico utilizado para obtenção dos resultados e as equações que são resolvidas no software utilizado. Por fim serão reproduzidos resultados apresentados por [2] que confirmam a avaliação numérica feita pelo programa.

2.1 Guias de onda para faixa THz

Um guia de ondas é um dispositivo usado para transportar as ondas eletromagnéticas de um ponto a outro, e preferencialmente, sem perdas significantes na intensidade quando as ondas permanecem confinadas próximo ao eixo de propagação. A FIG 7 demonstra típicos guias de onda metálicos também utilizados em THz capazes de transportar altas taxas de potência. Um dos principais desafios das tecnologias de guias convencionais de onda THz são as altas perdas por absorção, o que dificulta a transmissão de ondas THz por longas distâncias [28].

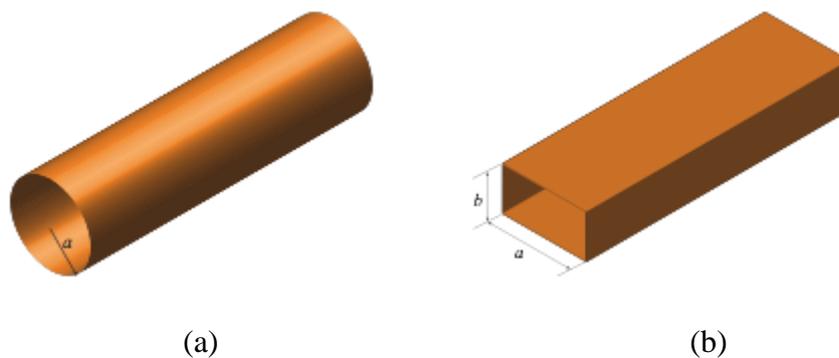


FIG 7 Guias de onda convencionais metálicos (a) circular (b) retangular [29].

Além de guias metálicos para guiamento em THz, temos a utilização de guias confeccionados com dielétricos como é o caso das fibras, guias cilíndricos que confinam a luz no interior do núcleo como é mostrado na FIG 8. Essa estrutura usualmente é constituída de um núcleo envolvido por uma casca, seja ela o ar ou outro material com índice de refração menor do que o núcleo. Entretanto, como os guias de onda metálicos, a atenuação das ondas THz em fibras dielétricas é elevada devido a absorção do material no guia [2].

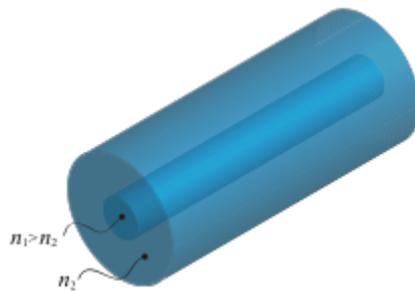


FIG 8 Esquemático de uma fibra óptica onde $n_1 > n_2$ [29].

Uma forma de contornar os problemas de altas perdas por absorção recai na utilização de fibras especiais, como é o caso das fibras porosas ou microestruturadas. Esse tipo de fibra é bastante utilizado para guiamento em THz uma vez que com que parte da potência é guiada dentro dos buracos de ar, diminuindo assim as perdas por absorção no dielétrico.

Numa fibra microestruturada para guiamento em THz, os buracos de ar estão na escala micrométrica. A escolha de uma rede periódica na seção transversal da fibra tem o significado prático de reduzir a dispersão do sinal na estrutura. No entanto, materiais dielétricos comumente utilizados na construção de fibras ópticas apresentam um perfil de perdas relevante na região de THz. Assim, uma alternativa considerada como viável para a implementação de fibras microestruturadas para THz é a utilização de polímeros. Estes materiais tem a funcionalidade de dar melhor suporte mecânico para as perfurações impressas na fibra, além de proporcionar um certo grau de redução nas perdas [30].

2.1.1 Parâmetros físicos das fibras

Esta subseção apresenta os conceitos acerca dos fenômenos que ocorrem na propagação de ondas em fibras. A teoria é baseada nos conceitos das fibras convencionais que também se aplicam integralmente as fibras microestruturadas [31].

2.1.1.1 Modos guiados e índice efetivo

Um modo é uma configuração de campo eletromagnético ou padrão de distribuição de energia que se propaga sem mudanças ao longo do comprimento de uma fibra. Assim, essa distribuição de intensidade é inalterada pela sua propagação. Na presença de perda, o formato da distribuição de intensidade não muda, mas a magnitude total diminui. Cada modo tem uma velocidade fase v_{ph} associada ao índice efetivo n_{eff} do modo que é dado por:

$$n_{eff} = \frac{c}{v_{ph}}, \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. A constante de propagação β é uma característica do modo guiado e se relaciona ao índice efetivo da seguinte forma:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = k n_{eff} = \frac{\omega}{c} n_{eff}, \quad (2)$$

onde λ é o comprimento de onda, k é o número de onda e ω é a frequência angular. O índice efetivo é uma constante de propagação normalizada com respeito à constante de propagação da onda no vácuo. A constante de propagação, assim como o índice efetivo, podem ser representadas por números complexos, onde a parte real carrega a informação sobre a propagação da onda e a parte imaginária representa o termo de perda de amplitude em função da distância propagada [2,31].

Os modos podem ser classificados como guiados, de radiação, evanescentes e vazantes dependendo da sua constante de propagação. Os modos guiados e de radiação apresentam

constante de propagação real, o que permite que eles se propaguem infinitamente na ausência de perdas. Por outro lado, modos evanescentes e vazantes possuem constante de propagação complexa, a qual, faz com que eles se propaguem por longas distâncias mas decaiam exponencialmente em taxas determinadas pela parte imaginária dessa constante [31]. Todos esses modos são suportados, em princípio, pelas fibras convencionais, embora na maioria dos casos apenas os modos guiados e os modos de radiação sejam relevantes [31].

2.1.1.2 Número de modos

Uma das características mais importantes de um guia de ondas é o número de modos suportados pela estrutura. Assim como em fibras convencionais, o número de modos guiados em fibras THz pode ser estimado, aproximadamente por [31]:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (3)$$

onde a é o raio do núcleo, λ é o comprimento de onda, e n_{co} e n_{cl} são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente. O índice de refração médio da casca de uma fibra microestruturada pode ser determinado aplicando-se o método de elementos finitos vetorial a uma célula elementar da casca com arranjo periódico de furos, que age como um meio de propagação sem fronteiras. Em particular, se $V < 2,405$ a fibra de núcleo circular suporta somente um par de modos fundamentais ortogonais degenerados, caracterizando uma fibra monomodo. Para valores elevados de V , o número total de modos pode ser aproximado por [31]:

$$N_{modos} \sim \frac{1}{2} V^2, \quad (4)$$

2.1.1.3 Perda efetiva do material (Effective material loss – EML)

A absorção material é causada pela interação da onda eletromagnética com as moléculas do material do guia de onda. As perdas no regime óptico dependem do grau de pureza do material do guia de onda, quanto maior o grau de pureza menor será a perda por absorção material. Entretanto, no regime THz, não existem muitos materiais especialmente desenvolvidos para serem utilizados em guias de onda, portanto, uma maneira de diminuir a absorção material é reduzir a fração de potência dentro do material dielétrico do núcleo [32].

Uma forma de estimar precisamente a atenuação causada pela absorção do material, é utilizar o resultado da teoria de perturbação onde a perda efetiva do modo fundamental pode ser expressa por [33]:

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha_{mo}}{\alpha_{mat}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{\int_{mat} n_{mat} |E|^2 dA}{|\int_{all} S_z dA|}, \quad (6)$$

onde α_{eff} representa a perda efetiva da fibra, α_{mo} a perda do modo fundamental, α_{mat} é a perda por absorção do material, n_{mat} é o índice de refração do material, ϵ_0 e μ_0 são respectivamente a permissividade e a permeabilidade do espaço livre e s_z é o vetor de poynting da região analisada.

2.1.1.4 Fração de potência

A fração de potência nos fornece a distribuição de potência no plano transversal à direção de propagação z , ou seja, a fração de potência total que se propaga nas regiões do núcleo e da casca. Para os guias de onda THz é de extrema importância fazer com que a maior parte da potência seja guiada no ar, devido à alta absorção dos polímeros nessa faixa de frequência. Portanto, a fração de potência no material do núcleo é calculado por [33]:

$$P_F = \frac{P_{núcleo}}{P_{total}} = \frac{\int_{Anúcleo} S_z dA}{\int_{Atotal} S_z dA} \quad (7)$$

onde a representa o diâmetro do núcleo e S_{z1} e S_{z2} são os componentes z do vetor de Poynting, dentro (região do núcleo) e fora (região da casca) da fibra, respectivamente. Também se usa essa aproximação para calcular a fração de potência nos furos presentes no núcleo de fibras THz microestruturadas.

2.1.1.5 Dispersão Cromática

A variação da velocidade de grupo de um sinal com o comprimento de onda, chamada de chamada Dispersão de Velocidade de Grupo (*GVD – Group Velocity Dispersion*) [41], tem como efeito a distorção temporal do sinal, o que pode levar a interferências intersimbólicas e degradar a informação transmitida em uma fibra. Esta é a principal fonte de atraso em fibras monomodo. Como depende apenas do comprimento de onda, é dita cromática; entretanto, pode ser dividida em dispersão material e dispersão de guia de onda como é mostrado na equação a seguir [23].

$$D = D_m + D_{go} = \frac{2}{c} \frac{dn_{eff}}{d\omega} + \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\omega^2} \quad (8)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo, $\omega = 2\pi f$, n_{eff} é o índice de modo efetivo. D_{go} é a dispersão do guia de onda que ocorre apenas no caso particular de estar no modo fundamental, ainda assim as componentes espectrais sofrem uma pequena variação de propagação. Já D_m é a dispersão material, na qual, em fibras monomodo é a maior contribuição para atraso dos sinais em regime linear. Ela se deve não só a impurezas presentes no material, que vão também contribuir para atenuação, como a própria reação do material ao campo EM, fazendo com que as componentes espectrais tenham diferentes índices de propagação.

Ainda da equação (8), se D for inferior à zero, diz-se que o meio tem dispersão positiva ou normal, e neste caso as componentes de frequências mais elevadas propagam-se

de uma forma mais lenta relativamente as frequências mais baixas, causando assim um espalhamento do sinal de luz no tempo. Quando D for superior à zero, considera-se então que o meio tem dispersão negativa ou anômala, sendo que neste caso são as componentes de alta frequência a propagarem-se mais rapidamente. A importância deste parâmetro, em conjunto com a atenuação, reside na determinação de regiões espectrais propícias para guiamento onde a dispersão nula é acompanhada por baixas perdas.

2.2 Equacionamento do COMSOL Multiphysics

Neste trabalho, utilizou-se o software comercial COMSOL *Multiphysics* para as análises numéricas dos modos de propagação e das perdas de confinamento. Esse software utiliza o método dos elementos finitos (*FEM – Finite element method*), o qual, consiste em discretizar o domínio do problema em subdomínios menores, mantendo as mesmas propriedades do meio original [27].

Esta seção fornece o equacionamento que o software COMSOL utiliza para compreensão das características da radiação THz e sua interação com materiais. A estrutura básica da teoria quântica é utilizada para descrever as excitações elementares nas frequências THz [37].

2.2.1 Propagação eletromagnética THz

O software COMSOL utiliza as equações de *Maxwell*, um conjunto de equações que indicam as relações entre as grandezas eletromagnéticas fundamentais, para analisar as características das ondas THz. A forma macroscópica das equações de *Maxwell* são:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f, \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (12)$$

onde ρ_f e \mathbf{J}_f são a densidade de carga livre e a densidade de corrente livre. \mathbf{D} e \mathbf{H} são as densidades de campo elétrico e campo magnético, respectivamente, e \mathbf{E} e \mathbf{B} são o campo elétrico e o campo magnético, respectivamente. Os campos macroscópicos \mathbf{D} e \mathbf{H} são relacionados com os campos fundamentais \mathbf{E} e \mathbf{B} por:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon \mathbf{P}, \quad (13)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}, \quad (14)$$

onde ε_0 e μ_0 são, respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no espaço livre. A polarização \mathbf{P} e a magnetização \mathbf{M} contem as informações sobre as propriedades eletromagnéticas da matéria. Além disso, os símbolos ε e μ referem-se a forma mais geral da permissividade e da permeabilidade.

As equações (13) e (14) podem ainda serem compactadas utilizando as relações constitutivas:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (16)$$

Outra importante relação constitutiva corresponde à relação entre a densidade decorrente de condução e o campo elétrico, definida por meio da condutividade σ .

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (17)$$

Examinando as equações de Maxwell, e levando em consideração a ausência de excitações externas, obtêm-se a equação de onda do campo elétrico combinando as equações rotacionais (11) e (12):

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}, \quad (18)$$

No domínio da frequência (18) e expressa por:

$$\mathbf{K}(\mathbf{K} \cdot \mathbf{E}) - |\mathbf{K}|^2 \mathbf{E} = -\varepsilon(\mathbf{K}, \omega) \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E} \quad (19)$$

onde $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ é a velocidade da luz no vácuo.

Existem dois casos em que (19) deve ser discutida dependendo da polarização do vetor campo elétrico. O primeiro, no caso de ondas transversais, onde $\mathbf{K} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}$, a relação de dispersão resulta em:

$$|\mathbf{K}|^2 = \varepsilon(\mathbf{K}, \omega) \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (20)$$

E o segundo para ondas longitudinais, na qual (22) resulta em:

$$\varepsilon(\mathbf{K}, \omega) = 0 \quad (21)$$

isto significa que oscilações coletivas longitudinais podem ocorrer somente em frequências que correspondem aos zeros da função dielétrica.

É demonstrado detalhadamente por [38] a existência de uma estreita relação entre σ e ε , na qual fenômenos eletromagnéticos envolvendo metais possam ser descritas usando ambas as quantidades. Em baixas frequências prefere-se modelar metais por meio da condutividade, enquanto que, para frequências mais altas, emprega-se a permissividade elétrica. As considerações feitas das relações constitutivas até agora se referem ao caráter local dos

fenômenos, porém, quando tratamos de meios dispersivos que apresentam dispersão temporal e/ou espacial, devemos levar em conta efeitos não locais no espaço e no tempo. Partindo disto, podemos expressar \mathbf{D} como a convolução expressa por:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_0 \int dt' d\mathbf{r}' \varepsilon(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t - t') \mathbf{E}(\mathbf{r}', t') \quad (22)$$

Aplicando a transformada de Fourier em (22), e convertendo-a para uma multiplicação no domínio da frequência, temos que, para uma determinada frequência ω e vetor de onda \mathbf{K} , (22) torna-se:

$$\mathbf{D}(\mathbf{K}, \omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{K}, \omega) \mathbf{E}(\mathbf{K}, \omega). \quad (23)$$

Utilizando as equações (13) e (23), e a partir da lei da conservação da carga, sabendo que $\mathbf{J} = \partial \mathbf{P} / \partial t$, chega-se finalmente na relação entre a função dielétrica entre ε e a condutividade σ :

$$\varepsilon(\mathbf{K}, \omega) = 1 - \frac{j\sigma(\mathbf{K}, \omega)}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega} \quad (24)$$

na qual j é a unidade imaginária e a transformada de Fourier empregada supõe variação harmônica $\varepsilon^{j\omega t}$. No capítulo 3 será apresentado a função dielétrica para meios dispersivos.

2.3 Polímeros Especiais

As características de sólidos na região de THz dependem de diferentes mecanismos físicos, diferente do que ocorre em outras faixas do espectro. Efeitos de cargas livres, por exemplo, são extremamente fortes. Alguns vidros comumente usados na região óptica são inúteis para faixa de THz devido as suas perdas dielétricas intrínsecas serem muito altas. Entretanto, alguns materiais são altamente transparentes em THz [28].

Vários polímeros estão sendo utilizados para guiamento em THz, como por exemplo, polimetilmetacrilato (*PMMA*), policarboneto (*PC*), poliestireno (*PS*), polietileno de alta densidade (*HDPE*), politetrafluoretileno (*PTFE*), Zeonex, Topas, entre outros. A TABELA 1 apresenta as principais características desses materiais na frequência de 1 THz.

Polímero	Índice de Refração	Absorção (1THz)	Temperatura de transição vítrea - Tg	Observações
<i>PMMA</i>	1,60	60 dB/cm	115 °C	Polímero mais utilizado na óptica, alta absorção de água
<i>PC</i>	1,65	50 dB/cm	150 °C	Alta temperatura Tg e alto índice de refração
<i>PS</i>	1,59	0.1 dB/cm	100 °C	Alto índice de refração
<i>Zeonex</i>	1,52	0.9 dB/cm	138 °C	Transparente para THz, baixa absorção de água
<i>Topas</i>	1,52	0.9 dB/cm	80 °C	Transparente para THz, baixa absorção de água
<i>PTFE</i>	1,42	1.3 dB/cm	(160-240) °C	Utilizado em altas frequências
<i>HDPE</i>	1,53	1.3 dB/cm	-135 °C	Utilizado em altas frequências

TABELA 1 Características de polímeros na frequência de 1THz (adaptado de [29]).

Os materiais *Zeoenex* e *Topas* estão sendo muito utilizados por apresentarem índice de refração com valor em torno de 1,52 e são, praticamente livres de absorção de água. A FIG 9 apresenta o índice de refração de alguns polímeros utilizados para aplicações na faixa de THz.

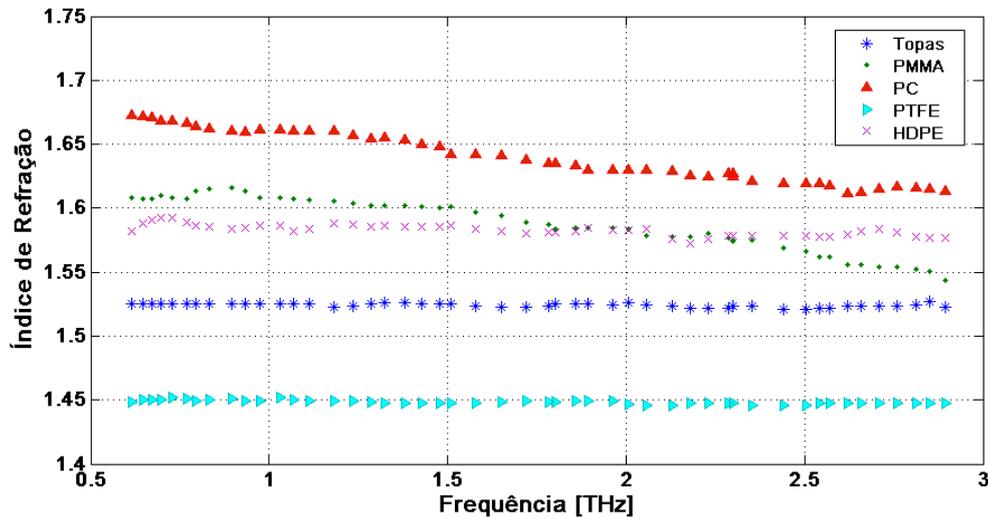


FIG 9 Índice de refração para diferentes polímeros em frequências THz [34].

Por apresentar características promissoras para guiamento em THz, como baixa absorção, além de, índice efetivo constante na janela de THz analisada, o material utilizado nas simulações deste trabalho foi o *Topas*. Na próxima seção serão apresentados resultados, já analisados por [2], para avaliação numérica de fibras THz.

2.4 Avaliação Numérica de Fibras Terahertz

Esta seção tem por objetivo aferir o programa desenvolvido no COMSOL, apresentando os resultados numéricos de dois tipos de fibras para aplicações em THz, fibra do tipo *microwire* e fibra porosa já estudados por [2]. Essa parte do trabalho então, visa comparar os resultados obtidos com os resultados já existentes afim de avaliar o grau de confiabilidade do programa.

O domínio de simulação utilizado foi de dez vezes maior que o maior comprimento de onda de operação. Para truncamento do domínio da simulação, utilizou-se uma condição de

contorno de dispersão (*Scattering Boundary Condition – SBC*) onde as ondas passam por esse truncamento sem sofrer reflexão. Em ambas as simulações, *microwire* e fibra porosa, utilizou-se o material *Topas* com índice de refração de $n_{topas} = 1,52$ e considerou-se o índice de refração do ar $n_{ar} = 1$.

2.4.1 Microwires

O termo *microwire* é usado para descrever fibras dielétricas com diâmetro da ordem de micrometros em frequências THz e que possuem propriedades de guiamento similares aos *nanowires* para aplicações em fotônica [2].

Esse tipo de fibra é a mais simples estrutura de fibra THz e pode ser útil para transmissão em curtas distâncias. O núcleo da fibra é o próprio polímero e a casca é o ar que a circunda como é mostrado na FIG 10.

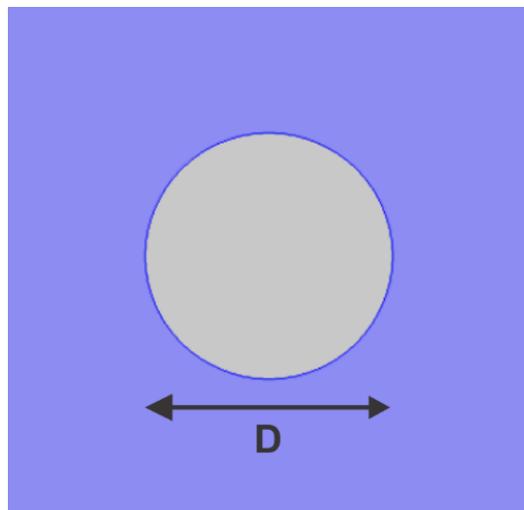
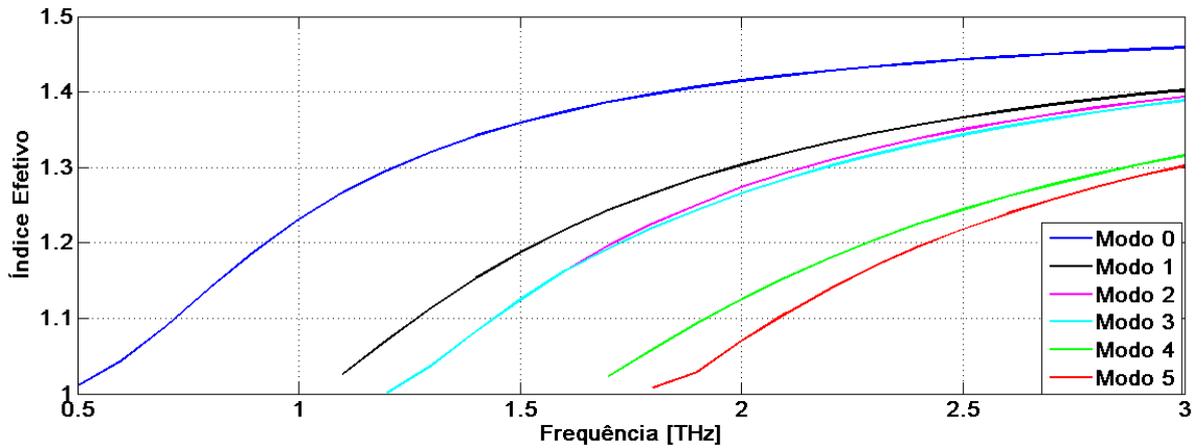


FIG 10 Secção transversal do microwire com diâmetro D.

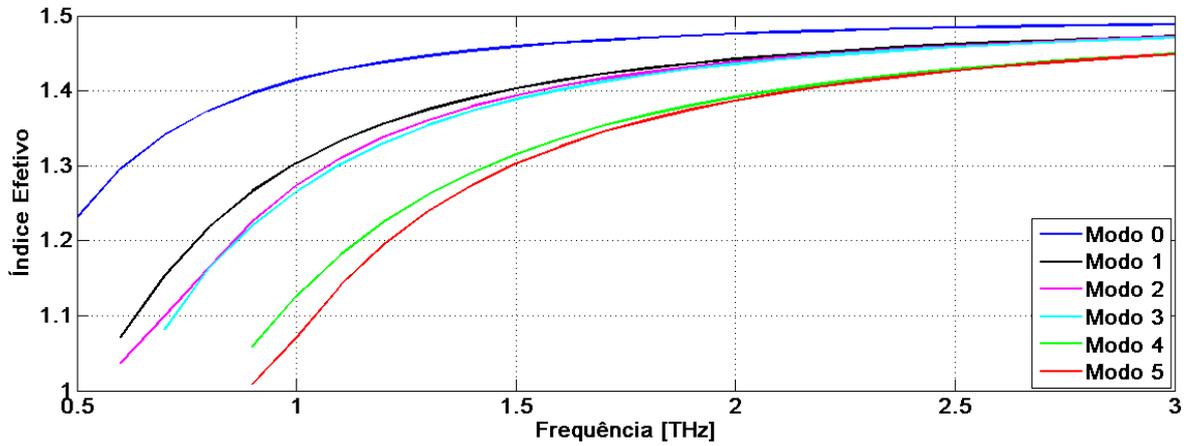
Para os *microwires*, assim como os *nanowires*, existem dois regimes de operação, ou seja, confinamento forte ou fraco. Na faixa de frequência de THz (λ entre 30 e 3000 μm) é observado um aumento do fenômeno de campo evanescente para *microwires* com ($D \ll$

$\lambda_{\text{operação}}$), confinamento fraco, dependendo do material utilizado [30]. Neste trabalho são estudadas fibras operando no regime de confinamento forte ($D \geq \lambda_{\text{operação}}$) onde a maior parte da propagação ocorre dentro do polímero.

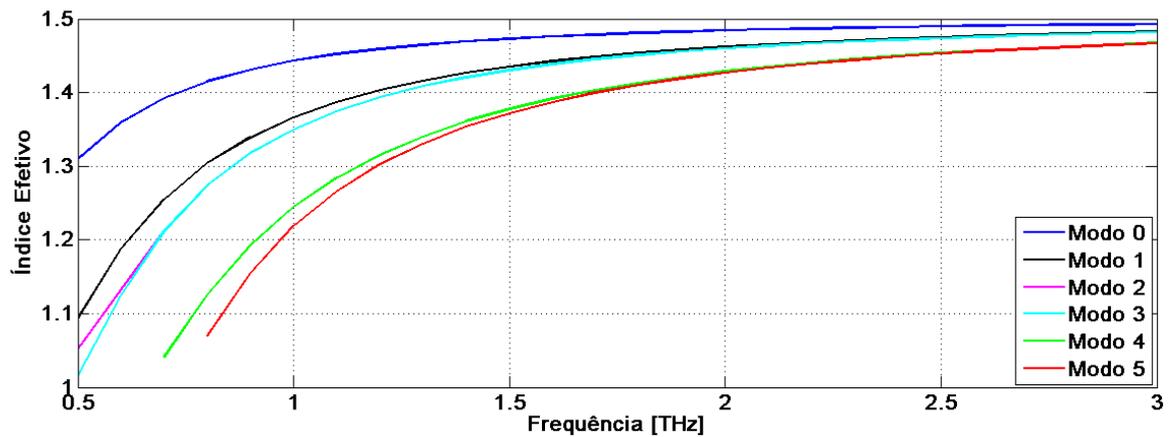
A FIG 11 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de dispersão dos modos suportados pelos microwires com diâmetro de $500\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$ respectivamente.



(a)



(b)



(c)

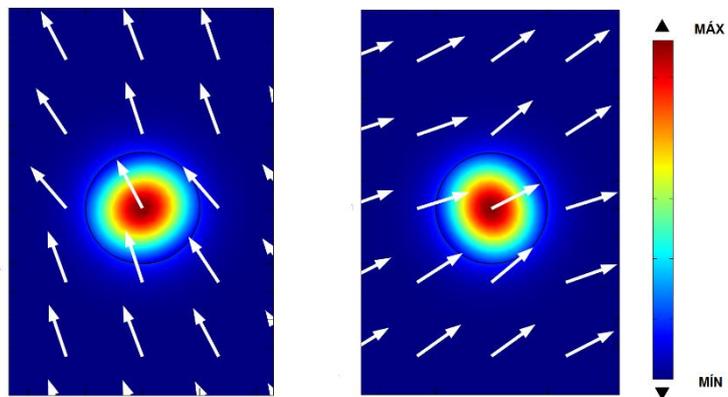
FIG 11 Curvas de dispersão dos modos suportados pelo microwire de (a)500µm, (b)400µm e (c)200µm de diâmetro em função da frequência.

Como é possível notar, a condição de propagação monomodo é mais facilmente obtida no microwire de 500µm e para frequências mais baixas. Isso se deve ao fato de que, grande parte da potência modal, está sendo transmitida no ar, ou seja, os modos de ordem mais elevadas deixam de ser guiados, fazendo com que apenas o modo fundamental se propague, assim como demonstrado em [35].

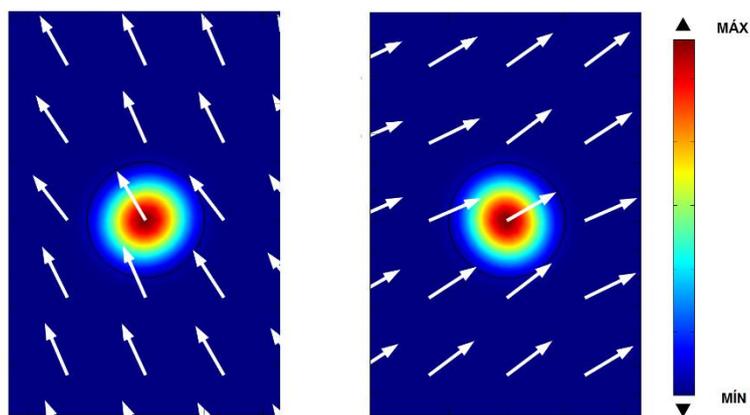
2.4.1.1 Distribuição de campo elétrico e de potência modal

Como visto anteriormente, o *microwire* suporta vários modos de propagação, porém, os resultados a seguir são apenas para o modo fundamental. Como em uma fibra convencional, existem duas polarizações ortogonais para o modo fundamental. A distribuição de campo é a mesma para as duas polarizações, porém sua orientação (setas brancas) possui 90° de rotação, isto é, os modos são degenerados como para um guia de onda perfeitamente circular. A FIG 12 apresenta a distribuição de potência para as duas polarizações do modo fundamental de um *microwire* de 200µm. É possível notar que para baixas frequências esse *microwire* apresenta alto campo evanescente na região de ar. Já na FIG 13, *microwire* de 400µm, a potência modal está confinada no polímero, mesmo para baixas frequências,

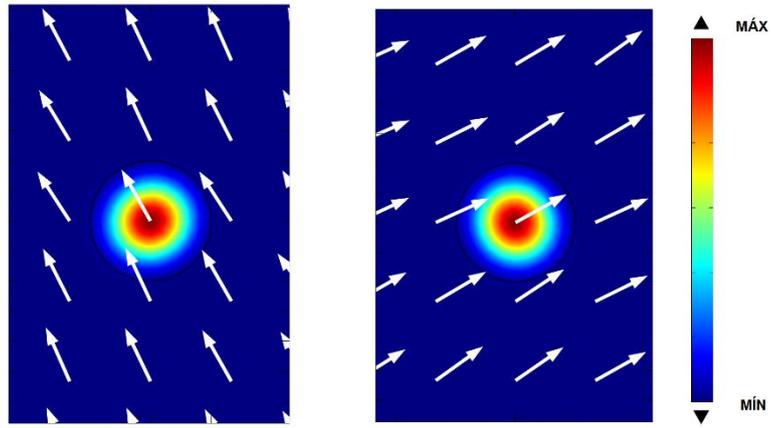
justificado pelo tamanho do comprimento de onda que é próximo da dimensão do *microwire* [35].



(a)

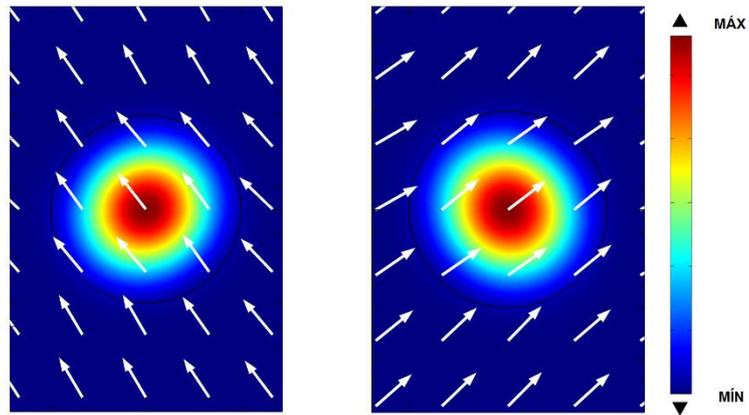


(b)

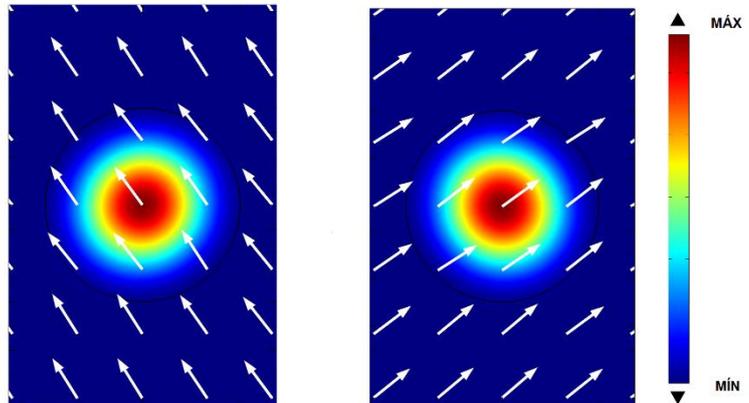


(c)

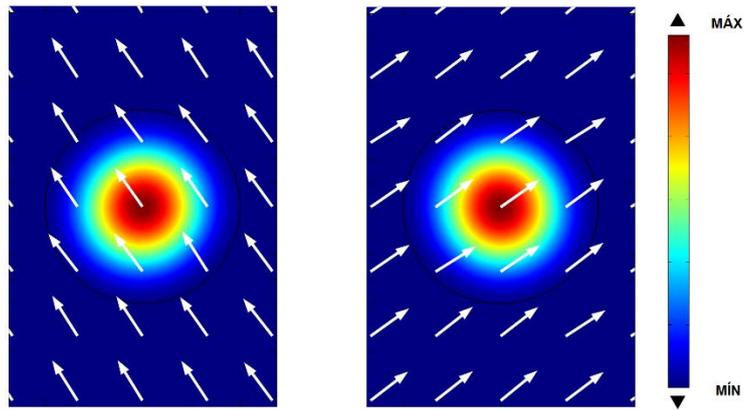
FIG 12 Distribuição de potência modal normalizada e componentes de campo elétrico (setas brancas) para as polarizações do modo fundamental do microwire de 200um nas frequências de (a) 1 THz, (b) 2 THz e (c) 3 THz.



(a)



(b)



(c)

FIG 13 Distribuição de potência modal normalizada e componentes de campo elétrico (setas brancas) para as polarizações do modo fundamental do microwire de 400μm nas frequências de (a) 1 THz, (b) 2 THz e (c) 3 THz .

2.4.1.2 Fração de potência

A fração de potência especifica a quantidade de potência núcleo ou em outras regiões da fibra, em razão da potência total, como descrito pela equação (7).

Na FIG 14 é mostrada a fração de potência no núcleo (polímero) e na FIG 15 as frações de potência na casca para diferentes diâmetros de *microwires* em função da frequência. Na FIG 15 nota-se que a fração da potência no núcleo é praticamente unitária para *microwires* com grande diâmetro. Isto indica que a fração de potência na casca é praticamente zero, uma vez que $\frac{P_{casca}}{P_{total}} = 1 - \frac{P_{núcleo}}{P_{total}}$. Nota-se, em baixas frequências, que diminuindo o diâmetro dos *microwires* há uma significativa redução da fração de potência no núcleo, que é o complementar ao aumento da potência na casca, como mostrado na FIG 15. Isto indica que parte da potência modal penetra na região da casca em diâmetros menores causando um confinamento fraco do modo na estrutura.

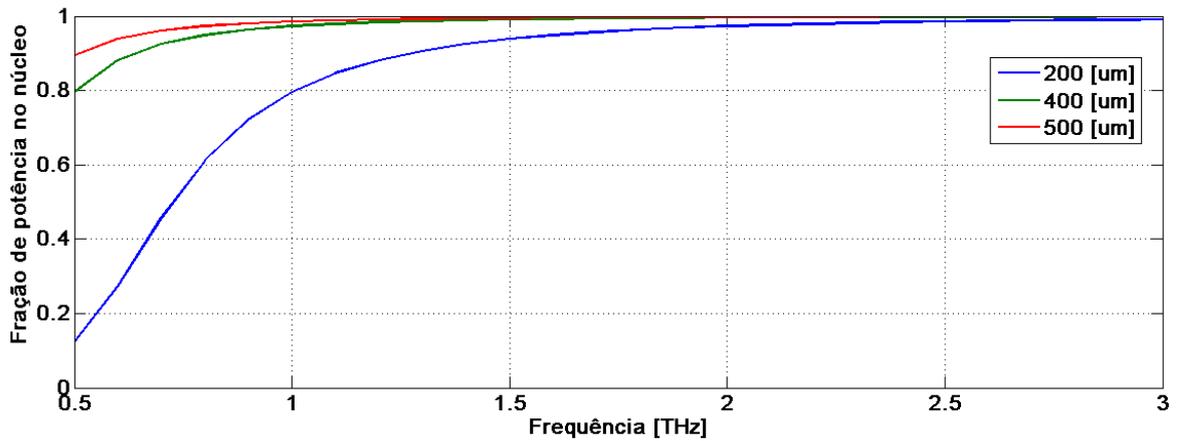


FIG 14 Fração de potência no núcleo (polímero) dos microwires em função da frequência.

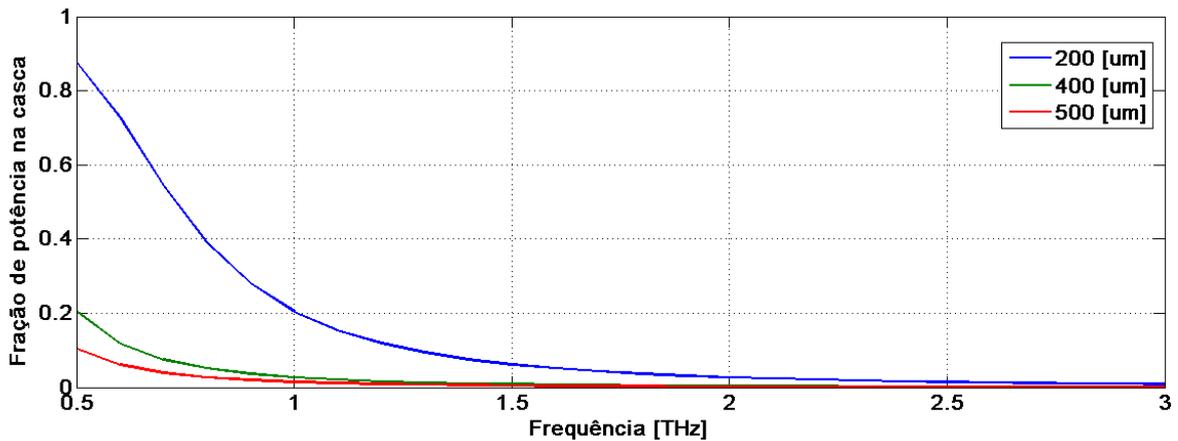


FIG 15 Fração de potência na casca (ar) dos microwires em função da frequência.

2.4.1.3 Perda por absorção

Nesta subseção foi avaliada a perda por absorção associada ao *microwire*. As perdas estão diretamente ligadas com a distribuição de potência modal, portanto, quanto maior a potência modal confinada na região do polímero, maiores serão as perdas por absorção. Na FIG 16 é apresentada a perda por absorção para os *microwires* em estudo. O coeficiente de absorção do material utilizado Topas é da ordem de $0,9\text{dB/cm}$ em toda faixa THz de estudo.

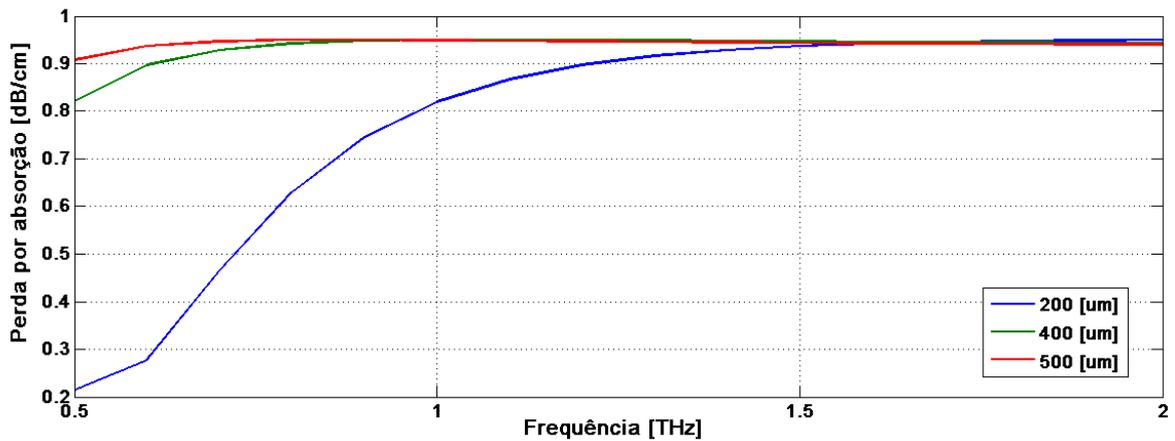


FIG 16 Perda por absorção dos microwires de Topas para 200,400 e 500um de diâmetro.

Como é possível notar, a perda por absorção do guia é da mesma ordem de grandeza do coeficiente de absorção do material utilizado.

2.4.2 Fibras porosas

As fibras porosas são um tipo especial de fibra. Neste trabalho, a fibra porosa é considerada como sendo um núcleo sólido de polímero com um arranjo periódico de furos preenchidos de ar e de dimensão menor que o comprimento de onda de operação. Para caracterizar as fibras microestruturadas, é necessário definir seus parâmetros físicos e geométricos. Conforme a FIG 17, tais parâmetros geométricos são: o diâmetro dos buracos de ar d o espaçamento entre os buracos de ar adjacentes Λ conhecido como *pitch*. E o parâmetro físico é o índice de refração do material (cor azul) η_m .

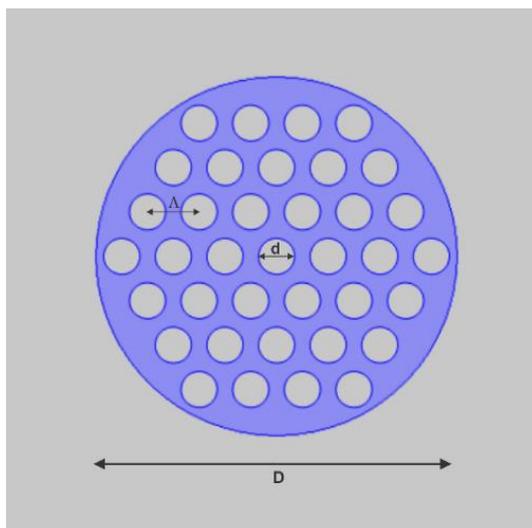


FIG 17 Esquemático de uma fibra porosa e seus parâmetros geométricos d , D e Λ .

Assim como nos *microwires*, o mecanismo de guiamento nas fibras porosas é o de reflexão interna total. Como resultado do fraco confinamento modal na estrutura, o campo está susceptível a qualquer pequena perturbação na superfície ou vizinhança da fibra. Essas perturbações causam vazamento da potência guiada [2]. Nessas fibras, baixas perdas são alcançadas quando a maior parte do campo propaga-se nas regiões de ar, situação na qual as perdas das onda THz são reduzidas.

O tamanho de cada capilar, assim como a distância entre eles, ou seja, a geometria na qual eles estão configurados tem influência direta nos parâmetros de funcionamento da fibra, como por exemplo, dispersão, fração de potência, perda efetiva do material e parâmetros não lineares. Na análise das fibras porosas fixou-se o valor de $D = 440\mu\text{m}$, $\Lambda = 37.31\mu\text{m}$ e variou-se diferentes razões de d/Λ . Apenas o modo fundamental da fibra porosa foi analisado, uma vez que, esse modo apresenta a maior potência guiada de cada estrutura. A FIG 18 apresenta a fibra microestruturadas analisada nessa seção assim como as diferentes razões de d/Λ .

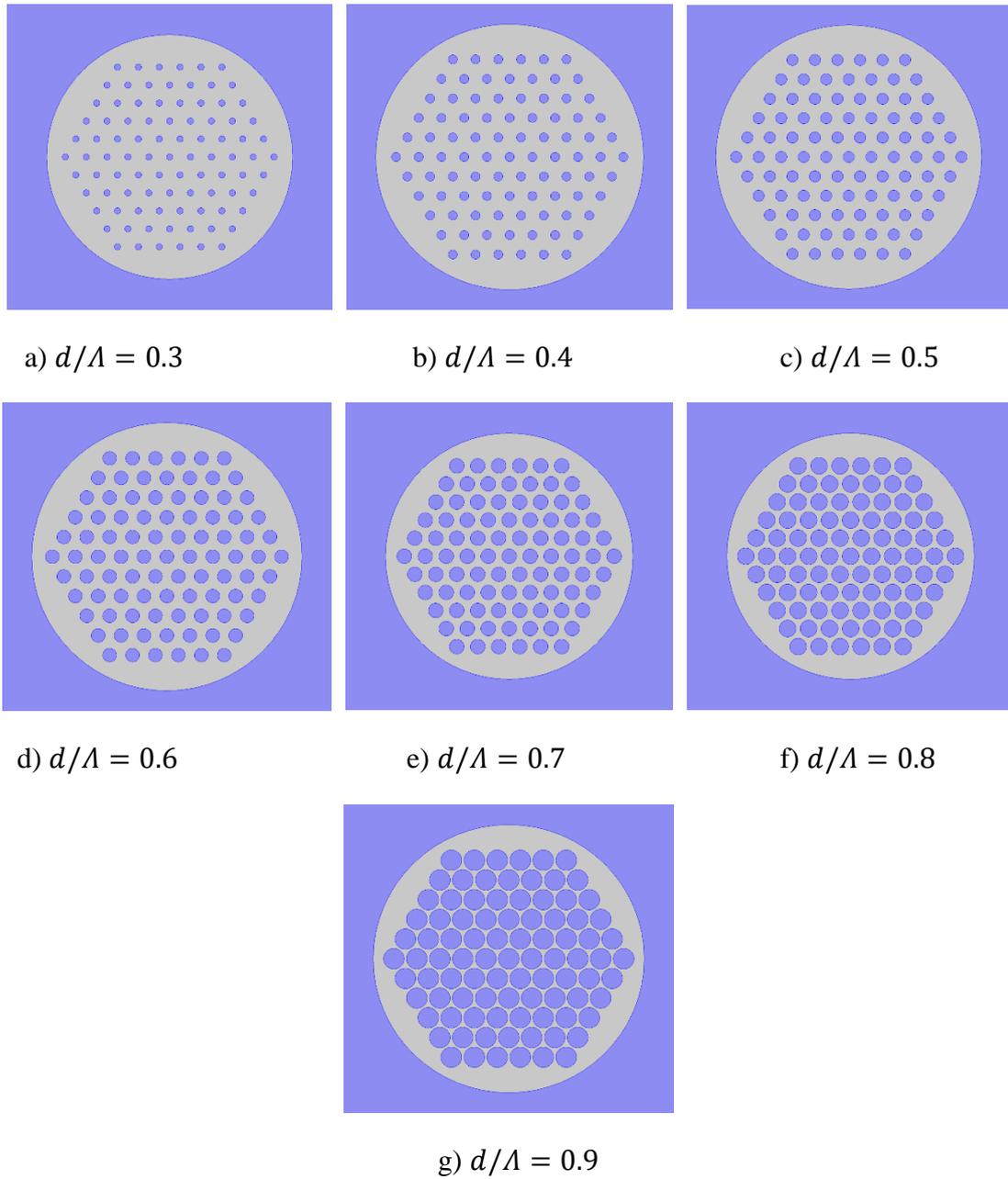
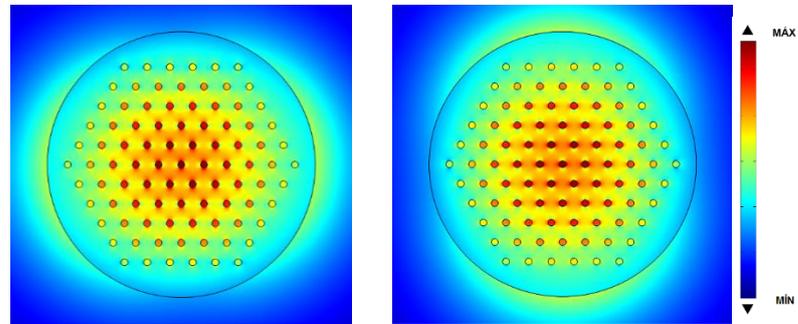


FIG 18 Fibras microestruturadas com diferentes razões de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9 e suas diferentes porosidades, p .

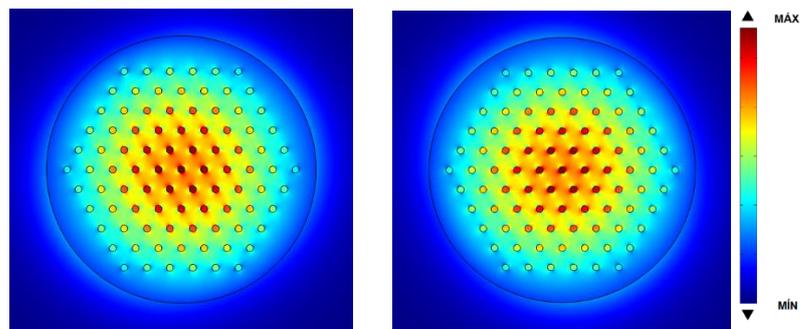
2.4.2.1 Potência Modal

As FIG 19, 20 e 21 ilustram o perfil de distribuição de potência modal para o modo fundamental da fibra porosa para diferentes fatores de preenchimento e diferentes valores de frequência. Devido aos furos de ar possuírem diâmetro menor que o comprimento de onda de

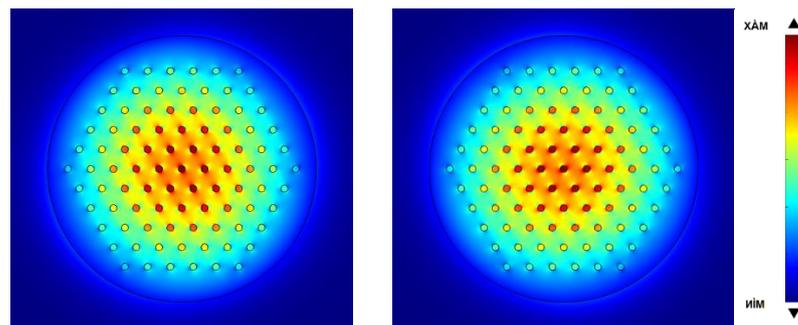
operação, a potência modal é deslocada para a região da casca e dos furos de ar. O perfil de potência muda conforme a frequência aumenta, fazendo com que a potência fique mais confinada no núcleo da fibra.



(a)

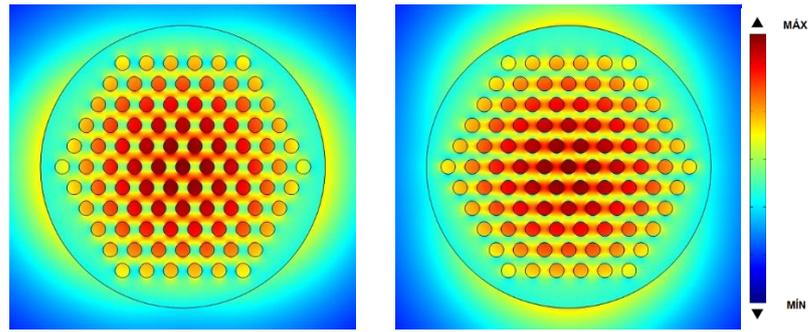


(b)

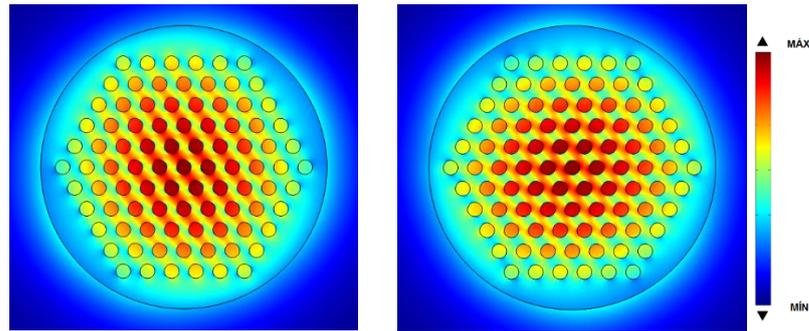


(c)

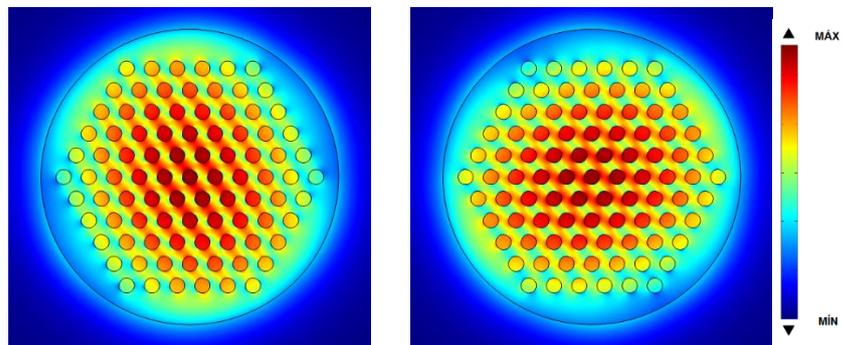
FIG 19 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)

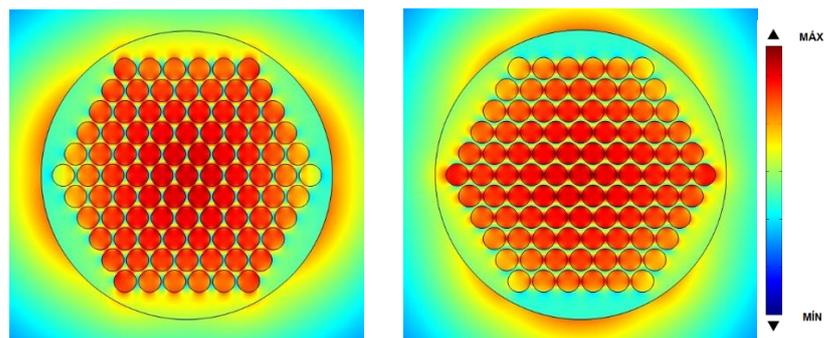


(b)

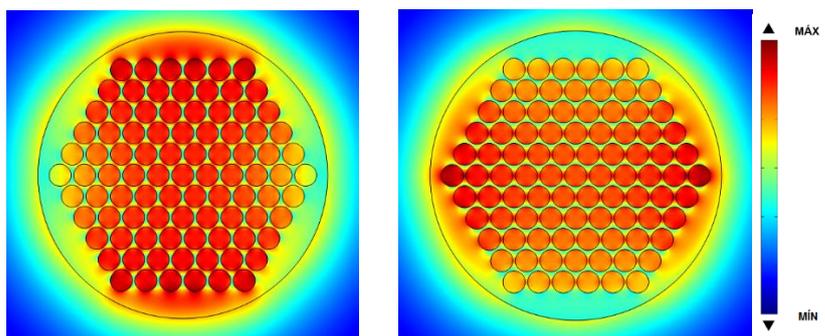


(c)

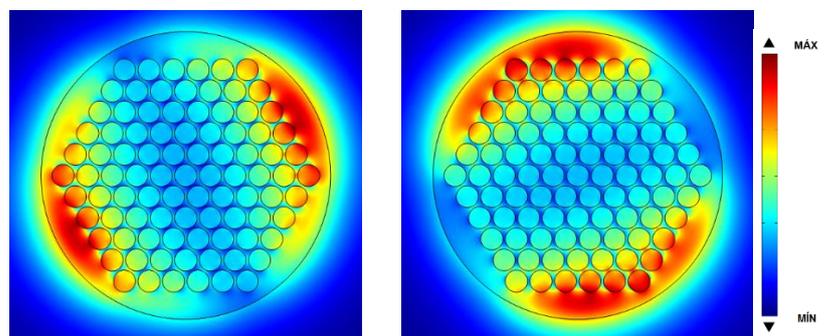
FIG 20 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)



(b)



(c)

FIG 21 Distribuição de potência modal normalizada as polarizações do modo fundamental da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].

2.4.2.2 Índice efetivo

A FIG 22 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa com diâmetro externo de $440\mu\text{m}$ variando o fator de preenchimento d/Λ . A distância entre os furos foi mantida constante em $37,31\mu\text{m}$ e o diâmetro dos furos foi alterado para que as razões de 0,3,

0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 0,9 fossem alcançadas. Quanto maior a fração de ar presente no núcleo do polímero (maior porosidade), menor sera o valor de n_{eff} para toda a faixa de frequência.

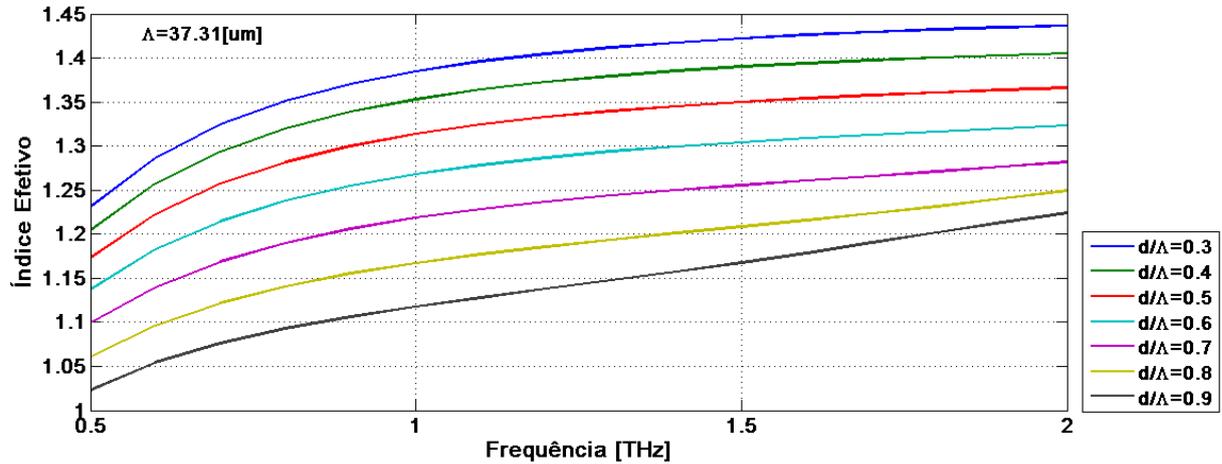


FIG 22 Índices efetivo das fibras microestruturadas com $\Lambda=37.31[\mu\text{m}]$ e vários valores de d/Λ .

2.4.2.3 Fração de potência

Nas FIG 23, FIG 24 e FIG 25 são mostradas as frações de potência no material (polímero), nos furos de ar, e na casca. Observa-se que as frações nos furos de ar aumentam quando a razão d/Λ também aumenta. Quando $d/\Lambda = 0,8$ ou $0,9$, porosidade de 49% e 61% respectivamente, nota-se que não há elevada discrepância entre o valor máximo de preenchimento modal nos furos de ar. Entretanto é possível ver que $d/\Lambda = 0,9$ a queda da potência de preenchimento começa logo depois de atingir o máximo, em 1,3 THz, enquanto para $d/\Lambda = 0,8$ começa em 1,7 THz. Isto ocorre pelo aumento da potência no polímero.

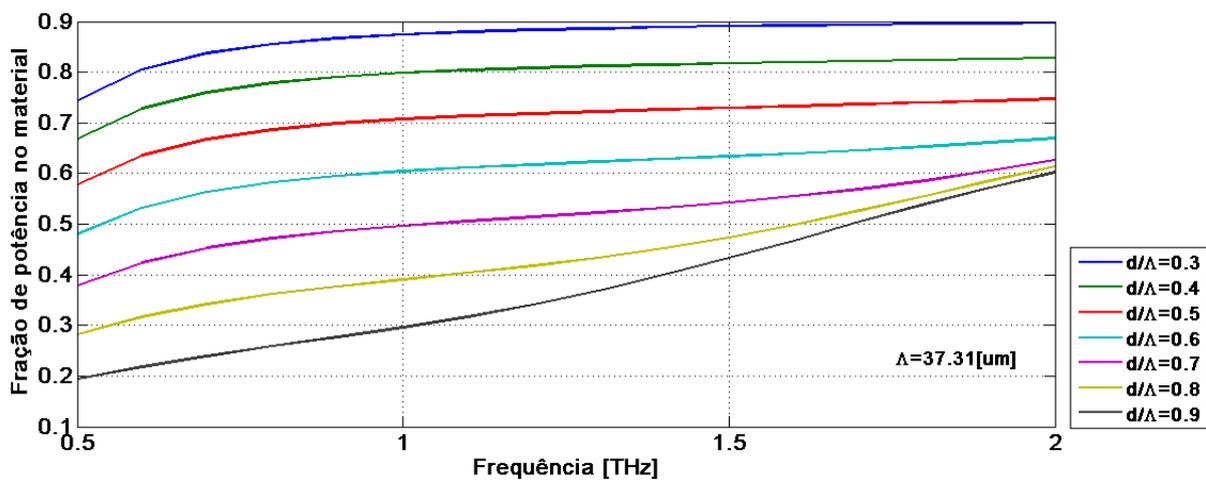


FIG 23 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

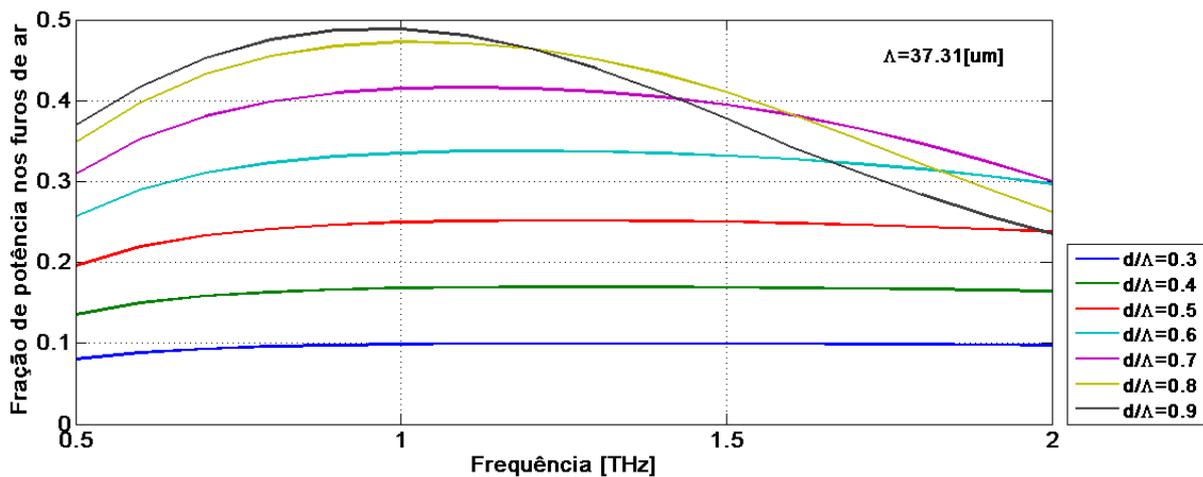


FIG 24 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

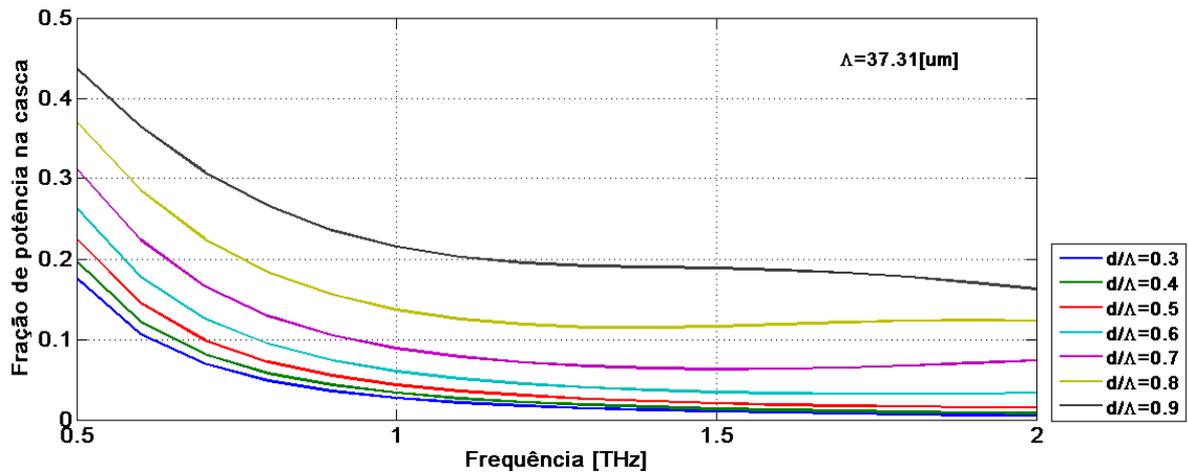


FIG 25 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra microestruturada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

2.4.2.4 Perda efetiva do material (EML)

Geralmente, quando o índice efetivo do modo é muito menor que o índice do material a sobreposição entre as ondas THz e o material com absorção é significativamente reduzida [2]. Assim quanto maior a razão de d/Λ , menores serão as perdas por absorção. Na FIG 26 é apresentada a perda efetiva do material (*effective material loss – EML*) da fibra porosa com diferentes fatores de preenchimento, considerando o coeficiente de absorção do Topas (0,9dB/cm). Em comparação com as fibras *microwires* essa fibra apresenta as menores perdas efetivas, da ordem de 0,4dB/cm para um fator de preenchimento de $d/\Lambda = 0,9$.

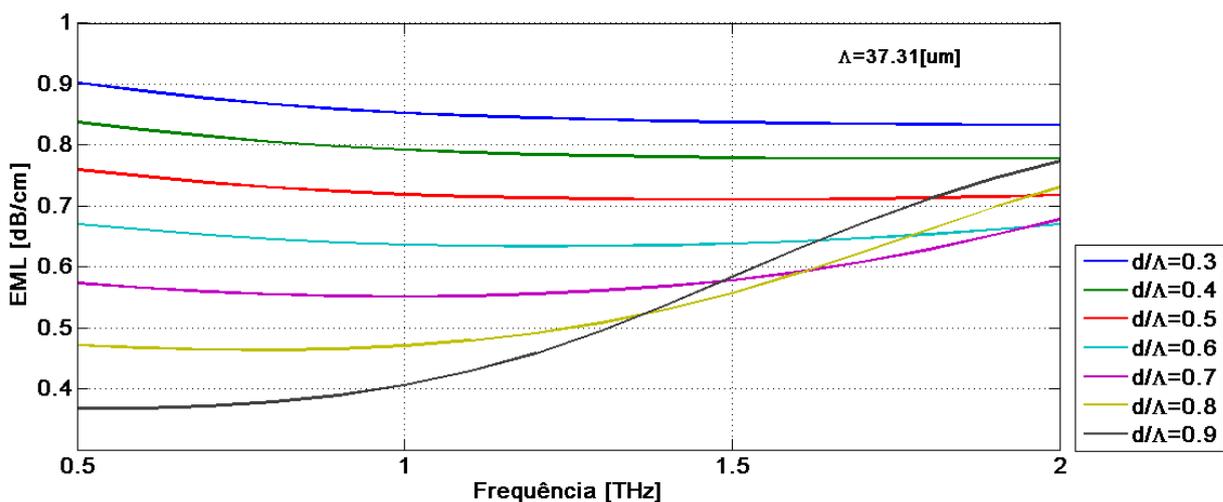


FIG 26 Perda efetiva do material da fibra microestruturada confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

2.4.2.5 Dispersão Cromática (β_2)

Na FIG 27 é apresentada as curvas de dispersão cromática para diversos valores de preenchimento. Nota-se que para todos os casos estudados apresenta-se uma banda plana entre 0,5 e 1,5 THz aproximadamente, essa região de dispersão nula é apropriada para guiamento em casamento com uma estrutura que forneça baixa perda efetiva.

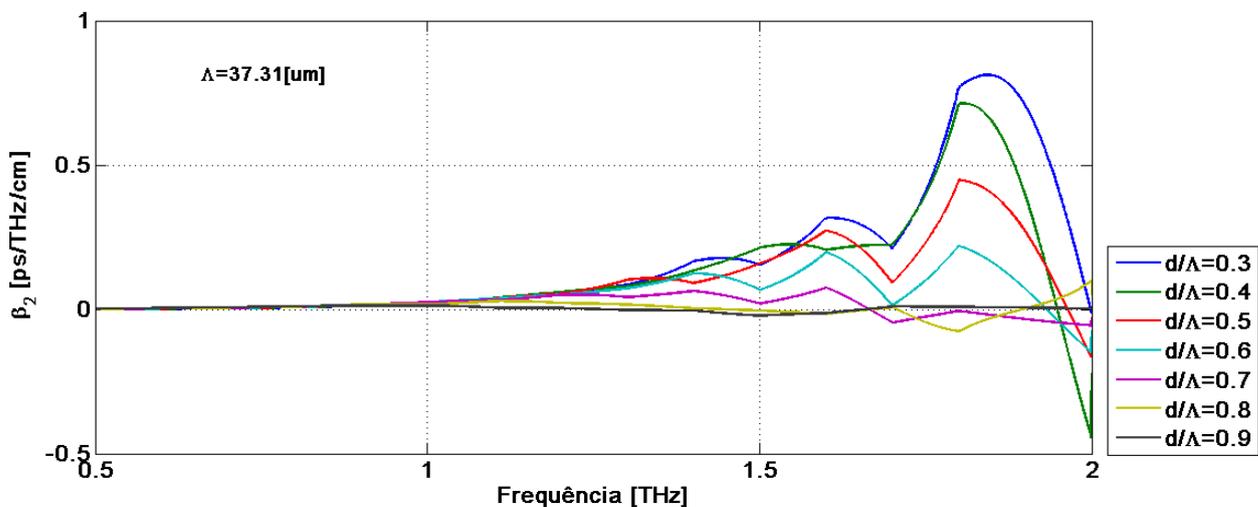


FIG 27 Dispersão cromática da fibra microestruturada confeccionado com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3 FIBRAS ESPECIAIS PARA GUIAMENTO EM THz

Neste capítulo são estudados algumas configurações de fibras especiais e suas características para guiamento na faixa de THz. Na primeira seção é apresentada uma fibra porosa semelhante a apresentada em 2.5.2, porém, com um defeito central. Na segunda seção são investigados quais os impactos, oriundos do acoplamento dos modos da fibra com os SPP's, quando colocado um anel de ouro na periferia do seu defeito central, o mesmo estudo de características de guiamento é realizado, para enfatizar o impacto da tecnologia plasmônica nesse guia de onda.

Na terceira seção é feito o estudo de uma fibra porosa em configuração tipo D com defeito central, e em seguida o estudo de uma estrutura já conhecida na faixa óptica, fibra porosa tipo D com defeito central e uma fina película de ouro em sua face plana [37], porém, redimensionada para que permitisse o guiamento na faixa de THz.

Por fim, apresentamos uma fibra porosa tipo D com defeito central é uma fina película de ouro depositada na periferia do seu orifício central, afim de, apresentar características de guiamento em THz mais promissoras.

3.1 Fibra Porosa com defeito central

Nesta subseção apresenta-se a fibra porosa cuja configuração foi apresentada na FIG 17, porém, no local do furo central de ar e do anel de furos adjacentes a ele é colocado um furo de ar com diâmetro maior que os demais da fibra. Essa quebra de periodicidade da fibra porosa faz com que o mecanismo de guiamento da fibra não seja mais por reflexão interna total, mas sim por bandas proibidas.

Da mesma forma que existem bandas de energia proibida para elétrons, em cristais naturais, existem também bandas de energia proibida para fótons em cristais fotônicos, onde determinadas frequências de propagação para esses fótons não são permitidas [39]. Portanto, além de funcionar com um guia de onda THz as estruturas apresentadas a seguir também podem ser utilizadas como filtros dessa faixa espectral.

A FIG 28 apresenta um esquemático da fibra porosa com defeito central, a região cinza é o dielétrico Topas e a região azul o ar, o valor do diâmetro da fibra é $D = 440\mu m$, e a distância entre os furos menores adjacentes $\Lambda = 37.31\mu m$, já o furo central de ar possui diâmetro $d' = 40\mu m$, por fim, variou-se os valores do diâmetro dos furos de ar d para alcançar diferentes razões de d/Λ como mostrado na FIG 29.

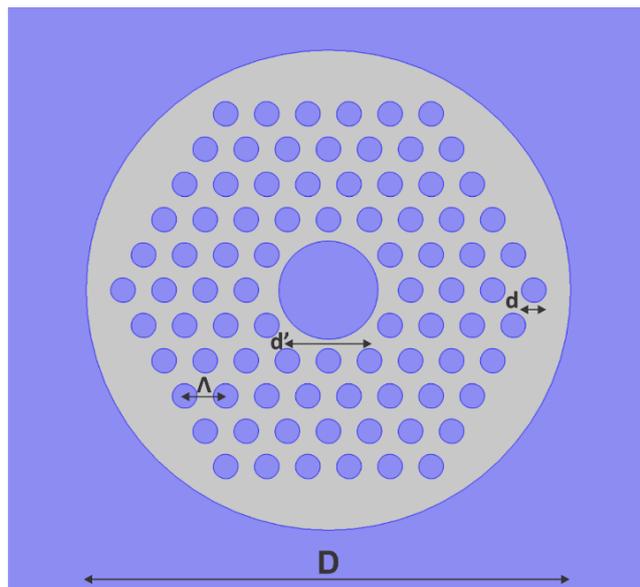
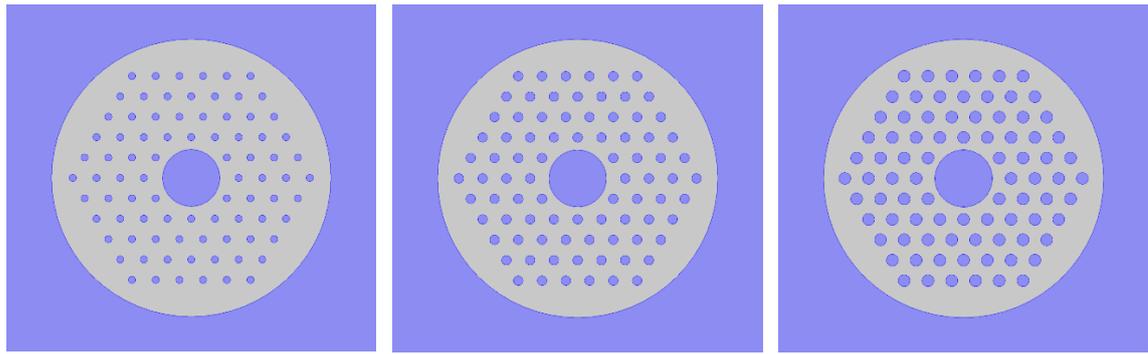


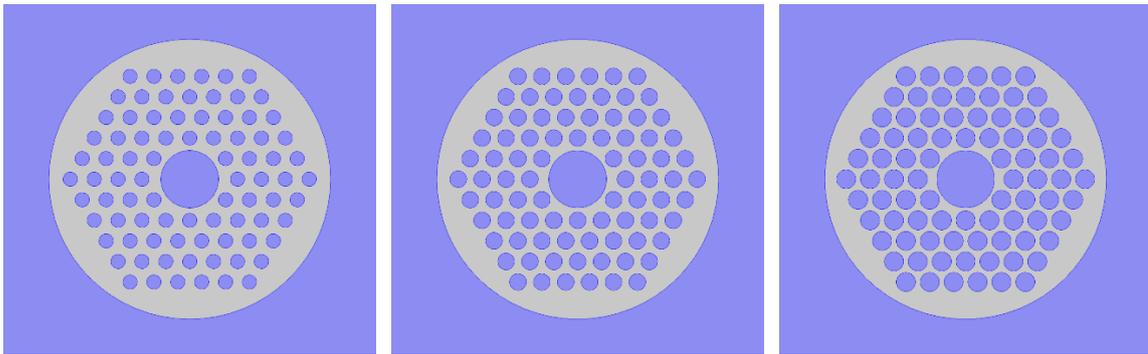
FIG 28 Esquemático da fibra porosa com defeito central de diâmetro $d'=40\mu m$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu m$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu m$.



a) $d/\Lambda = 0.3$

b) $d/\Lambda = 0.4$

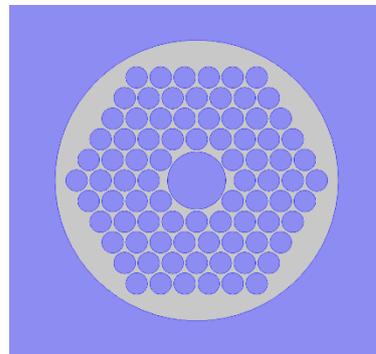
c) $d/\Lambda = 0.5$



d) $d/\Lambda = 0.6$

e) $d/\Lambda = 0.7$

f) $d/\Lambda = 0.8$



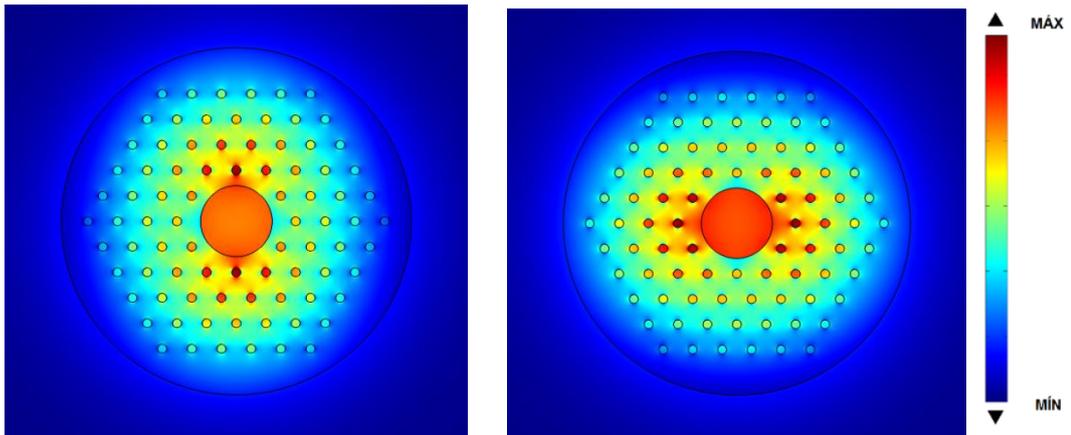
g) $d/\Lambda = 0.9$

FIG 29 Fibra porosa com defeito central de diâmetro $d'=40 \mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31 \mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440 \mu\text{m}$. de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.

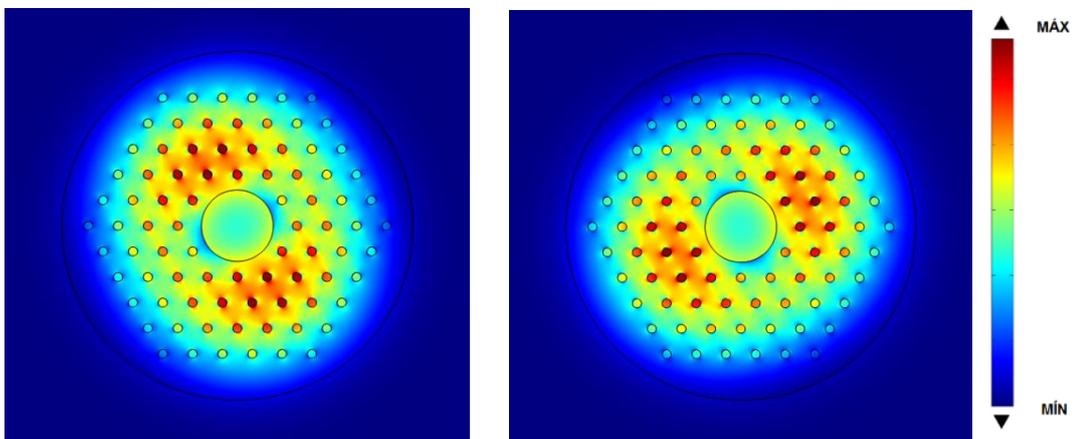
3.1.1 Potência modal

As FIG 30, 31 e 32 ilustram o perfil de distribuição de potência modal para o modo fundamental da fibra porosa com defeito central para diferentes fatores de preenchimento e

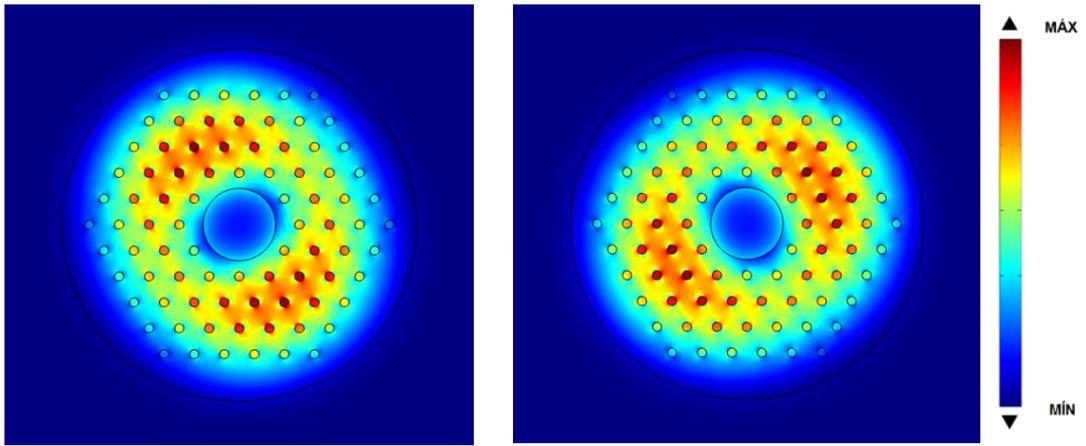
diferentes valores de frequência. O perfil de potência muda conforme a frequência aumenta, em frequências mais baixas a maior parte da potência se acumula no furo de ar central, já em frequências mais altas a potência tende a ficar nos furos menores de ar e grande parte na casca, aumentando assim as perdas por absorção.



(a)

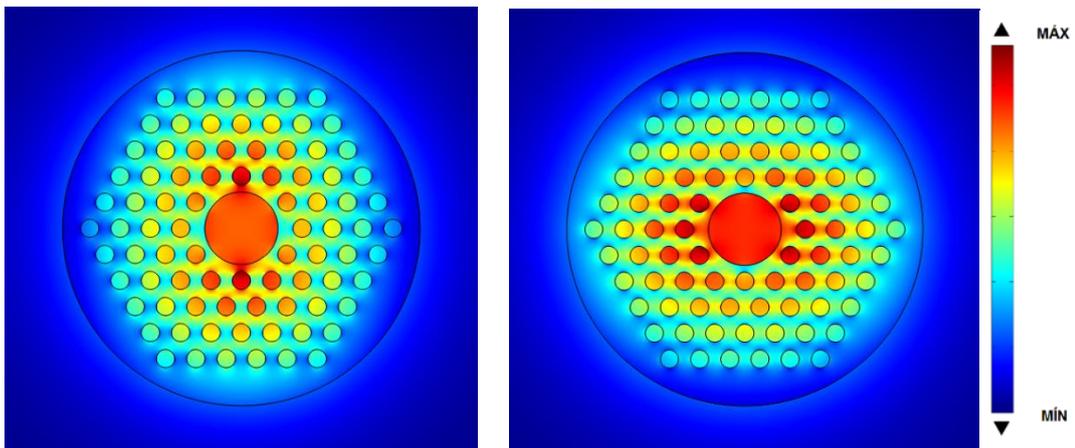


(b)

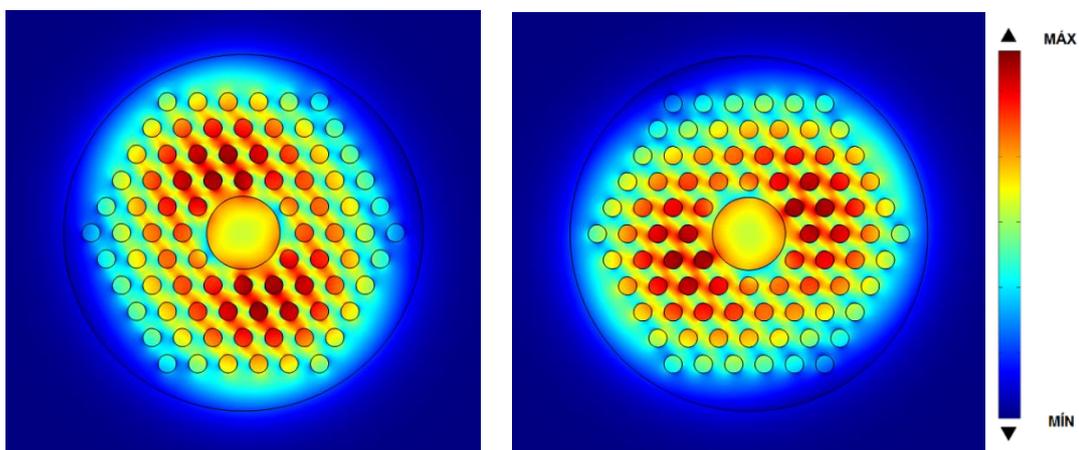


(c)

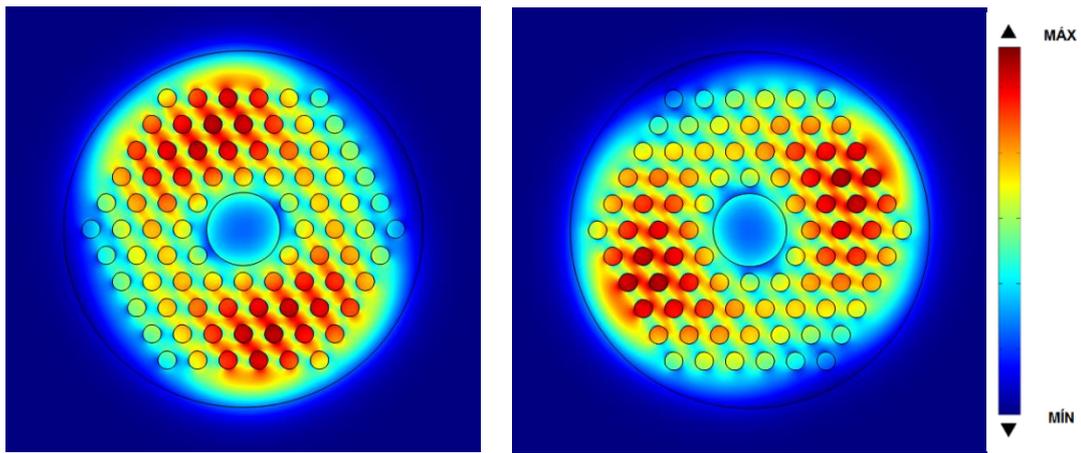
FIG 30 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)

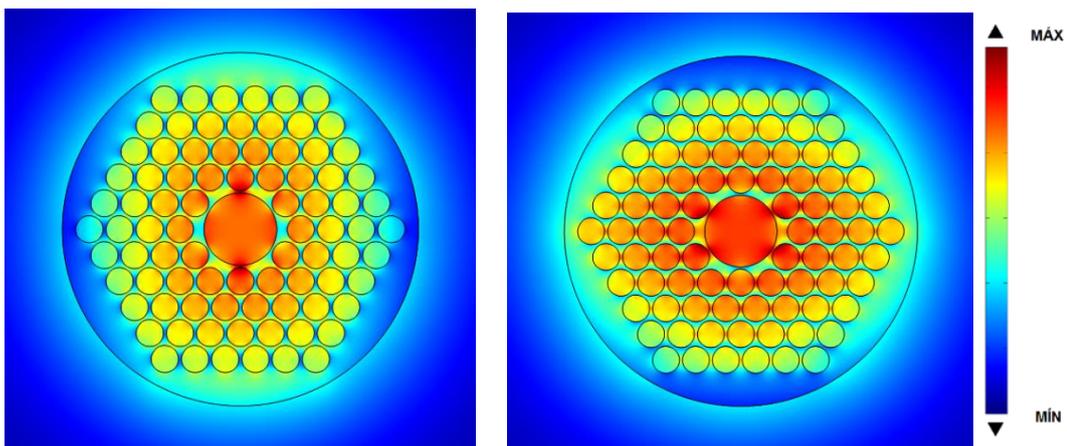


(b)

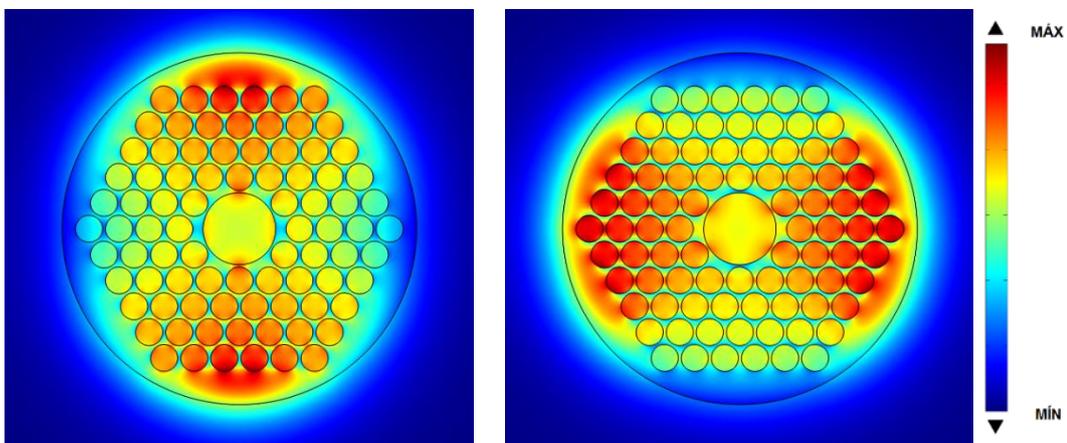


(c)

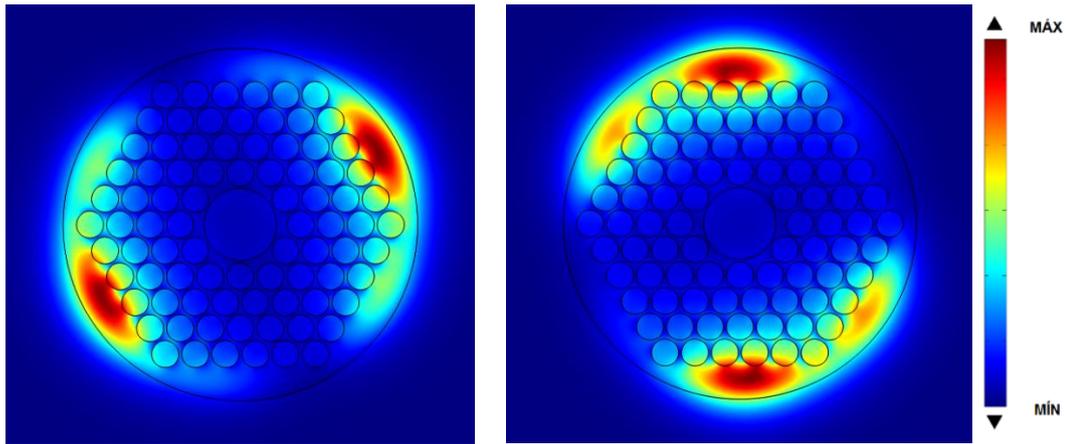
FIG 31 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)



(b)



(c)

FIG 32 Distribuição de potência modal normalizada das polarizações do modo fundamental da fibra porosa com defeito central com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].

3.1.2 Índice efetivo

A FIG 33 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa de defeito central variando o fator de preenchimento d/Λ para diferentes frequências. A distância entre os furos foi mantida constante em $37.31\mu m$ e o diâmetro dos furos foi alterado para que as razões de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 e 0.9 fossem alcançadas. Quanto maior for o fator de preenchimento de ar na fibra (maior porosidade), menor é o valor de n_{eff} para toda a faixa de frequência.

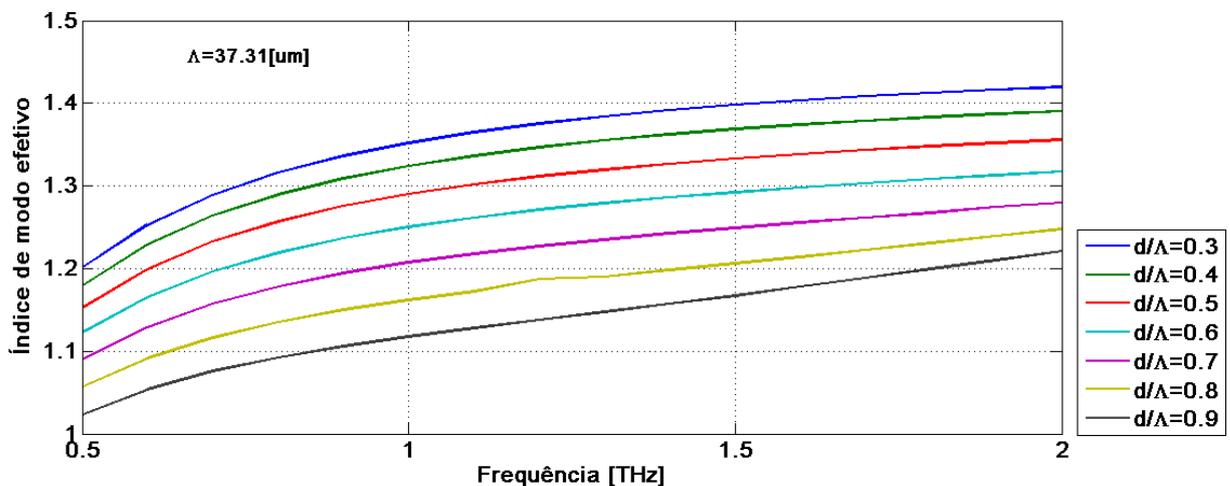


FIG 33 Índices efetivos das fibras microestruturadas de defeito central com $\Lambda=37.31[\mu m]$ e vários valores de d/Λ .

3.1.3 Fração de potência

Nas FIG 34, FIG 35 e FIG 36 são mostradas as frações de potência no material (polímero), nos furos de ar, e na casca (região de ar que circunda a estrutura), respectivamente. Observa-se que as frações de potência nos furos de ar aumentam quando a razão d/Λ também aumenta. Nos fatores $d/\Lambda = 0.8$ ou $d/\Lambda = 0.9$, nota-se que não há elevada discrepância entre o valor máximo de preenchimento modal nos furos de ar, entretanto, é possível notar que conforme aumenta a frequência há uma queda na potência guiada nos furos de ar. Para esses dois casos o máximo valor de potência guiada nos furos de ar ocorre em 1 [THz], após isso, a potência começa a vazar para o polímero, aumentando por sua vez as perdas por absorção.

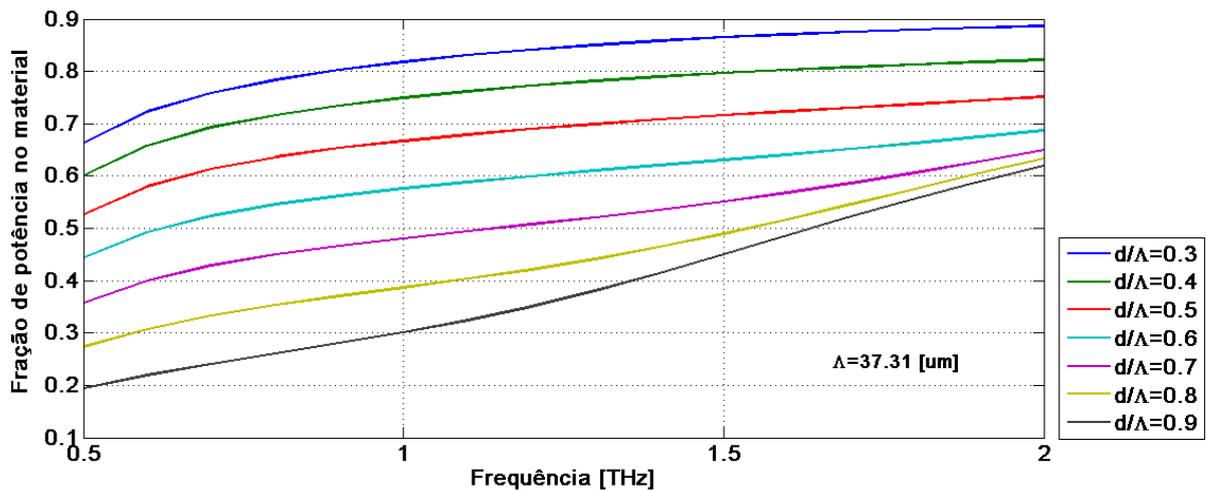


FIG 34 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

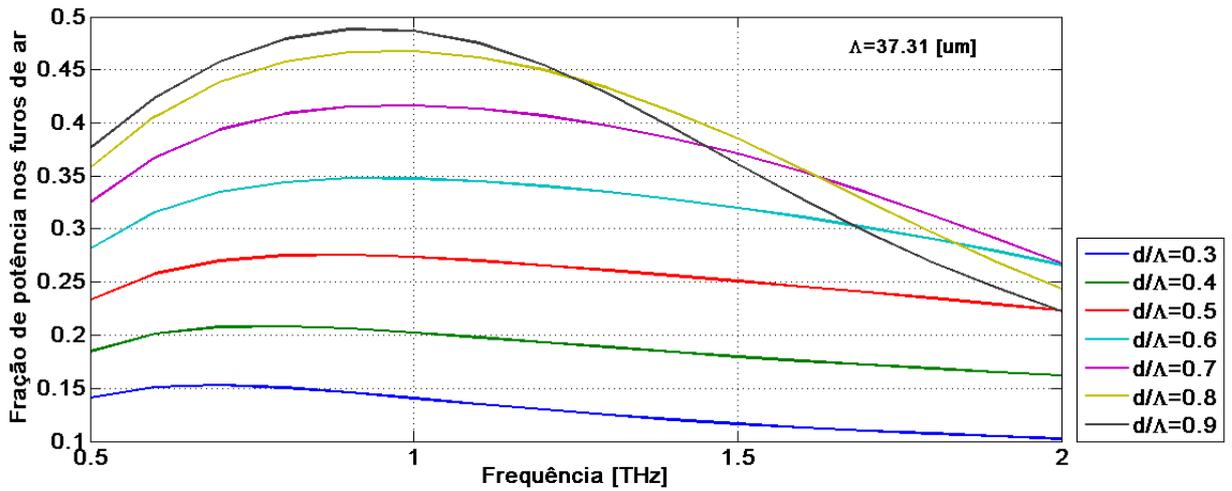


FIG 35 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

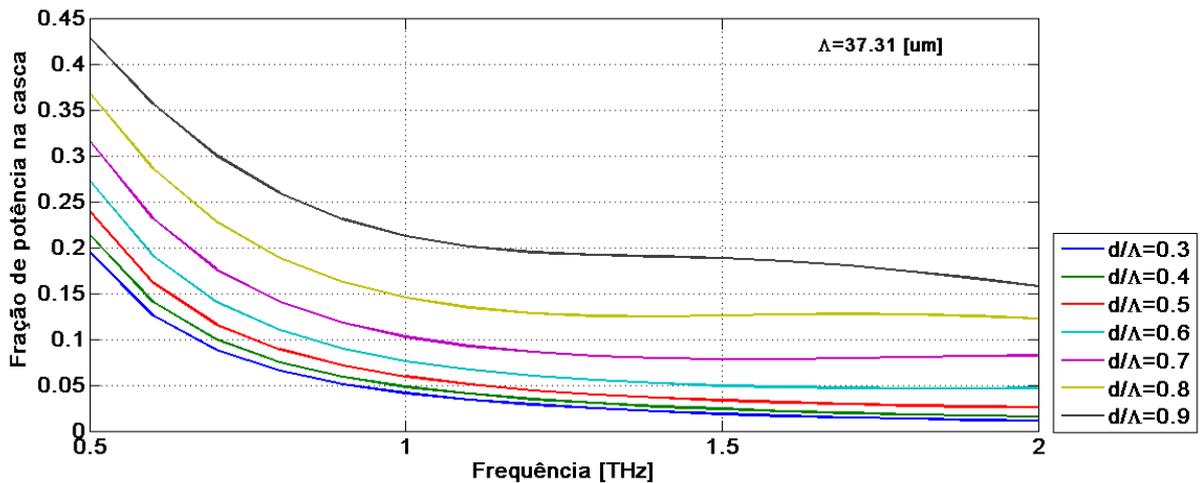


FIG 36 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.1.4 Perda efetiva do material (EML)

Geralmente, quando o índice efetivo do modo é muito menor que o índice do material a sobreposição entre as ondas THz e a perda do material com absorção é significativamente reduzida [2]. Ou seja, quanto maior a razão de d/Λ , menores serão as perdas por absorção.

Na FIG 37 é apresentada a perda efetiva do material (*effective material loss – EML*) da fibra porosa de defeito central com diferentes fatores de preenchimento, considerando o

coeficiente de absorção do Topas (0.9dB/cm). Os fatores de preenchimento maiores apresentam menores perdas, isso se deve ao fato de que maior parte da potência passa a ser guiada pelos furos de ar e não pelo material em si. Como ocorre, por exemplo, para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.9$, no qual, as perdas para frequências até 1 [THz] são menores que 0.4dB/cm .

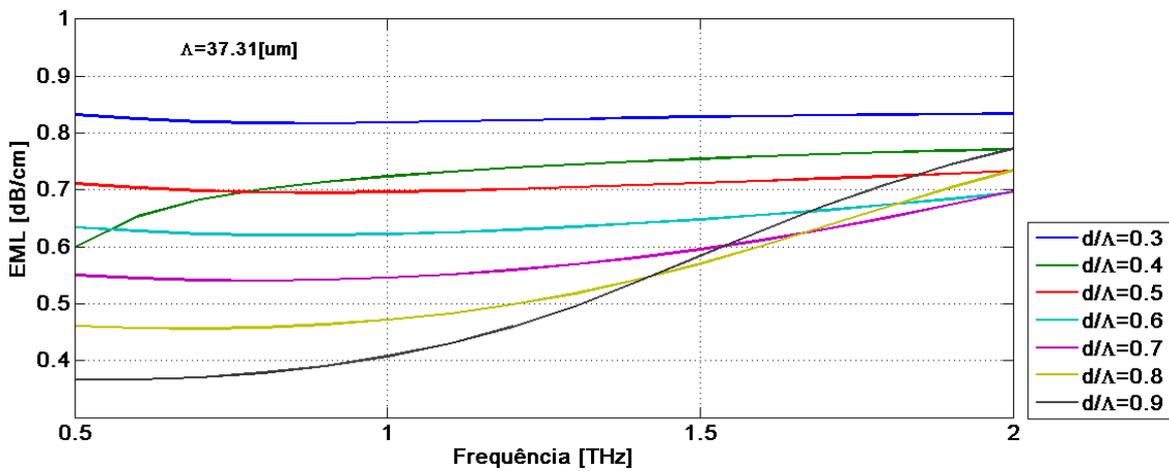


FIG 37 Perda efetiva do material da fibra porosa com defeito central confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.1.5 Dispersão cromática

A FIG 38 apresenta as curvas de dispersão cromática para diversos valores de preenchimento da fibra porosa com defeito central. Nota-se que para todos os casos estudados apresenta-se uma banda plana entre 0.5 e 1.5 THz aproximadamente, essa região de dispersão nula é apropriada para guiamento em casamento com uma estrutura que forneça baixa perda efetiva.

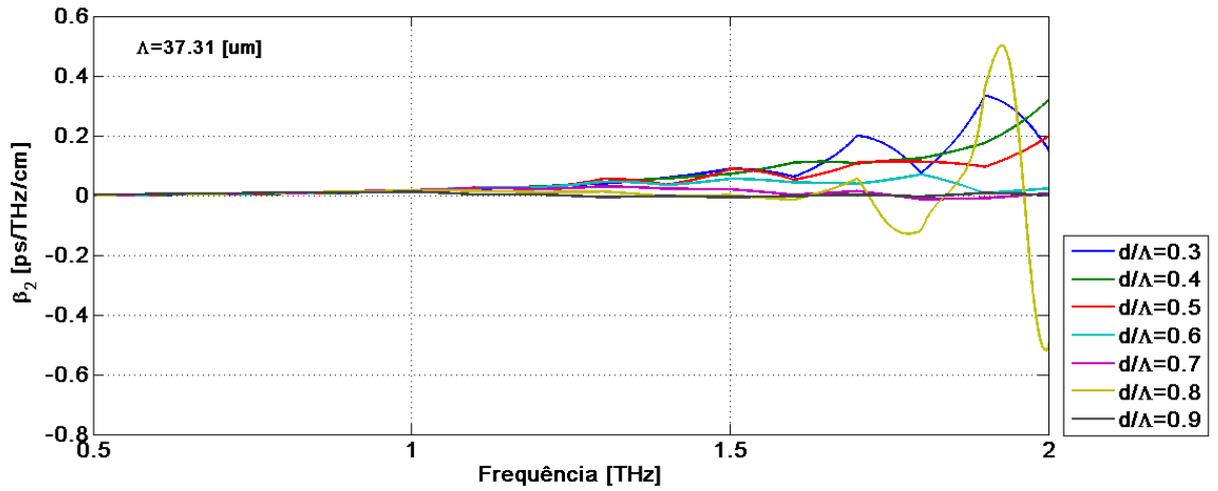


FIG 38 Dispersão cromática da fibra porosa com defeito central confeccionada com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.2 Fibra porosa com defeito central e inclusão de um anel de ouro

A utilização de metais em fibras porosas de THz tem por finalidade confinar e orientar, de acordo com a estrutura, a energia guiada para os furos de ar, fazendo com que haja uma diminuição da perda por absorção material, além de, diminuir a dispersão cromática da fibra.

Nesta seção é feito um estudo acerca do impacto nas características de guiamento da fibra porosa, FIG 28, com a inclusão de um anel de ouro na periferia do furo central. A FIG 39 mostra um esquemático da fibra porosa com inclusão de um anel metálico de ouro de $0.2\mu\text{m}$ de espessura. O caráter dispersivo do ouro foi modelado pela fórmula de Drude [41], na qual a permissividade relativa ϵ_r como função da frequência angular ω é dada por:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\Gamma)}, \quad (25)$$

onde $\omega_p = 1.36 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ é a frequência de plasma do ouro, $\Gamma = 9.3 \times 10^{-15} \text{ rad/s}$ é o fator de amortecimento e $\epsilon_\infty = 9.1$ é o termo que considera a transição eletrônica entre bandas.

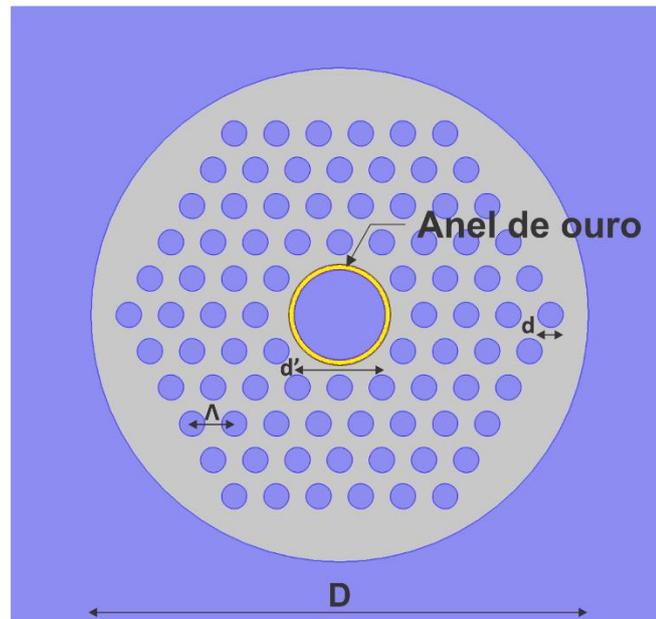
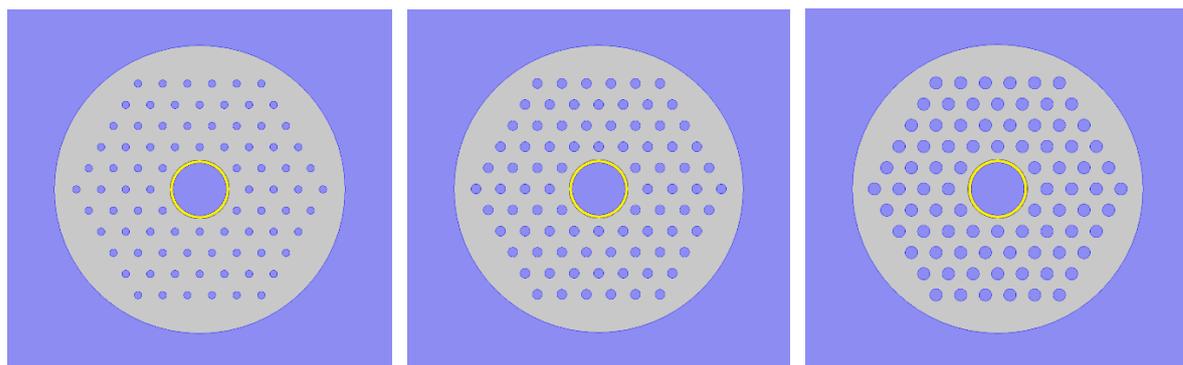


FIG 39 Esquemático da fibra porosa com defeito central e um anel de ouro de 0.2 um de espessura, o diâmetro do defeito central é $d'=40 \text{ um}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31 \text{ um}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440 \text{ um}$.

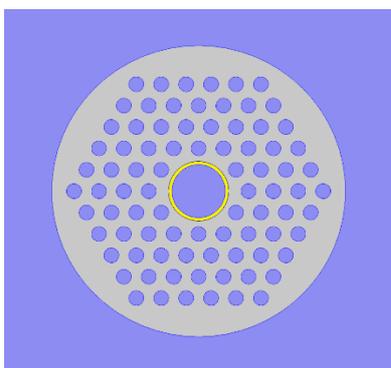
A FIG 40 apresenta a fibra porosa com defeito central e inclusão de um anel de ouro para diversas razões de preenchimento, o valor da distância entre os furos menores adjacentes foi mantida em $\Lambda = 37.31 \text{ um}$, e o valor do diâmetro dos furos menores d foi alterado para alcançar as razões d/Λ , 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 e 0.9.



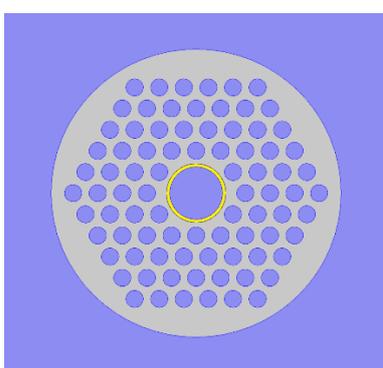
a) $d/\Lambda = 0.3$

b) $d/\Lambda = 0.4$

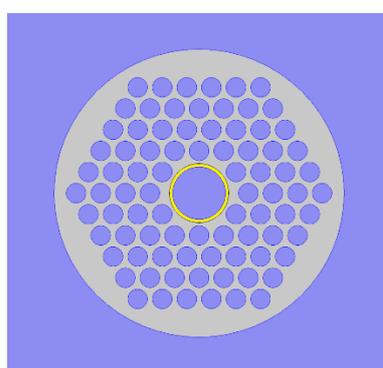
c) $d/\Lambda = 0.5$



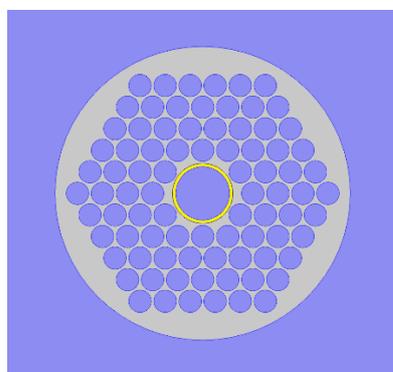
d) $d/\Lambda = 0.6$



e) $d/\Lambda = 0.7$



f) $d/\Lambda = 0.8$



g) $d/\Lambda = 0.9$

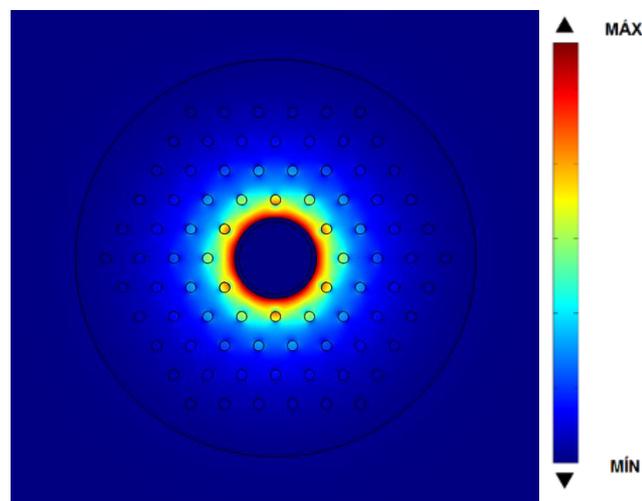
FIG 40 Fibras porosa com defeito central e um anel de ouro de 0.2um de espessura (área amarela) com diferentes razões de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.

3.2.1 Potência modal

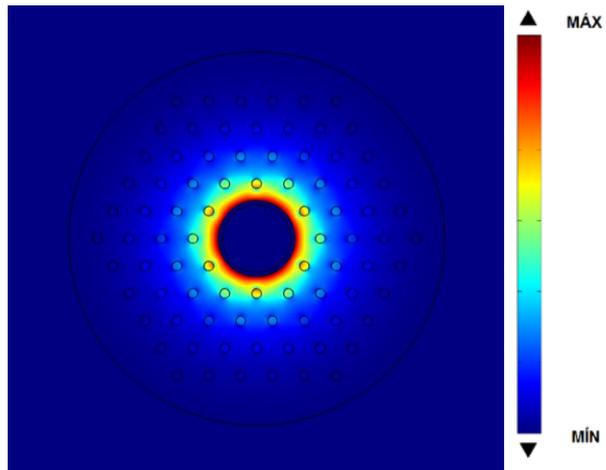
As FIG 41, FIG 42 e FIG 43 ilustram o perfil de distribuição de potência modal para o modo fundamental da fibra porosa com um anel de ouro na periferia do seu furo central para diferentes fatores de preenchimento e diferentes valores de frequência.

Diferente do que ocorre na distribuição de potência da fibra porosa sem inclusão do anel metálico, a potência tende a se confinar próximo a interface metal dielétrico, caindo exponencialmente quando se distancia da mesma. Esse confinamento de potência nessa interface é oriunda do acoplamento dos modos da fibra com os SPP's, exercendo um mecanismo de guiamento comportado, característica que pode ser explorada para diminuição das perdas por absorção e melhor comportamento da curva de dispersão.

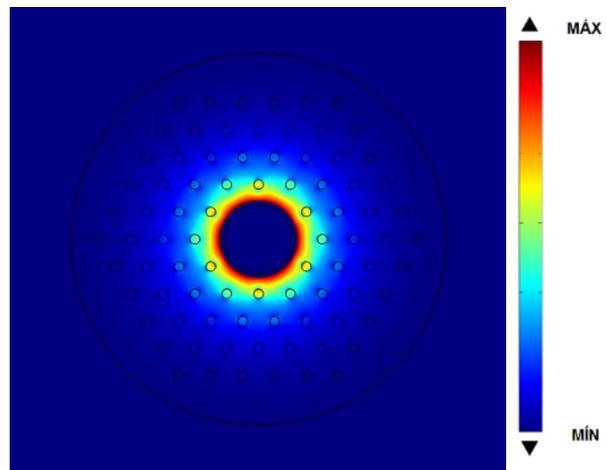
O perfil de potência muda conforme a frequência aumenta, em frequências mais baixas a maior parte da potência se acumula na interface metal dielétrico, já em frequências mais altas a potência decai ao se distanciar dessa região exponencialmente mais rápido, aumentando assim as perdas por absorção é influenciando no aumento da dispersão cromática.



(a)

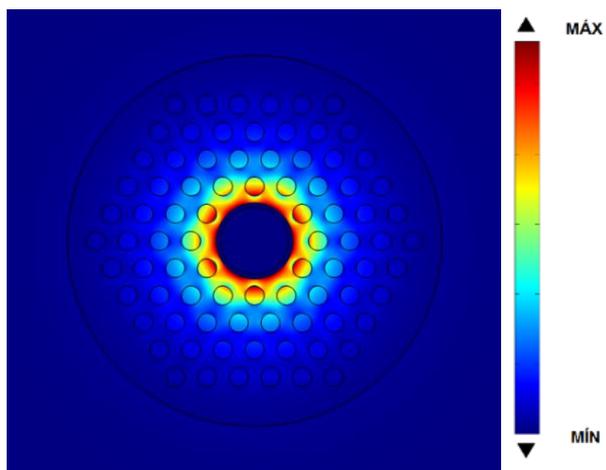


(b)

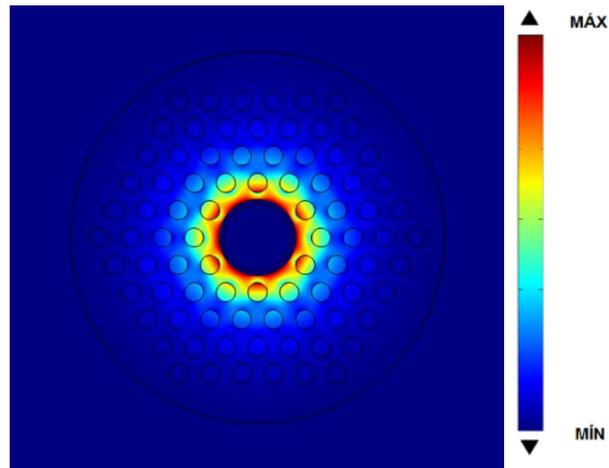


(c)

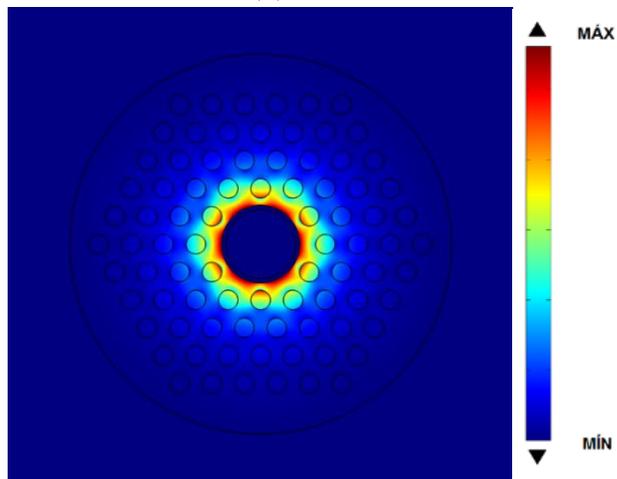
FIG 41 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)

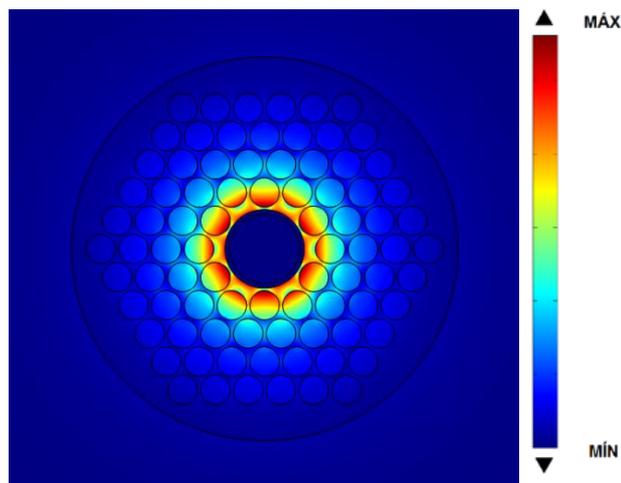


(b)

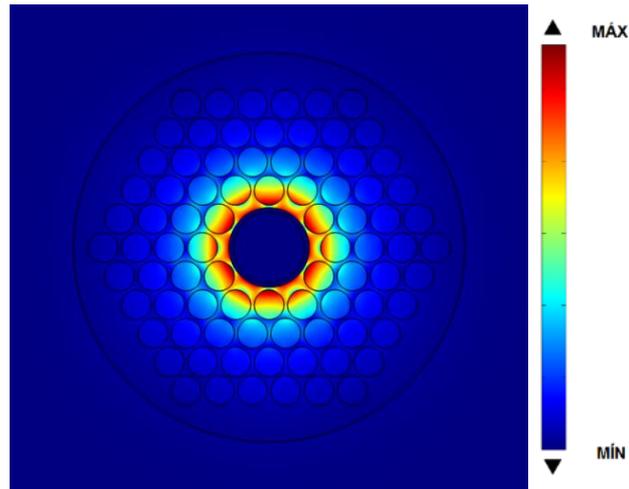


(c)

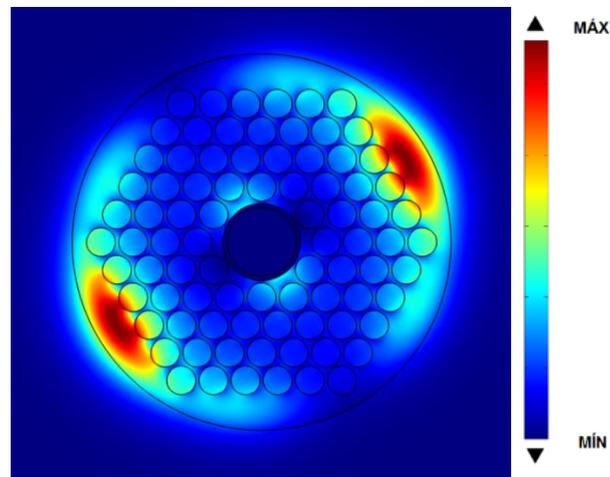
FIG 42 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)



(b)



(c)

FIG 43 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa com anel de ouro com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0.5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].

3.2.2 Índice efetivo

A FIG 44 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa com inclusão de um anel de ouro variando o fator de preenchimento d/Λ . É possível notar que quanto maior for o fator de preenchimento de ar na fibra (maior porosidade) menor serão os valores de n_{eff} devido a uma quantidade maior de potência ser guiada nos furos de ar, o que também refletirá no perfil de perdas.

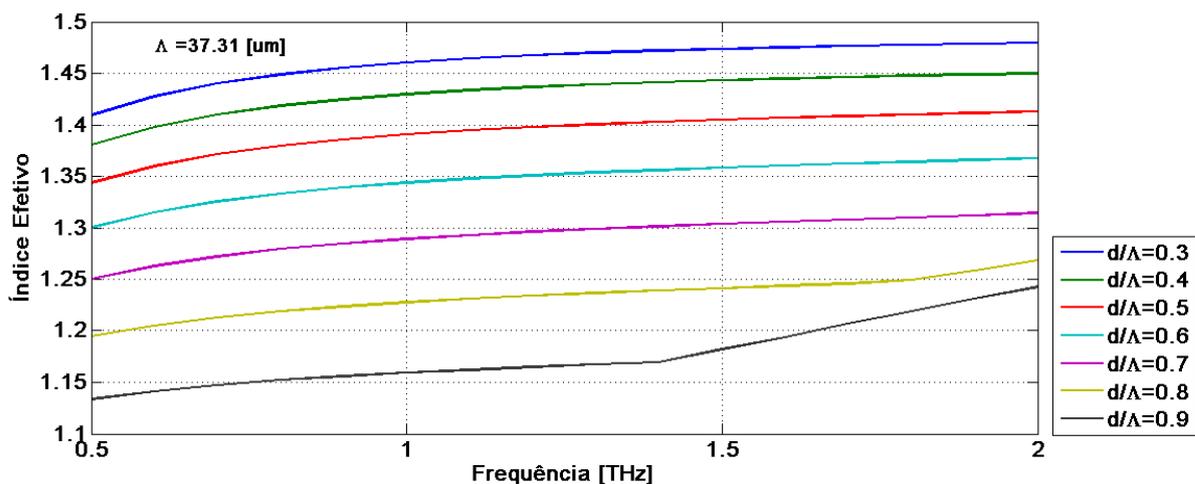


FIG 44 Índices de modo efetivo das fibras porosas com anel de ouro, com $\Lambda=37.31 \text{ }\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.2.3 Fração de potência

Nas FIG 45, FIG 46 e FIG 47 são mostradas as frações de potência no material (dielétrico), nos furos de ar, e na casca (região de ar que circunda a estrutura), respectivamente. Observa-se que para preenchimentos maiores como $d/\Lambda = 0.9$, a maior parte da fração de potência tende a se guiar pelos furos de ar até 1.4 [THz] aproximadamente, após essa frequência a potência tende a vazar para o dielétrico, aumentando assim as perdas por absorção.

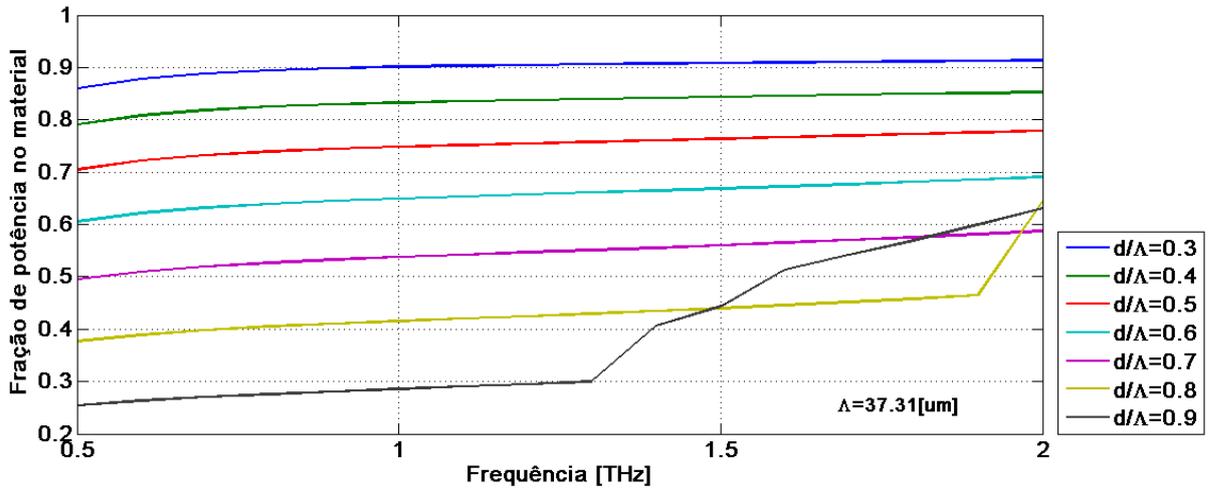


FIG 45 Fração normalizada de potência presente no material dielétrico da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

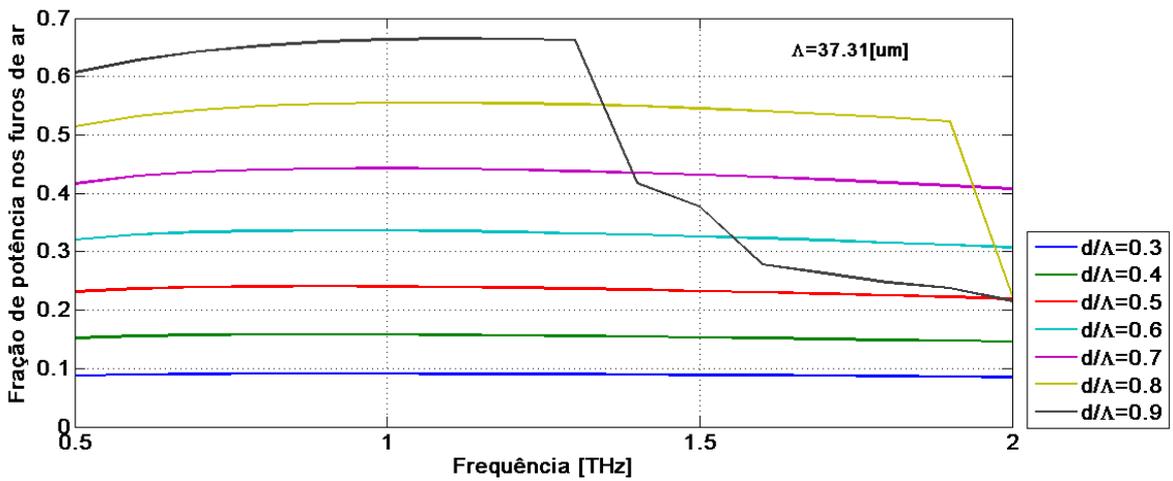


FIG 46 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

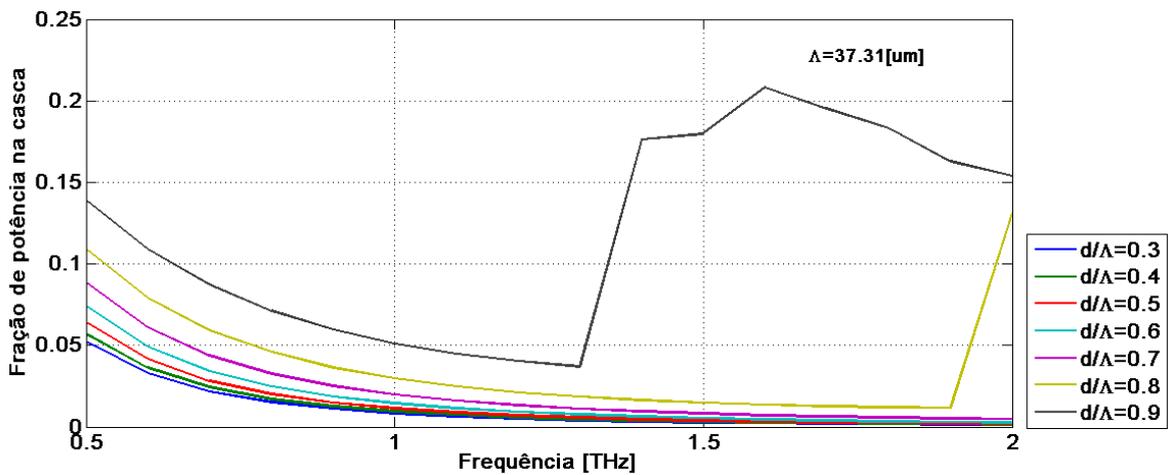


FIG 47 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.2.4 Perda efetiva do material (EML)

A FIG 48 apresenta a EML da fibra porosa com anel de ouro para vários fatores de preenchimento, considerando o coeficiente de absorção do Topas (0.9dB/cm). É possível notar, em comparação com a fibra porosa sem o anel metálico a perda é menor, por exemplo, para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.9$ as perdas para frequências até 1 [THz] são menores que 0.3dB/cm .

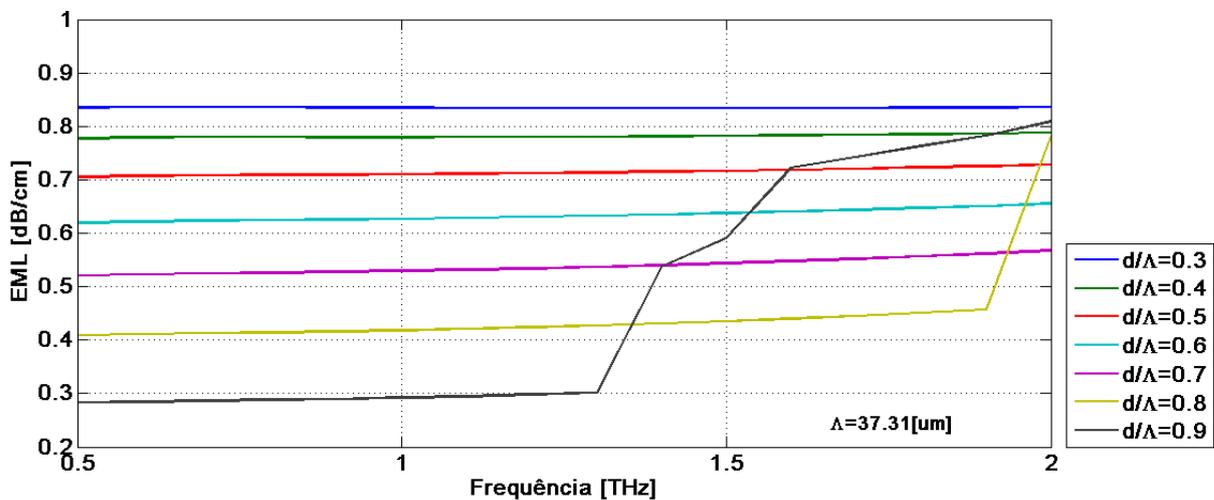


FIG 48 Perda efetiva do material da fibra porosa com anel de ouro confeccionado com Topas 0.9dB/cm com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.2.5 Dispersão cromática

Para os maiores fatores de preenchimento, fatores no qual a perda efetiva é menor, como $d/\Lambda = 0.7$, $d/\Lambda = 0.8$ e $d/\Lambda = 0.9$, a dispersão cromática da fibra porosa com anel metálico apresenta uma grande região de dispersão nula de 0.5 [THz] até 1.25 [THz] FIG 49. Essa região de dispersão nula é apropriada para guiamento em casamento com uma estrutura que forneça baixa perda efetiva.

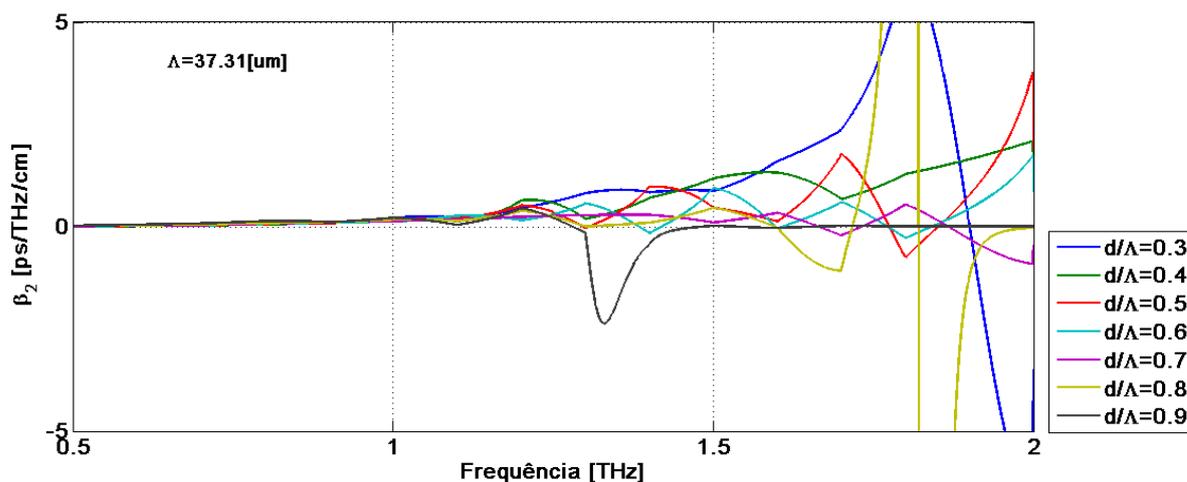


FIG 49 Dispersão cromática da fibra porosa com anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.3 Fibra porosa tipo D com defeito central

Nesta subseção é apresentada uma fibra porosa com seção transversal tipo D com um defeito central na linha de furos superior, as dimensões dessa fibra são iguais as da fibra porosa da FIG 28, porém, é feito um corte longitudinal, com distância Λ da linha de furo central, em um dos eixos, tornando-a com uma face plana ao longo do seu eixo longitudinal z .

A FIG 50 apresenta um esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central, no qual a região cinza é o dielétrico Teflon e a região azul o ar, o valor do diâmetro da fibra é $D = 440\mu\text{m}$, e a distância entre os furos menores adjacentes $\Lambda = 37.31\mu\text{m}$, já o defeito central de ar possui diâmetro de $d' = 40\mu\text{m}$, além disso variaram-se os valores do diâmetro dos furos de ar d para alcançar diferentes razões de d/Λ como mostrado na FIG 51.

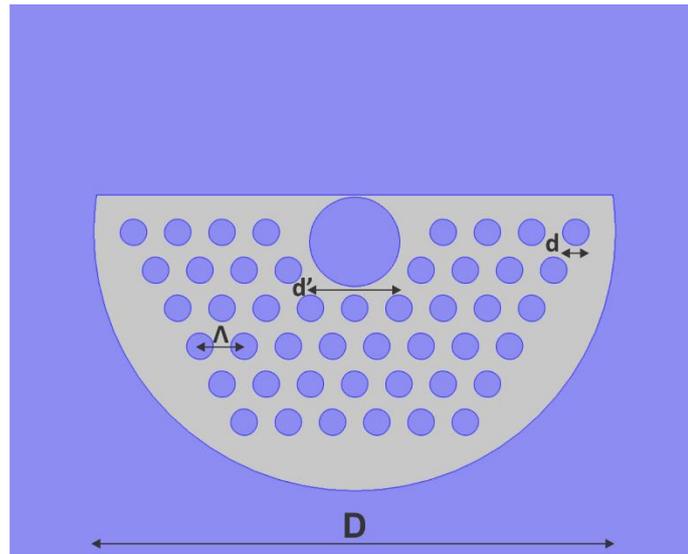
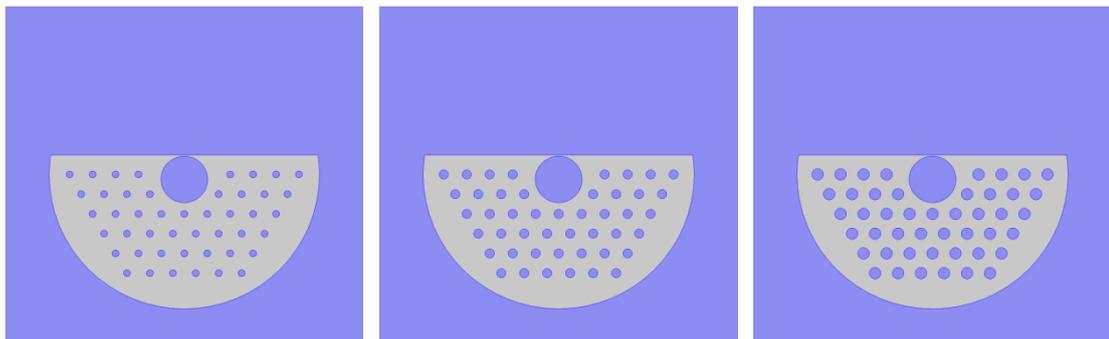


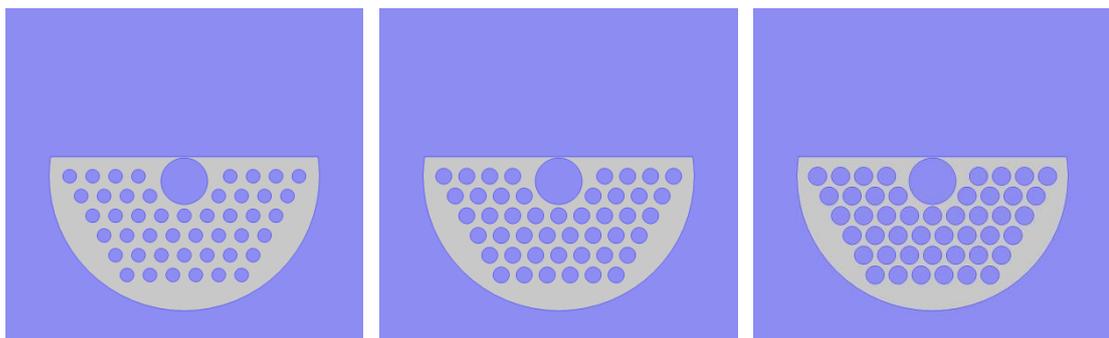
FIG 50 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central, o diâmetro do defeito central é $d'=40$ um, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31$ um e o diâmetro total da fibra é $D=440$ um.



a) $d/\Lambda = 0.3$

b) $d/\Lambda = 0.4$

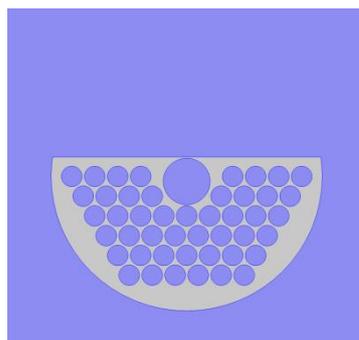
c) $d/\Lambda = 0.5$



d) $d/\Lambda = 0.6$

e) $d/\Lambda = 0.7$

f) $d/\Lambda = 0.8$

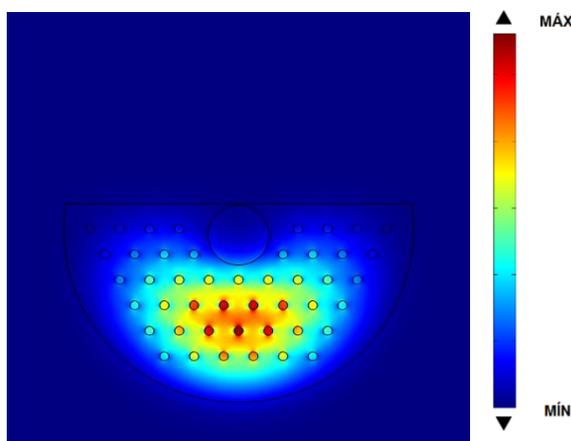


g) $d/\Lambda = 0.9$

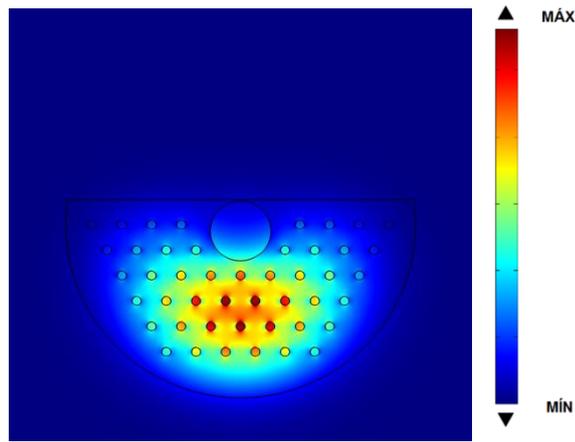
FIG 51 Fibra porosa tipo D com defeito central de diâmetro $d'=40\ \mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\ \mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\ \mu\text{m}$. de d/Λ . (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, (f) 0.8, (g) 0.9.

3.3.1 Potência modal

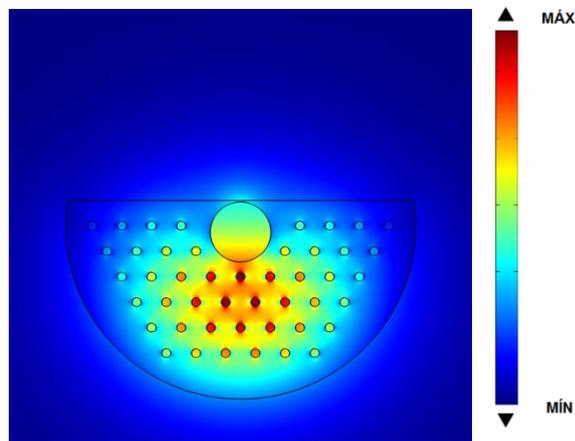
As FIG 52, FIG 53 e FIG 54 ilustram o perfil de distribuição de potência modal para o modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central para diferentes fatores de preenchimento e diferentes valores de frequência. O perfil de potência muda conforme a frequência aumenta, em frequências mais baixas a maior parte da potência se confina mais nos furos de ar, já em frequências mais altas a potência tende a se espalhar mais para a casca, aumentando assim as perdas por absorção.



(a)

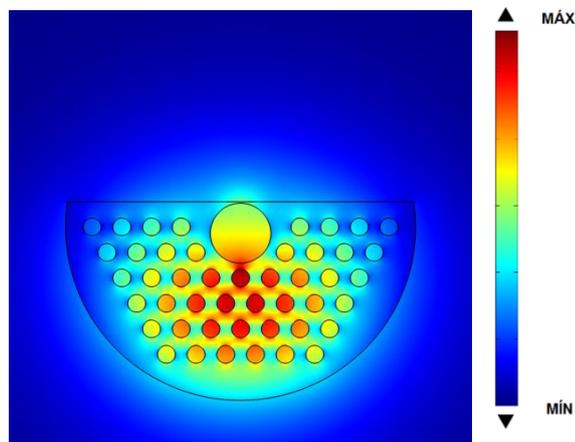


(b)

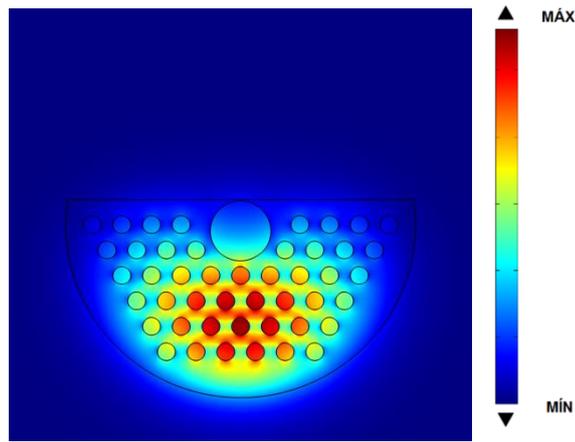


(c)

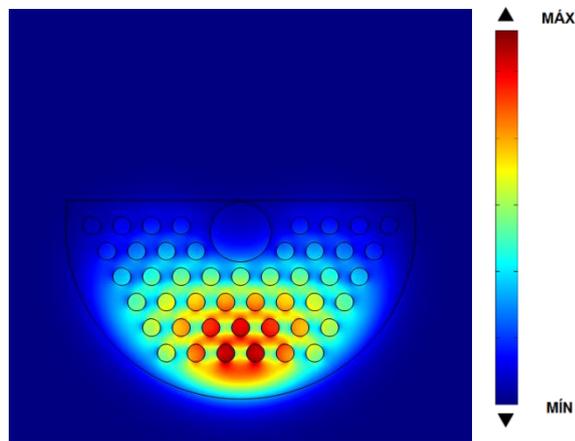
FIG 52 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)

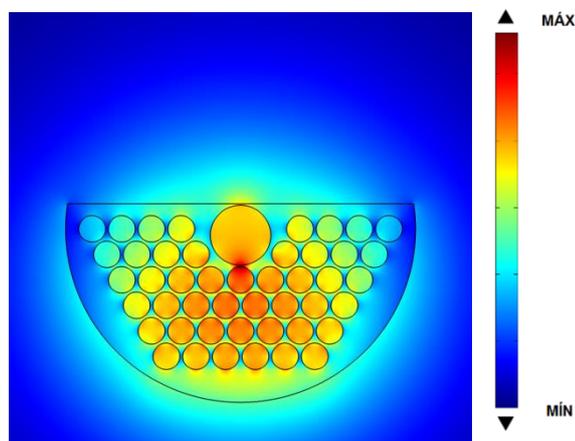


(b)

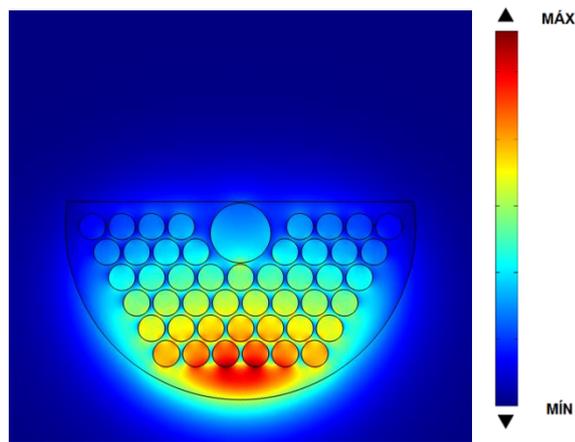


(c)

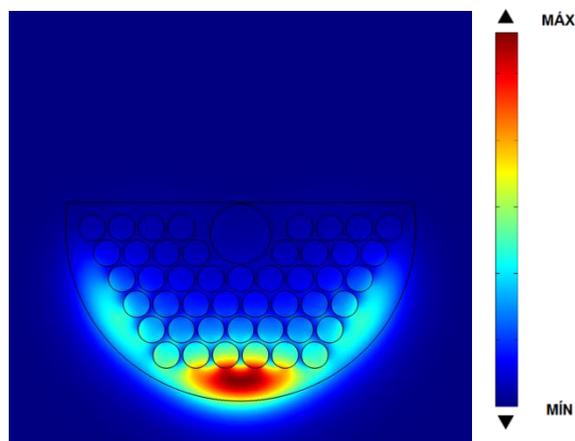
FIG 53 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)



(b)



(c)

FIG 54 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com defeito central, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].

3.3.2 Índice efetivo

A FIG 55 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa tipo D com defeito central variando o fator de preenchimento d/Λ . A distância entre os furos foi mantida constante em $37,31\mu m$ e o diâmetro dos furos foi alterado para que as razões de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 0.9 fossem alcançadas. Quanto maior for o fator de preenchimento de ar na fibra (maior porosidade), menor será o valor de n_{eff} para toda a faixa de frequência analisada.

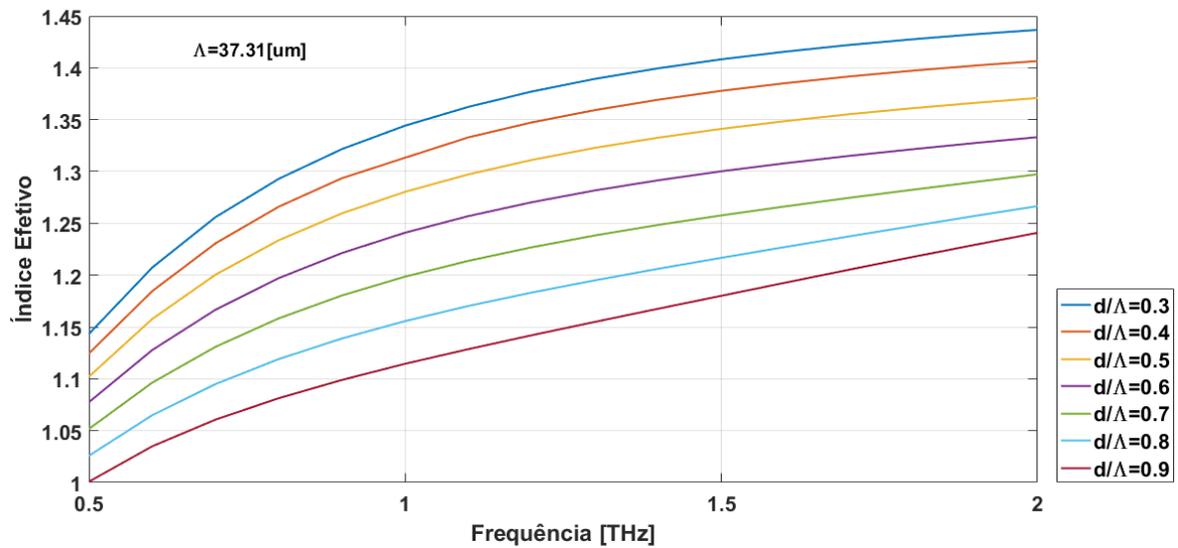


FIG 55 Índices efetivo das fibras porosas tipo D com defeito central, com $\Lambda=37.31$ um e vários valores de d/Λ .

3.3.3 Fração de potência

As FIG 56, FIG 57 e FIG 58 são mostradas as frações de potência no material (polímero), nos furos de ar, e na casca (região de ar que circunda a fibra), respectivamente. Observa-se que as frações de potência nos furos de ar aumentam quando a razão d/Λ também aumenta.

Entretanto é possível notar que conforme aumenta a frequência há uma queda na potência guiada nos furos de ar para altos valores de fatores de preenchimento como em $d/\Lambda = 0.9$ e $d/\Lambda = 0.8$. Para esses dois casos o máximo de potência guiada nos furos de ar ocorre em 1 [THz], após isso, a potência começa a vazar para o polímero.

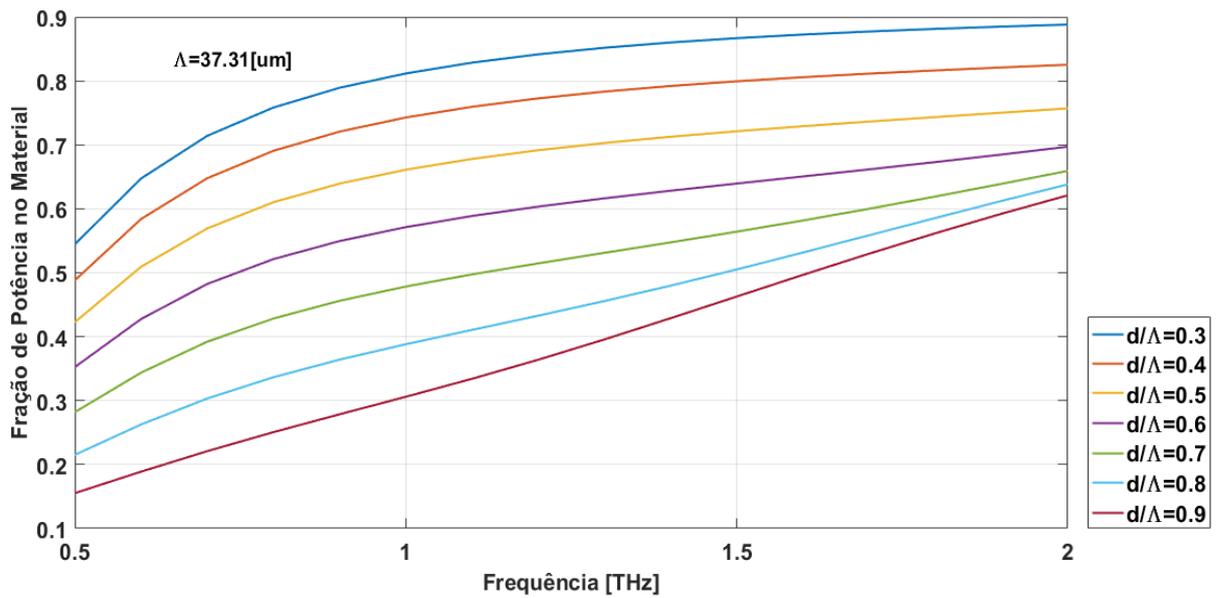


FIG 56 Fração normalizada de potência presente no material da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31$ um e vários valores de d/Λ .

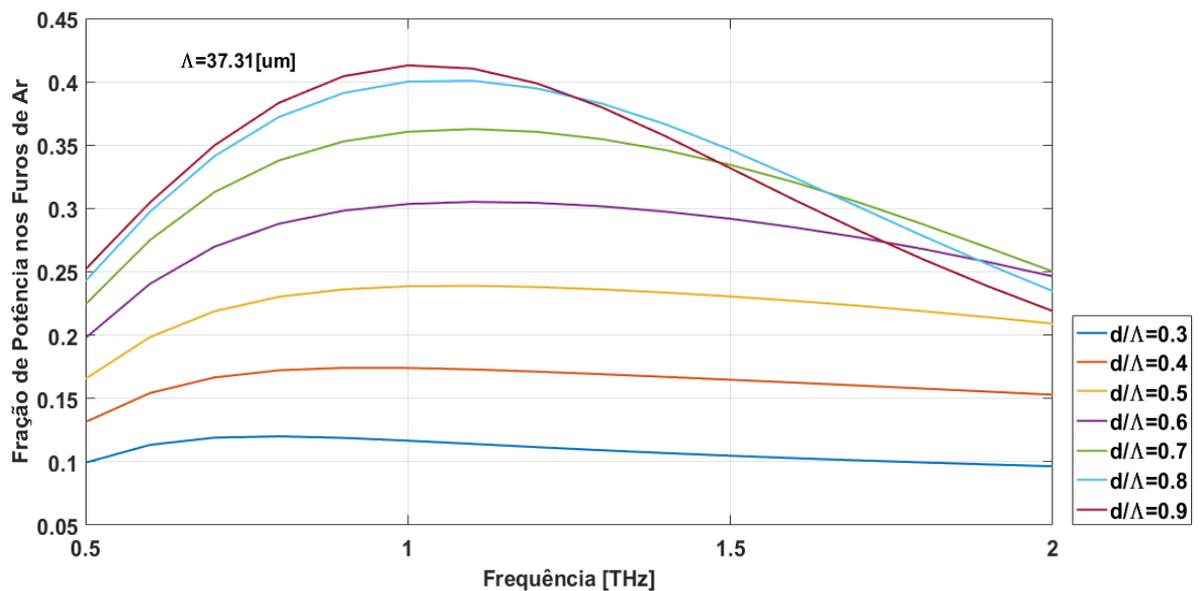


FIG 57 Fração normalizada de potência presente nos furos de ar da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31$ um e vários valores de d/Λ .

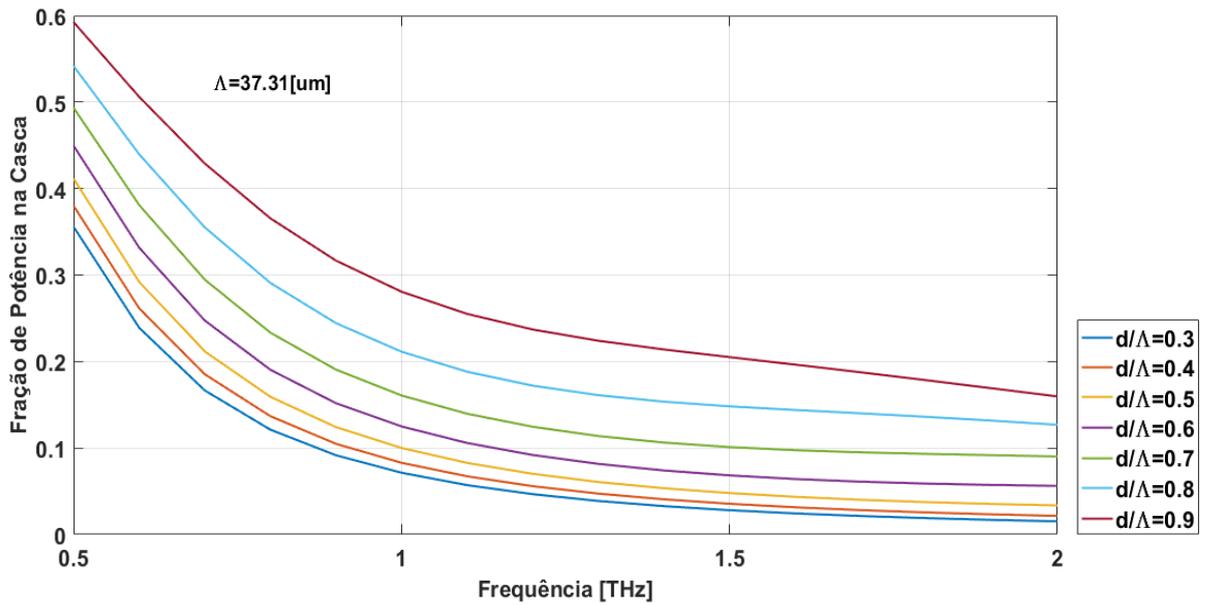


FIG 58 Fração normalizada de potência presente na casca da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31 \mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.3.4 Perda efetiva do material (EML)

A FIG 59 apresenta a EML da fibra porosa tipo D com defeito central para vários fatores de preenchimento, considerando o coeficiente de absorção do Topas ($0,9\text{dB/cm}$). Em comparação com a perda efetiva da fibra porosa vista na seção anterior FIG 48, para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0,9$, as perdas para frequências até 1.4 [THz] são menores, com valores menores de $0,2\text{dB/cm}$.

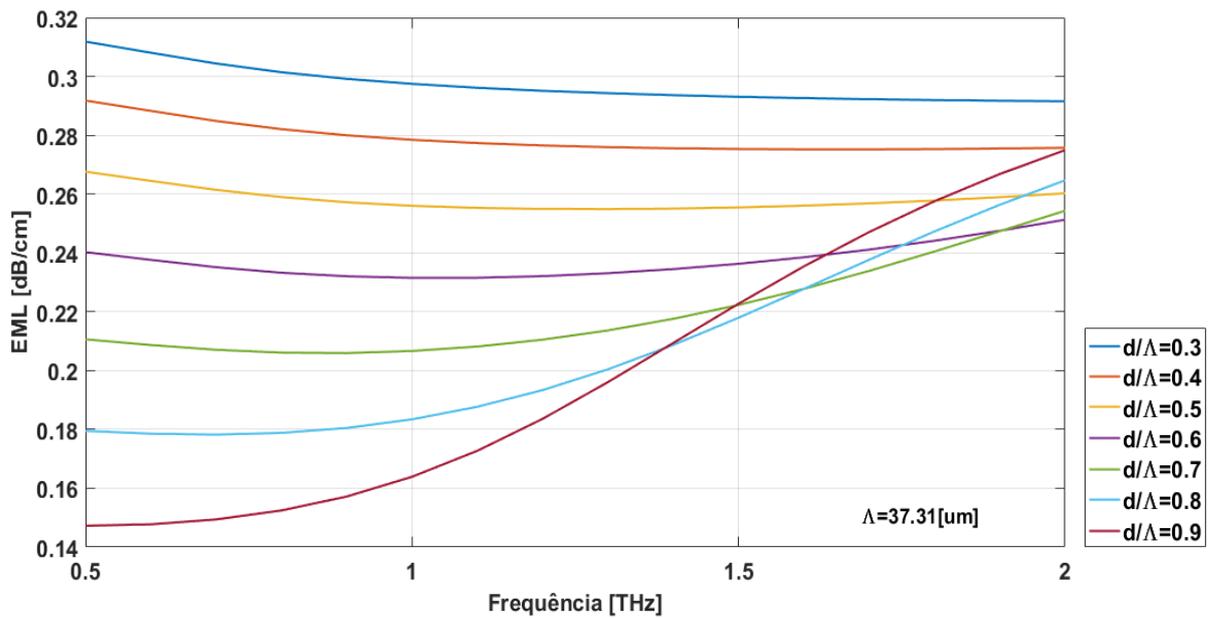


FIG 59 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D com defeito central, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm, com $\Lambda=37.31$ μm e vários valores de d/Λ .

3.3.5 Dispersão cromática

A FIG 60 apresenta as curvas de dispersão cromática para diversos fatores de preenchimento em relação com a frequência. Observa-se que em fatores maiores, como $d/\Lambda = 0.7$, $d/\Lambda = 0.8$ e $d/\Lambda = 0.9$, há uma grande região de dispersão nula até 1.5 [THz]. Essa região de dispersão nula é apropriada para guiamento em casamento com uma estrutura que forneça baixa perda efetiva.

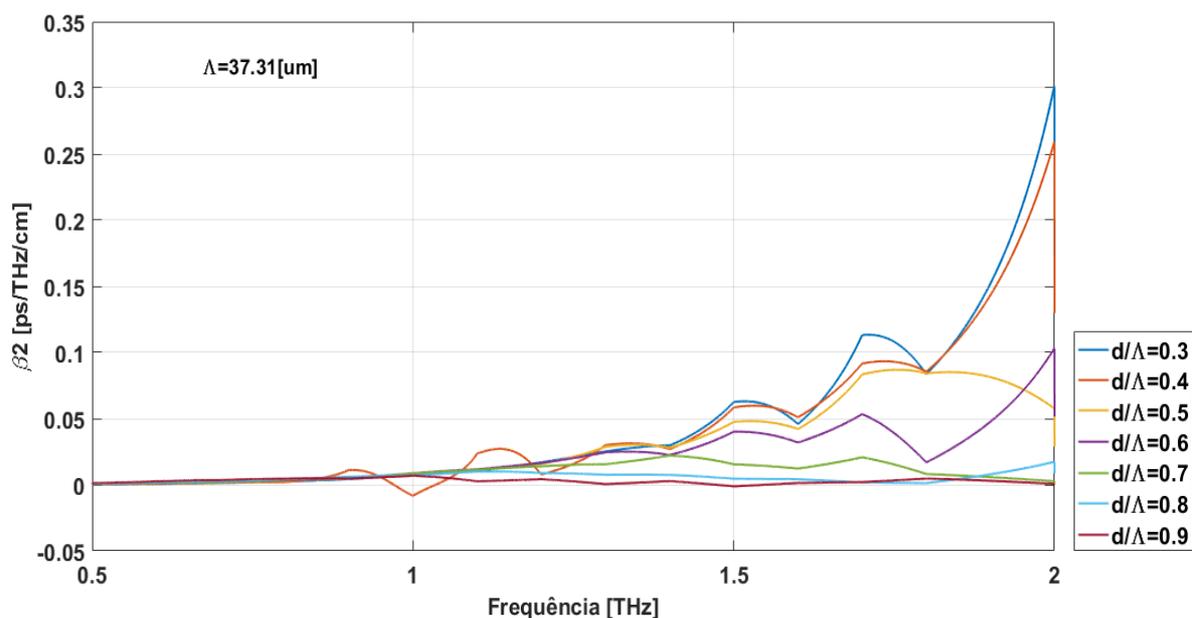


FIG 60 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D e defeito central, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.4 Fibra porosa tipo D com defeito central e com inclusão de uma película de ouro

O aprimoramento dos campos modais em uma fibra porosa tipo D revestida com metal no domínio óptico é conhecida por fornecer características muito exclusivas, particularmente para a construção de plataformas de detecção [42] e [37]. As propriedades modais dessa estrutura, no entanto, não podem ser rapidamente redimensionadas para a faixa de THz devido a perdas significativas comumente apresentadas por materiais dielétricos nesse domínio espectral. Para exemplificar isso, analisamos o modo fundamental de uma configuração análoga ao que é discutido em [37]. Neste trabalho, a estrutura geral foi redimensionada para atender aos requisitos de guiamento em THz.

A FIG 61 apresenta um esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central e com uma película de ouro $0.2\mu\text{m}$ na sua face plana, região amarela, a região cinza é o dielétrico Teflon e a região azul o ar. O valor do diâmetro da fibra é $D = 440\mu\text{m}$, e a distância entre os furos menores adjacentes $\Lambda = 37.31\mu\text{m}$, são retirados o furo central e o semicírculo de anéis

que o circundam, além disso, variam-se os valores do diâmetro dos furos de ar d para alcançar diferentes razões de d/Λ como mostrado na FIG 62.

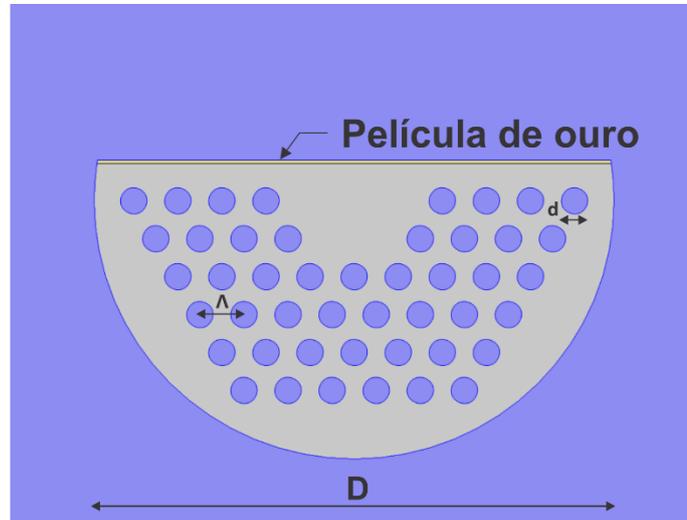


FIG 61 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de uma película de ouro, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.

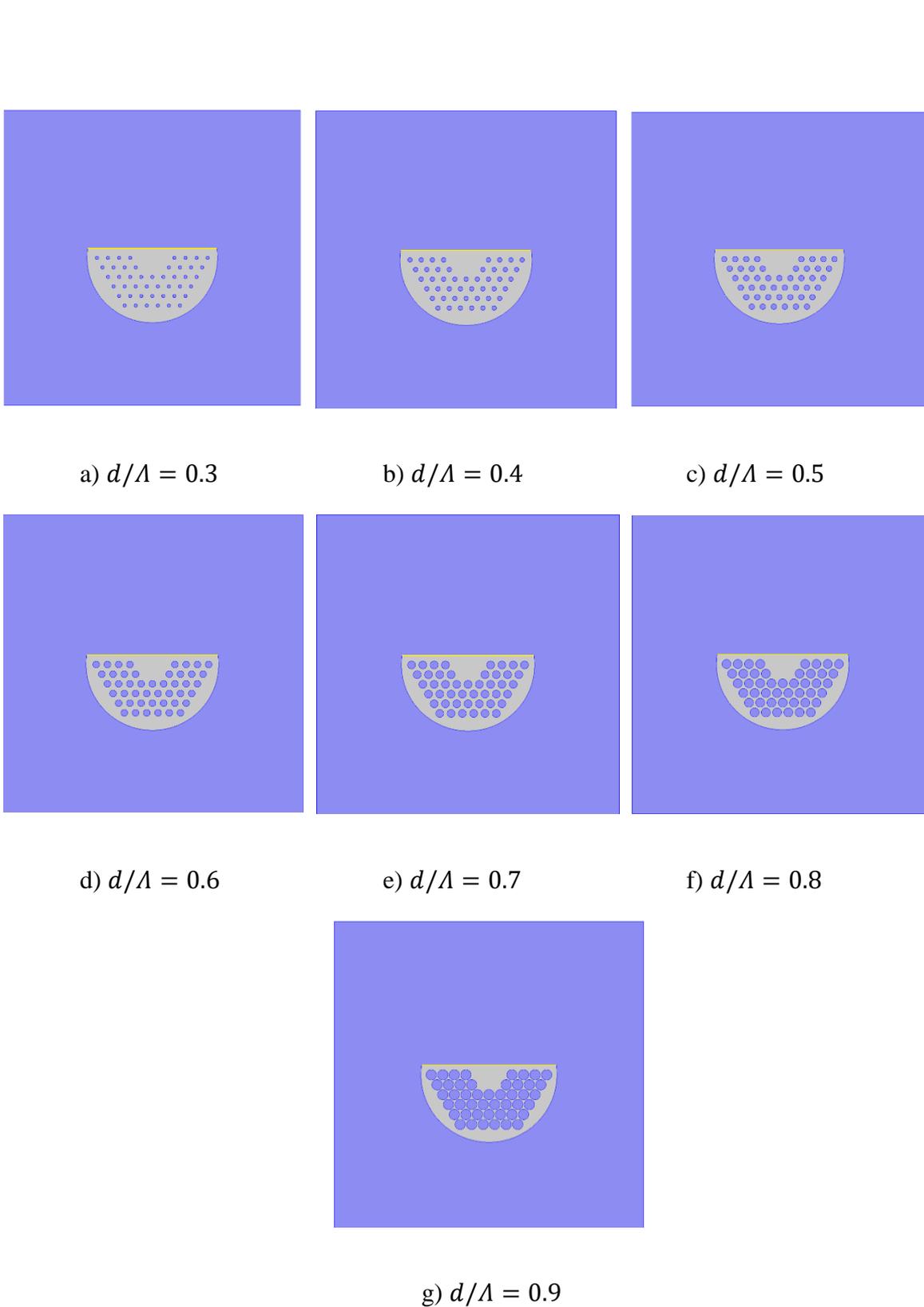
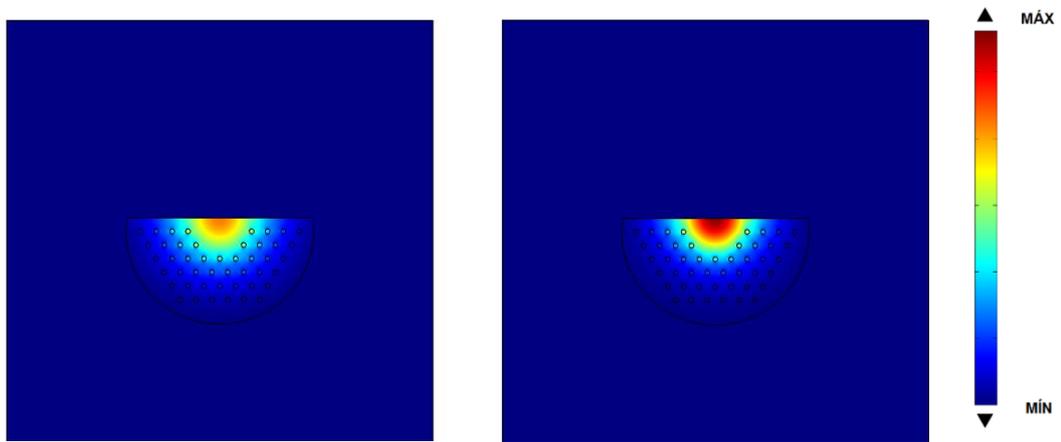


FIG 62 Fibra porosa tipo D sem furo central com inclusão de uma película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.4.1 Potência modal

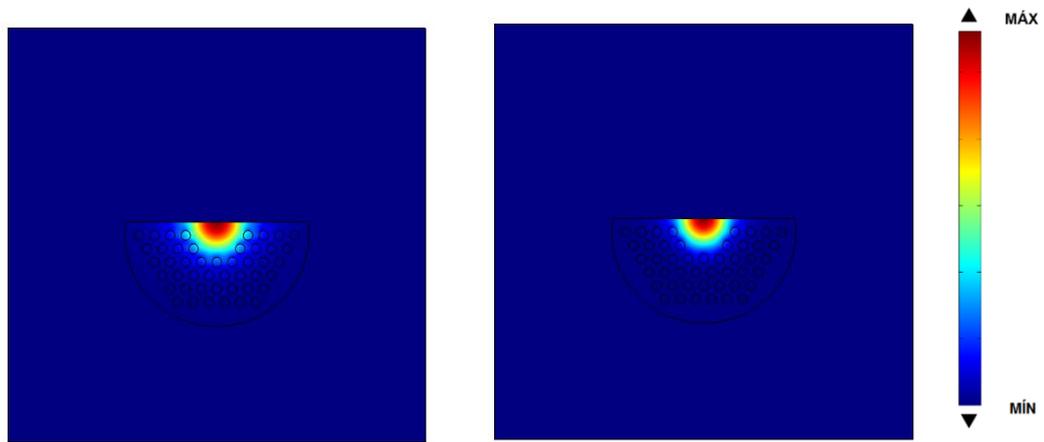
Os perfis de potência modal da fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de uma película de ouro na sua face plana para diferentes fatores de preenchimentos e diferentes frequências, são apresentados nas FIG 63 FIG 64 e FIG 65. Nota-se que a potência tende a se confinar na interface metal dielétrico, no defeito da fibra, devido ao acoplamento dos modos da fibra com os SPP's criando regiões de alto confinamento da energia.



(a)

(b)

FIG 63 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].



(a)

(b)

FIG 64 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].

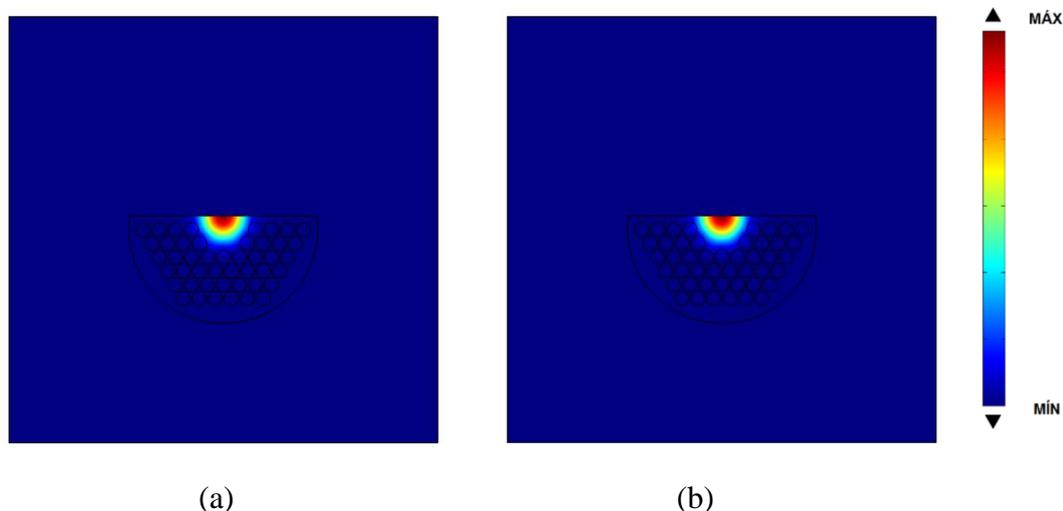


FIG 65 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 1,5 [THz], (b) 2 [THz].

3.4.2 Índice efetivo

A FIG 66 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa tipo D com defeito central e película de ouro na sua face plana, variando de acordo com a frequência para vários fatores de preenchimento d/Λ . A distância entre os furos foi mantida constante em $\Lambda = 37,31\mu m$ e o diâmetro dos furos foi alterado para se alcançar as várias razões de d/Λ . É possível notar que quanto maior o fator de preenchimento menor é o índice efetivo para toda a faixa de frequência analisada.

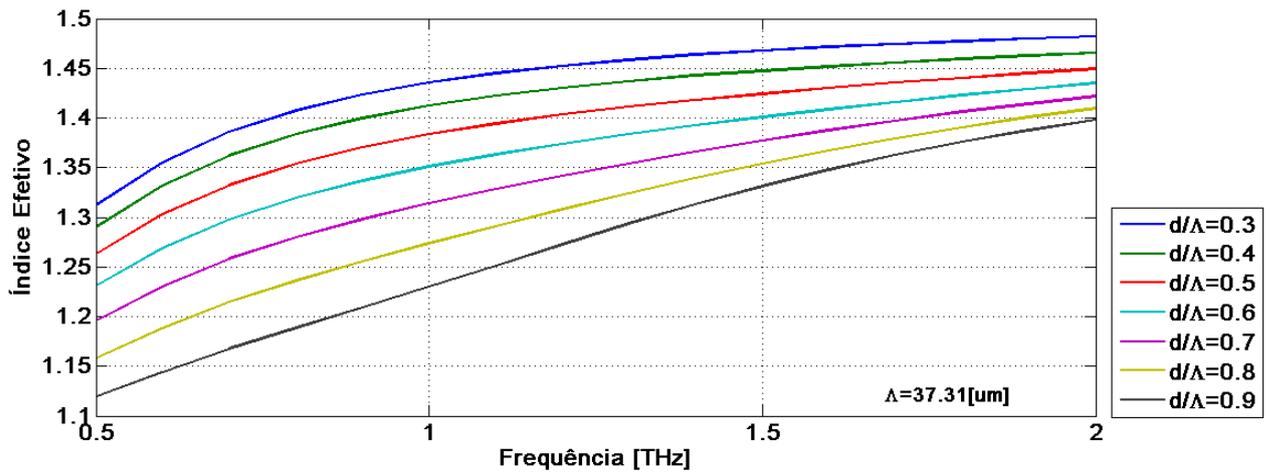
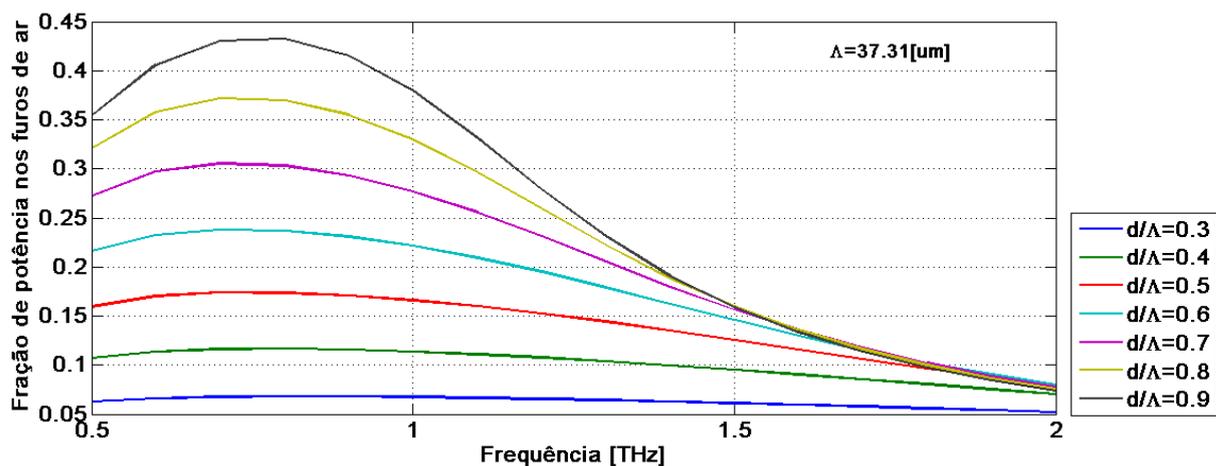
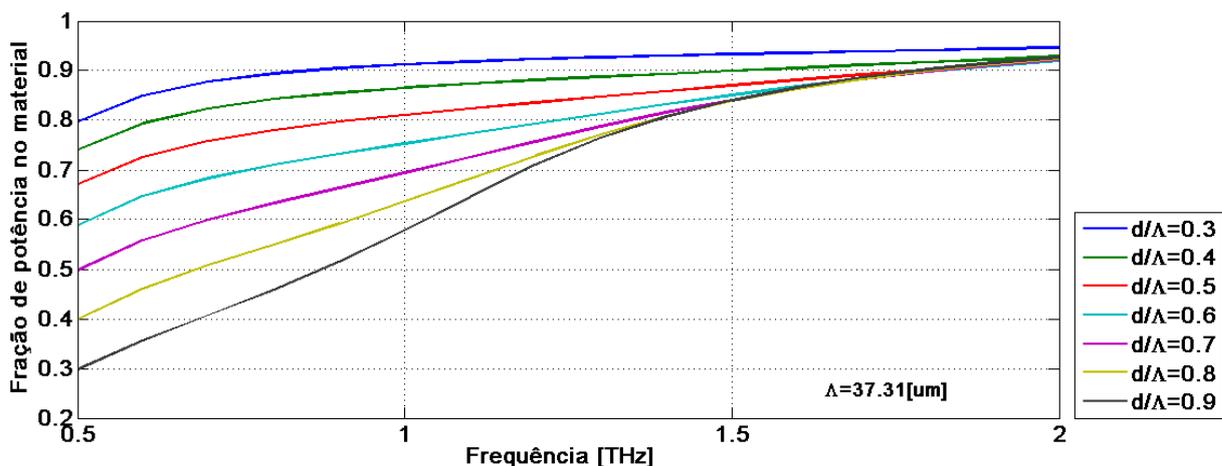


FIG 66 Índice efetivo da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.4.3 Fração de potência

As FIG 67, FIG 68 e FIG 69 apresentam as frações de potência no material (polímero), nos furos de ar e na casca (região de ar que circunda a estrutura) respectivamente da fibra porosa tipo D com defeito central e uma película de ouro na sua face plana. É possível notar que mesmo para a configuração com maior fator de preenchimento de ar $d/\Lambda = 0.9$ a potência do modo fundamental nos orifícios de ar é inferior a 50%.



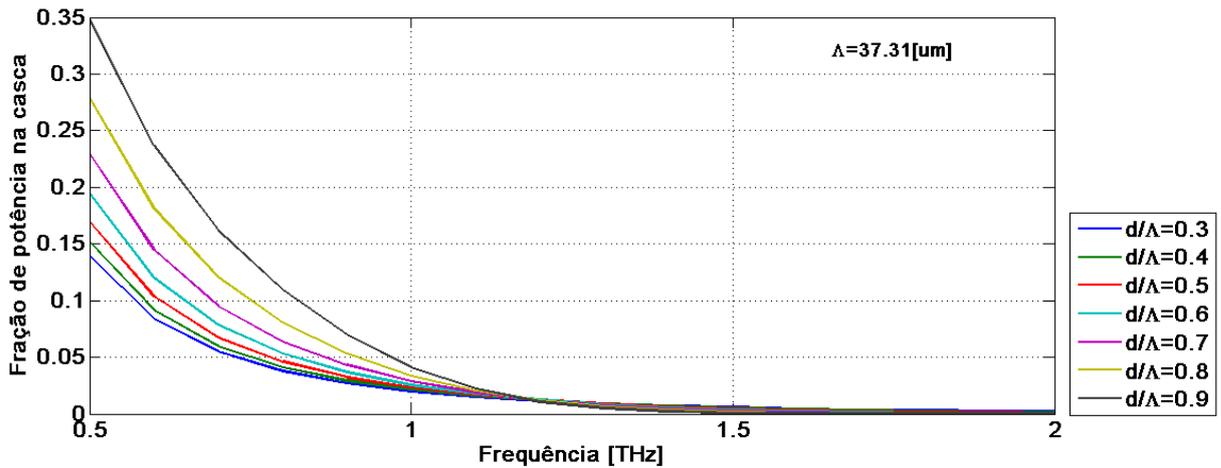


FIG 69 Fração de potência normalizada presente na casca da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.4.4 Perda efetiva do material (EML)

Mesmo para o caso em que há uma fração maior de furos de ar no fator de preenchimento, $d/\Lambda = 0.9$, o EML é maior que 0.4dB/cm aumentando para 0.6dB/cm em $1[\text{THz}]$. Tais valores do EML indicam o impacto expressivo das perdas de guiamento devido absorção material. A FIG 70 apresenta a EML dos modos fundamentais das fibras com diferentes razões de d/Λ .

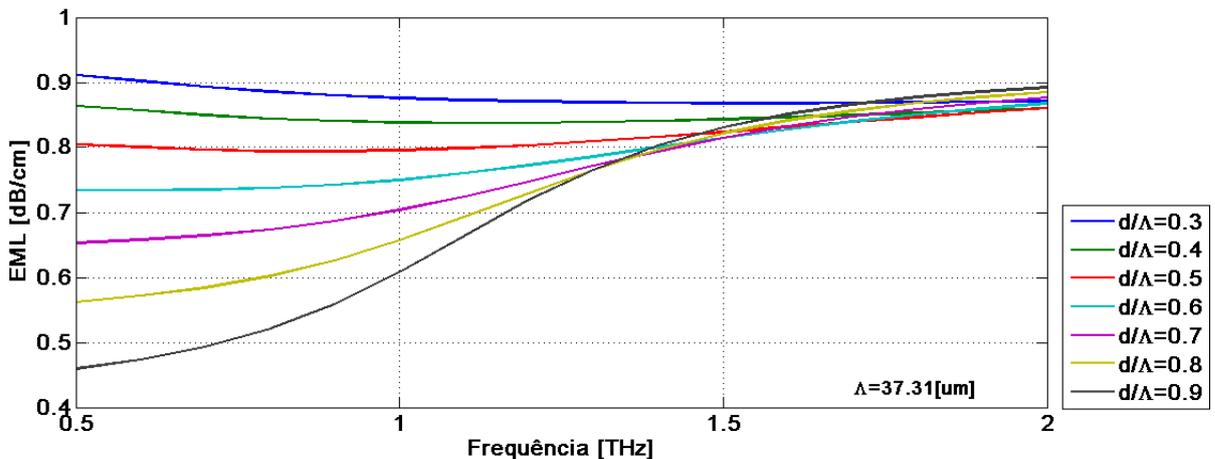


FIG 70 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D com película de ouro, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm , com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e vários valores de d/Λ .

3.4.5 Dispersão cromática

A FIG 71 apresenta as curvas da dispersão cromática para vários fatores de preenchimento da fibra porosa tipo D com defeito central e película de ouro na sua face plana. Observa-se que em frequências abaixo de 1.5 [THz] a dispersão cromática é muito baixa para todos os fatores de preenchimento.

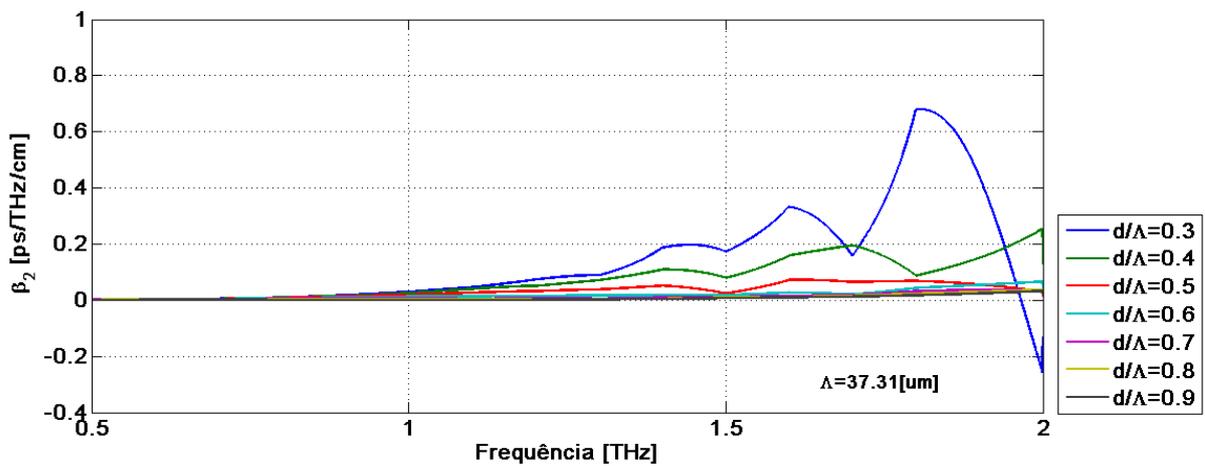


FIG 71 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D com película de ouro, com $\Lambda=37.31$ μm e vários valores de d/Λ .

3.5 Fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de um anel de ouro

Uma redução nas perdas da FIG 70 da seção anterior não pode ser alcançada substituindo a região do núcleo topas por um orifício de ar central. Mesmo que esteja configurado para permitir o confinamento do modo na região de ar, a fração de potência nos orifícios de ar não proporciona um acoplamento eficiente entre os modos da fibra e os SPP's da interface metal dielétrico. Para superar essa limitação de confinamento de baixa potência nos orifícios de ar, depositamos uma fina película de ouro na periferia do furo de ar central conforme demonstrado na FIG 72. As dimensões permanecem iguais as da configuração

mostradas na FIG 61, com a largura do anel de ouro fixada em $0.2\mu\text{m}$ e o diâmetro do furo central de ar em $d' = 40\mu\text{m}$. Como é feito nas seções anteriores, nessa também variou-se os valores do diâmetro dos furos de ar d para alcançar diferentes razões de d/Λ como mostrado na FIG 73.

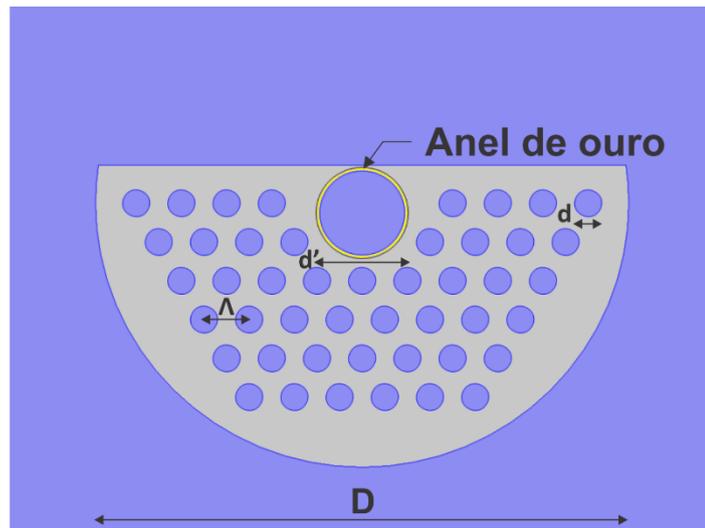
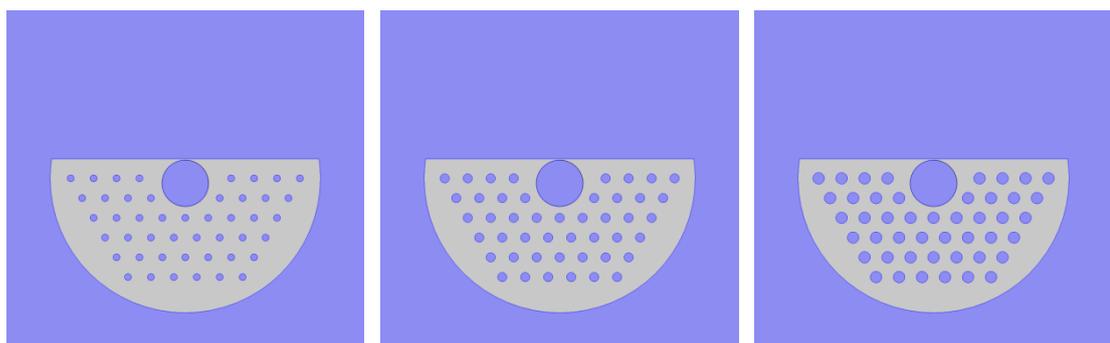


FIG 72 Esquemático da fibra porosa tipo D com defeito central e inclusão de um anel de ouro, o diâmetro do defeito central é $d'=40\mu\text{m}$, a distância entre os furos menores adjacentes é de $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e o diâmetro total da fibra é $D=440\mu\text{m}$.



a) $d/\Lambda = 0.3$

b) $d/\Lambda = 0.4$

c) $d/\Lambda = 0.5$

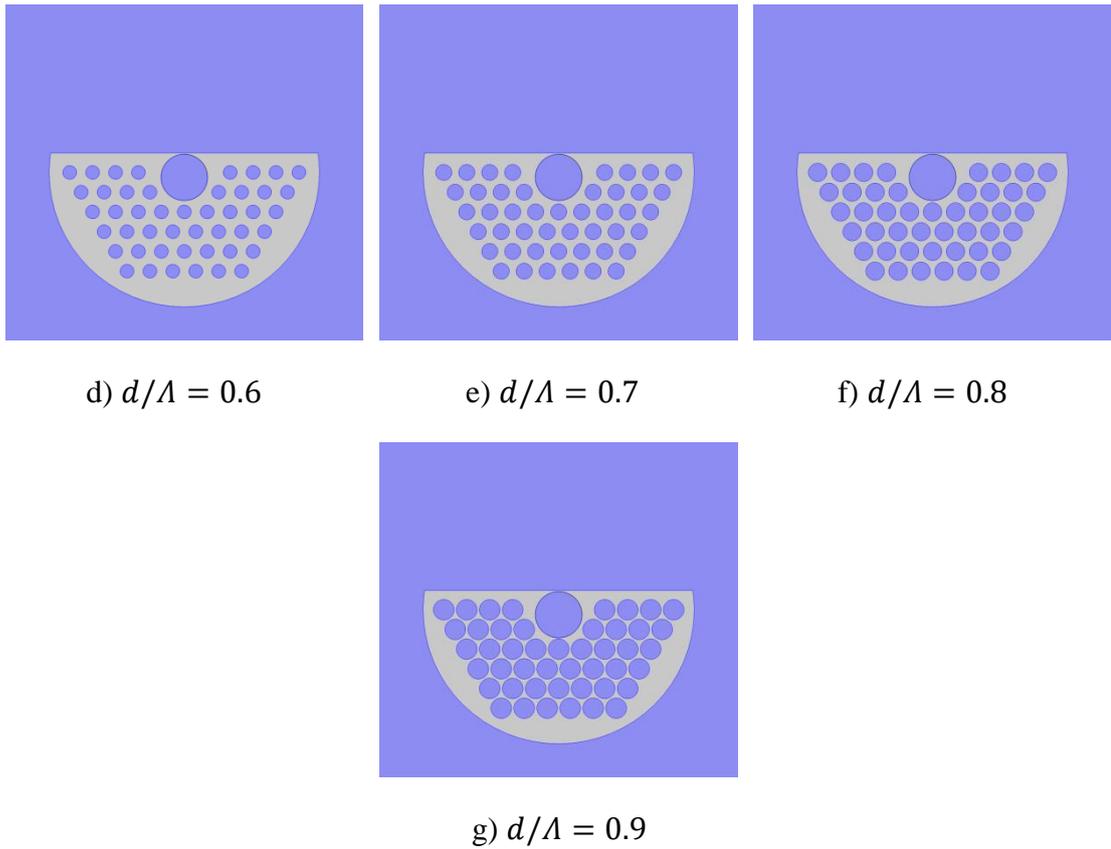
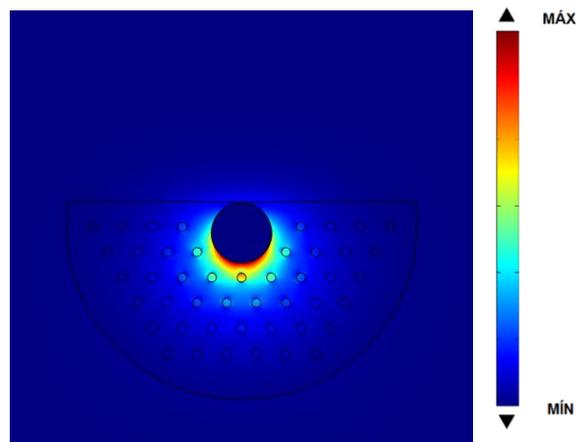


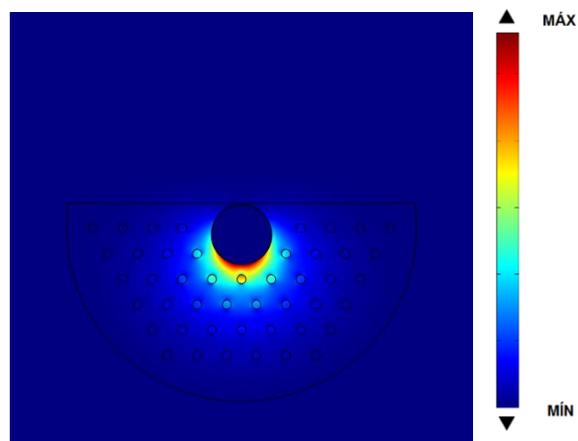
FIG 73 Fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.5.1 Potência modal

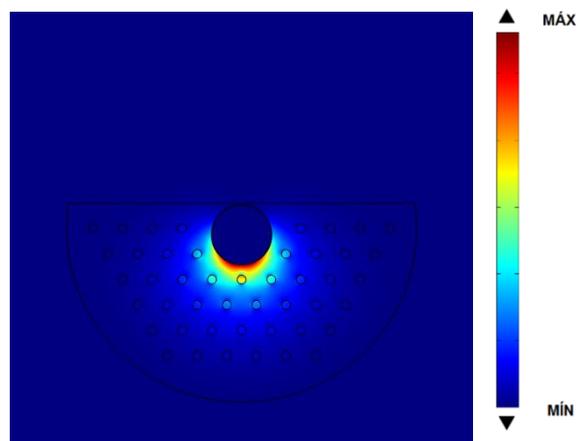
As FIG 74, FIG 75 e FIG 76 apresentam a distribuição de potência modal para o modo fundamental da fibra porosa tipo D com inclusão de um anel de ouro em sua periferia para diferentes fatores de preenchimento e diferentes frequências. O acoplamento dos modos da fibra com os SPP's leva o confinamento pronunciável da energia nos orifícios de ar adjacentes ao núcleo.



(a)

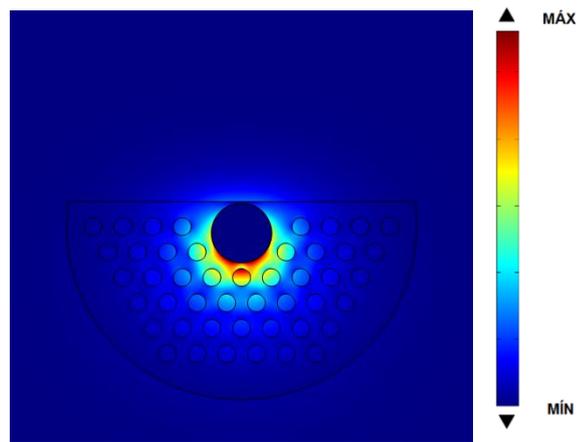


(b)

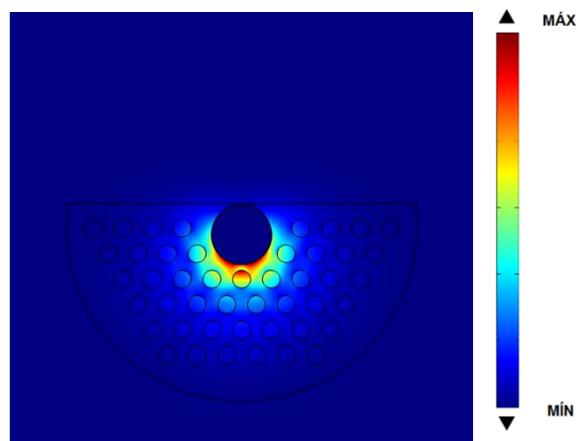


(c)

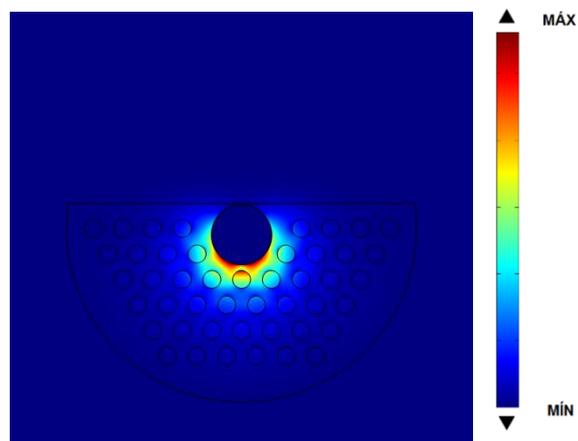
FIG 74 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.3$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)

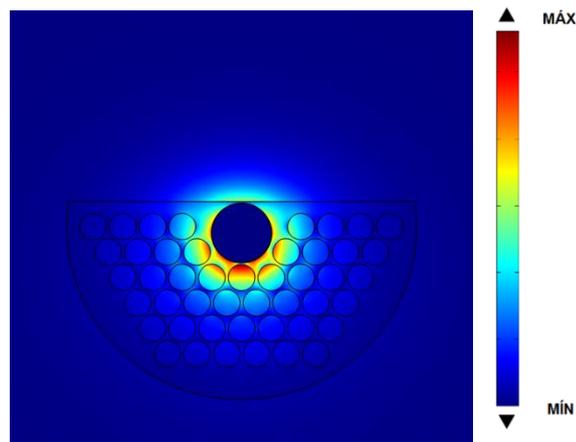


(b)

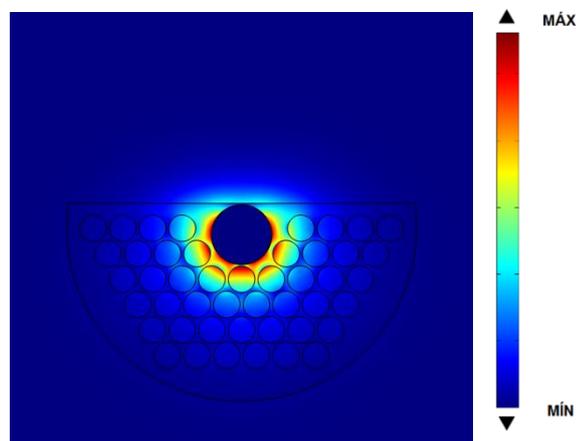


(c)

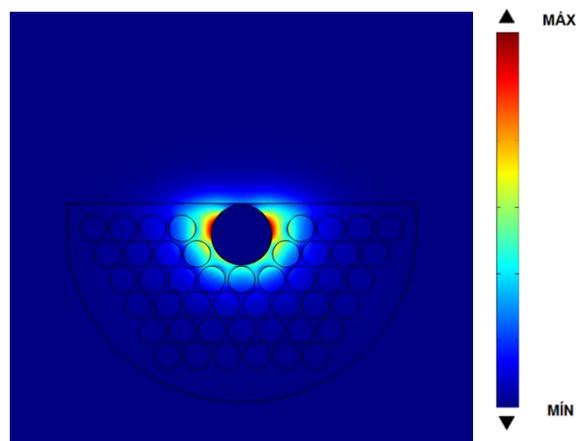
FIG 75 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.6$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].



(a)



(b)



(c)

FIG 76 Distribuição de potência modal normalizada do modo fundamental da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $d/\Lambda=0.9$ para (a) 0,5 [THz], (b) 1 [THz] e (c) 1.5 [THz].

3.5.2 Índice efetivo

A FIG 77 apresenta a curva de índice efetivo, n_{eff} , da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro em sua periferia variando o fator de preenchimento d/Λ . A variação efetiva do índice de modo fundamental é semelhante à apresentada na FIG 66, na qual, quanto maior o fator de preenchimento menor o índice efetivo para toda a faixa de frequência.

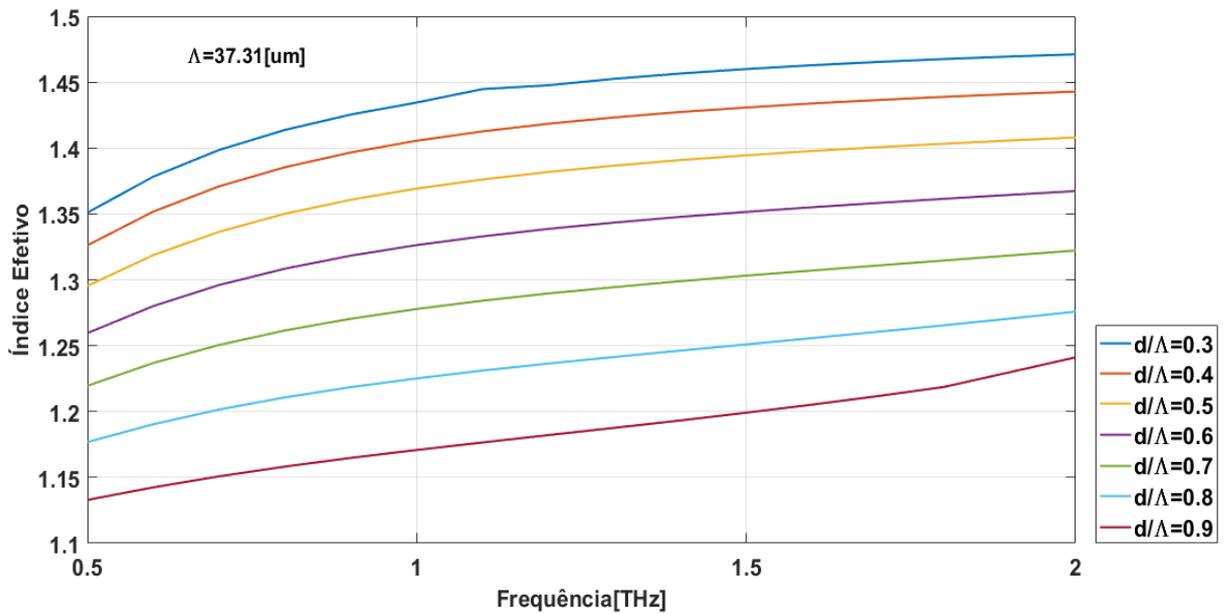


FIG 77 Índice efetivo da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.5.3 Fração de potência

As FIG 78, FIG 79 e FIG 80 apresentam as frações de potência no material (polímero), nos furos de ar, e na casca (região de ar que circunda a estrutura), respectivamente. Observa-se que para os maiores fatores de preenchimento, como por exemplo, $d/\Lambda = 0.8$ e $d/\Lambda = 0.9$, o máximo valor de potência guiada nos furos de ar ocorre em 1 [THz], após isso, a potência começa a vazar para o polímero.

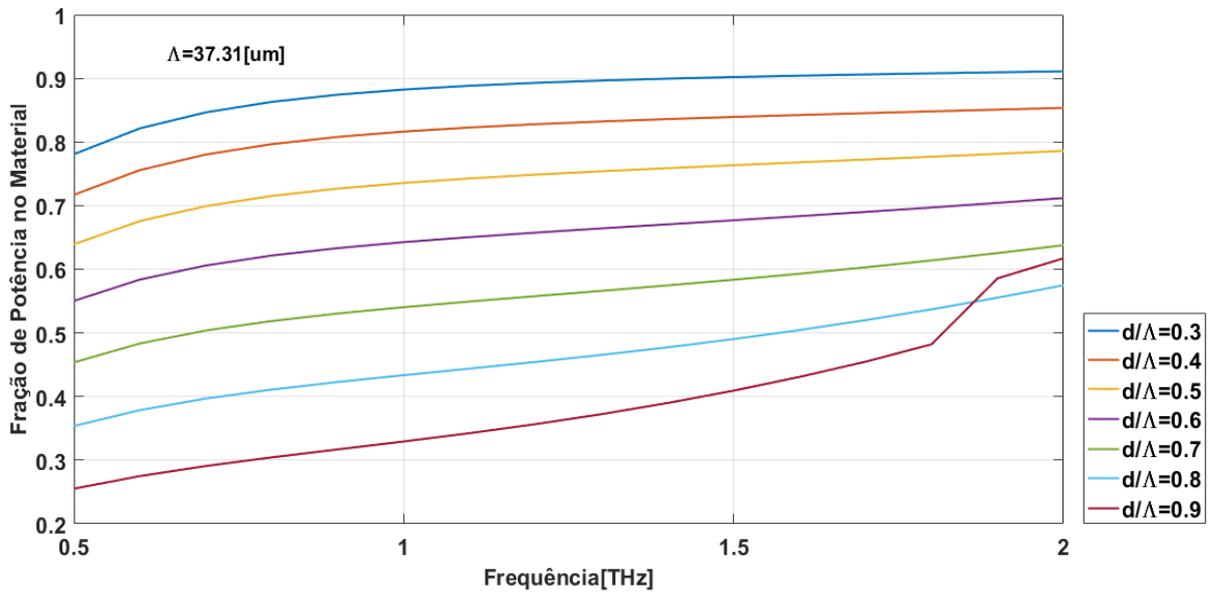


FIG 78 Fração de potência normalizada presente no material dielétrico da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda = 37.31 \mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

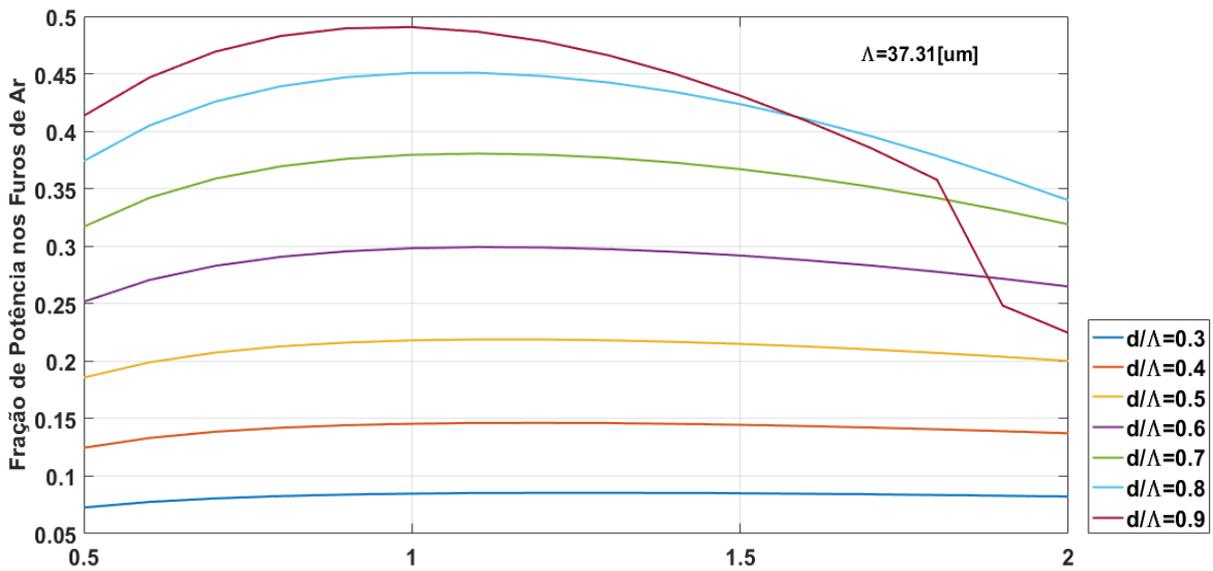


FIG 79 Fração de potência normalizada presente nos furos de ar da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda = 37.31 \mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

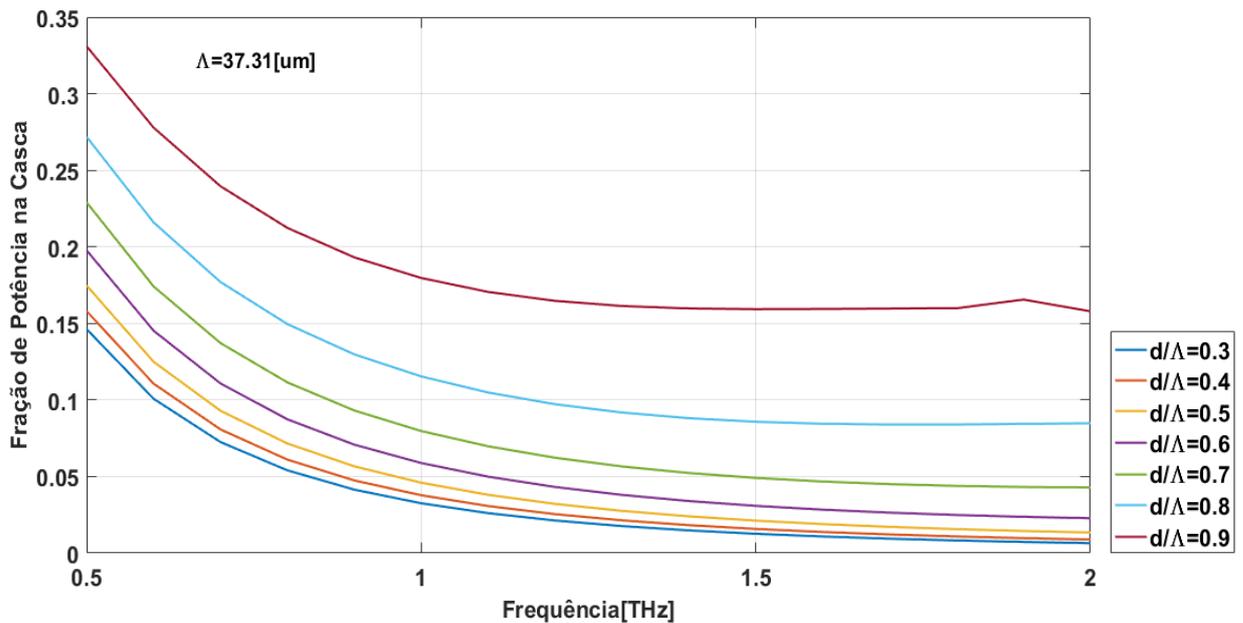


FIG 80 Fração de potência normalizada presente na casca da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31\mu\text{m}$ e com vários fatores de preenchimento d/Λ .

3.5.4 Perda efetiva do material (EML)

A FIG 81 apresenta a EML da fibra porosa tipo D com defeito central e um anel de ouro em sua periferia pra diversos fatores de preenchimento d/Λ variando com a frequência. Em comparação com a FIG 70, para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.9$, observa-se uma redução da EML para valores inferiores a 0.4dB/cm em frequências inferiores a 1 [THz], um resultado comparável ao que é alcançado nas tecnologias atuais de guias de onda THz [43]. No entanto, a EML apresenta um aumento pronunciável particularmente acima de 1.7 [THz]. Nessa região espectral os campos acabam por ficar confinados na interface metal-dielétrico, com uma fração muito pequena do campo penetrando nos orifícios de ar.

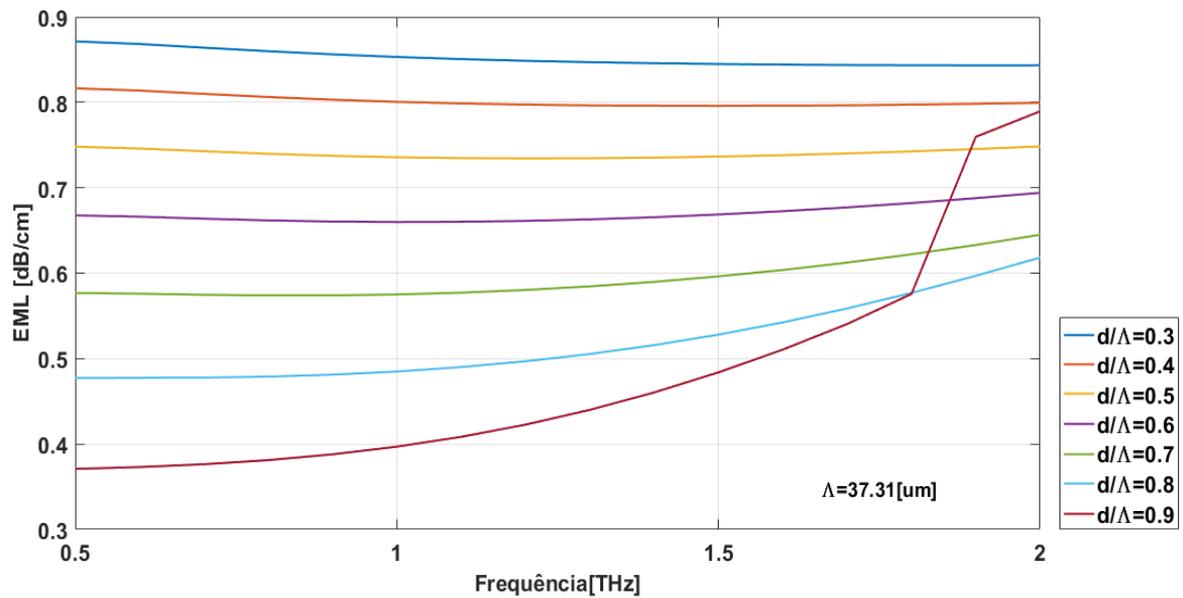


FIG 81 Perda efetiva do material da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, confeccionado com Topas 0.9 dB/cm, com $\Lambda=37.31$ μm e vários valores de d/Λ .

3.5.5 Dispersão cromática

A FIG 82 apresenta as curvas da dispersão cromática para vários fatores de preenchimento da fibra porosa tipo D de defeito central com a inclusão de um anel de ouro em sua periferia. A característica de dispersão é quase zero em toda a região espectral analisada, com exceção notável para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.3$, neste caso, β_2 apresenta uma largura de banda estreita com uma dispersão anômala acentuada.

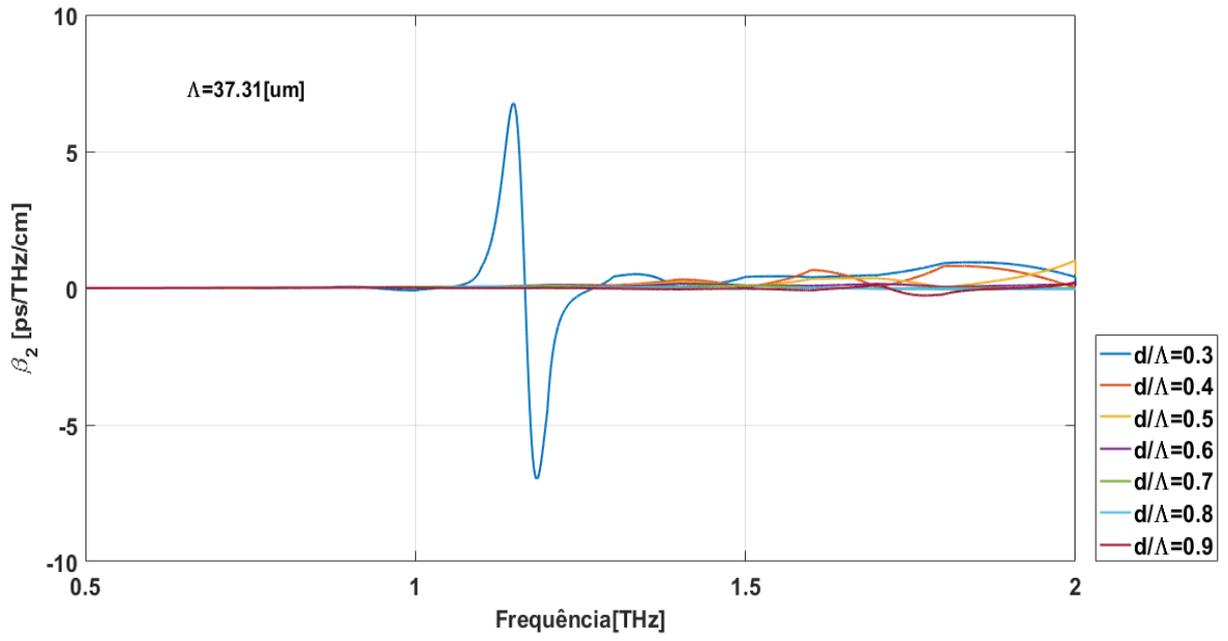


FIG 82 Dispersão cromática da fibra porosa tipo D de defeito central com inclusão de um anel de ouro, com $\Lambda=37.31$ um e vários valores de d/Λ .

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas simulações de algumas configurações de fibras especiais para aplicações em THz. Para estes dispositivos, foram estudadas as distribuições de campo elétrico, distribuições de potência nas diferentes regiões das fibras, perdas por absorção material e curvas de dispersão para diferentes fatores de preenchimento. Utilizou-se para tal, o software comercial COMSOL Multiphysics, e como truncamento do domínio computacional uma condição de dispersão (*Scattering Boundary Condition – SBC*).

A quebra da periodicidade da fibra porosa com defeito central, FIG 28, fez com que, para frequências mais baixas, a maior parte da potência se acumulasse no furo maior de ar central. Já em frequências mais altas a potência tende a ficar nos furos menores de ar e grande parte na casca, aumentando assim as perdas por absorção. Para os casos de maiores fatores de preenchimento, $d/\Lambda = 0.8$ ou $d/\Lambda = 0.9$, o máximo valor de potência guiada nos furos de ar ocorre em 1[THz], nessa frequência esses dois casos apresentaram perdas efetivas menores que 0.4dB/cm . Para todos os fatores de preenchimento estudados dessa fibra de defeito central existe uma região de dispersão nula entre 0.5 e 1.5 [THz], essa região de dispersão nula é apropriada para guiamento com uma estrutura que forneça baixa perda efetiva.

O estudo acerca do impacto nas características de guiamento da fibra porosa com defeito central e inclusão de uma anel de ouro na periferia do furo central, FIG 39, é realizado para enfatizar o impacto da tecnologia plasmônica nesse guia de onda. Diferente do que ocorre na distribuição de campo da fibra porosa com defeito central sem a inclusão do anel metálico, a potência tende a se confinar próximo a interface metal dielétrico, devido ao acoplamento entre os modos da fibra com os SPP's, caindo exponencialmente quando se distância da mesma. Esse mecanismo de guiamento comportado faz com que para o fator de preenchimento, de $d/\Lambda = 0.9$ por exemplo, as perdas efetivas para frequências até 1[THz]

sejam menores que $0.3dB/cm$, além disso, para esse fator de preenchimento, há uma região de dispersão cromática nula entre 0.5 à 1.25 [THz].

Os principais motivos do estudo de novos guias de onda para a faixa de THz recaem nas características promissoras dessa gama de frequência em imagem e sensoriamento. Portanto optou-se nesse trabalho o estudo de uma fibra pouco explorada nessa faixa de frequência mas que apresenta características geométricas que propiciam a interação entre os modos das fibras com perturbações externas. A fibra tipo D com defeito central, FIG 50, estudada nesse trabalho apresenta características próximas a fibra porosa de defeito central, na qual, para os casos de maior preenchimento de ar na fibra, $d/\Lambda = 0.9$ e $d/\Lambda = 0.8$, o máximo de potência guiada nos furos de ar da fibra ocorre em 1[THz]. Além de apresentar uma região de dispersão quase nula até 1.4 [THz] o maior fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.9$, apresentou perdas efetivas, até essa frequência, menores que $0.2dB/cm$.

Também é feito o estudo de uma estrutura já conhecida na faixa óptica, fibra porosa tipo D com defeito central e uma fina película de ouro em sua face plana, FIG 61, porém, redimensionada para que permitisse o guiamento na faixa de THz. Esse tipo de fibra é conhecida por fornecer características muito exclusivas, particularmente para a construção de plataformas de detecção. Após o estudo verificou-se que essa versão análoga da fibra tipo D com uma película de ouro em sua face plana apresenta, até para o caso em que há uma fração maior de ar no fator de preenchimento, $d/\Lambda = 0.9$, uma EML próxima a $0.6dB/cm$ em 1[THz]. Mesmo apresentando uma dispersão cromática nula até 1.25 [THz] para todos os fatores de preenchimento, o fato dessa estrutura apresentar uma EML elevada, demonstra que há a necessidade de um rearranjo da sua estrutura para confinar melhor a potência e diminuir assim a sua perda.

Por fim, foi apresentado uma fibra porosa tipo D com defeito central é uma fina película de ouro depositada na periferia do seu orifício central, FIG 72, afim de, apresentar características de guiamento em THz mais promissoras. O acoplamento dos modos da fibra com os SPP's, presentes na interface metal-dielétrico, leva o confinamento pronunciável da potência guiada nos orifícios de ar adjacentes ao núcleo. Para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.9$, observa-se uma redução da EML para valores inferiores a $0.4dB/cm$ em frequências inferiores a 1[THz], um resultado comparável ao que é alcançado nas tecnologias atuais de guias de onda THz. A característica de dispersão é quase zero em toda a região espectral analisada, com exceção notável para o fator de preenchimento $d/\Lambda = 0.3$, neste caso, β_2 apresenta uma largura de banda estreita com uma dispersão anômala acentuada.

Os objetivos principais do trabalho de dissertação de mestrado recaem na análise computacional de guias de onda THz. Os desenvolvimentos aqui reportados demonstraram que esses objetivos foram plenamente satisfeitos. Novas configurações de fibras foram propostas e numericamente caracterizadas.

CONTRIBUIÇÕES

- [1] Markos P. Cardoso, Patrick Gaia, João C. W. A. Costa and Anderson O. Silva, “ Mode characteristics of a D-shaped porous fiber with a thin gold layer in the THz regime”. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2017, Águas de Lindoia – SP SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2017.
- [2] CARDOSO, MARKOS P.; SILVA, A. O; COSTA, J. C. W. A. “Low-loss microstructured fiber with metallic inclusions for THz waveguiding”. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2015, Porto de Galinhas - PE. 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2015.
- [3] CARDOSO, M. P.; SILVA, A. O. ; COSTA, J. C. W. A. “Guidance features of microstructured fibers with metallic inclusions for operation in the THz spectral band”. In: 16° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2014, Curitiba. 16° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2014.
- [4] SILVA, A. O. ; CARDOSO, MARKOS P. ; GIRALDI, M. T. M. R. ; COSTA, JOAO C. W. A. “Investigation of the sensing properties of a localized surface plasmon nanocavity”. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, v. 1, p. 113-123, 2014.
- [5] MARKOS CARDOSO; JOAO CRISOSTOMO WEYL COSTA . Plasmonic Fabry-Perot Cavity for Nano-Optical Filter and Sensing Platform. In: XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2013, Fortaleza. SBRT 2013, 2013.
- [6] CARDOSO, MARKOS P.; SILVA, ANDERSON O. ; COSTA, JOAO C. W. A. . Plasmonic Fabry-Perot cavity as platform to build nano-optical filters and sensors. In: 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2013, Rio de Janeiro. 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013. p. 1.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Islam, G. K. M. Hassanuzzaman, Md. S. Habib, S. Rana, M. A. G. Khan, “Low-loss rotated porous core hexagonal single-mode fiber in THz regime”, *Optical Fiber Technology*, August, 2015.
- [2] C. L. de Souza Alice “Projeto e modelagem computacional de guias de ondas dielétricos, filtros e sensor refractométrico para Terahertz” / Alice Lima de Souza da Cruz. São José dos Campos, 2013. 191f, Dissertação de Mestrado, ITA 2013.
- [3] G. Williams, “Experiment generates THz radiation 20,000 times brighter than anyone else”, *J’Labs FEL*, 2003.
- [4] B. Bowden, J. A. Harrington, and O. Mitrofanov, “Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation,” *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 20, pp. 2945–2947, 2007.
- [5] K. Wang and D. M. Mittleman, “Metal wires for terahertz wave guiding,” *Nature*, vol. 432, no. 7015, pp. 376–379, 2004.
- [6] T. Jeon, J. Zhang, and D. Grischkowsky, “THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 16, pp. 161904-1–161904-3, 2005.
- [7] A. Dupuis, K. Stoeffler, B. Ung, C. Dubois, and M. Skorobogatiy, “Transmission measurements of hollow-core THz Bragg fibers,” *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 28, no. 4, pp. 896–907, 2011.
- [8] L.-J. Chen, H.-W. Chen, T.-F. Kao, J.-Y. Lu, and C.-K. Sun, “Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding,” *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 3, pp. 308–310, 2006.
- [9] M. Nagel, A. Marchewka, and H. Kurz, “Low-index discontinuity terahertz waveguides,” *Opt. Express*, vol. 14, no. 21, pp. 9944–9954, 2006.

- [10] A. Hassani, A. Dupuis and M. Skorobogatiy, "Porous polymer fiber for low-loss terahertz guiding," *Optics Express*, vol. 16, pp. 6340-6351, 2008.
- [11] D. Chen and H. Chen, "Highly birefringent low-loss terahertz waveguide: elliptical polymer tube," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 24, pp. 1553-1562, 2010.
- [12] M. Goto, A. Quema, T. Hiroshi, O. Shingo, N. Sarukura, "Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, part 2, number 2B, 2004.
- [13] A. Hassani, A. Dupuis, M. Skorobogatiy, Low loss porous terahertz fibers containing multiple sub-wavelength holes, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 071101.
- [14] W. L. Barnes, A. Dreux, T. Ebbesen, Surface plasmon subwavelength optics, *Nature*, vol. 424, pp. 824-829, 2003.
- [15] B. Liedberg, C. Nylander and I. Lundström, "Biosensing with surface plasmon resonance, how it all started," *Biosensors & bioelectronics*, vol. 10, pp. i - ix, 1995.
- [16] M. S. Islam, A. Z. Kouzani, X. J. Dai, W. P. Michalski, "Parameter sensitivity analysis of surface plasmon resonance biosensor through numerical simulation", *Proceedings of 2010 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2010) Gold Coast, 2010*.
- [17] R.C. Jorgenson and S.S. Yee, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 12, pp. 213-220, 1993.

- [18] K. Balaa, M. Kanso, S. Cuenot, T. Louarn and G. Minea, "Experimental realization and numerical simulation of wavelength-modulated fibre optic sensor based on surface plasmon resonance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 126, pp. 198-203, 2007.
- [19] Maier SA (2007) *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer, New York. doi: 10.1007/0-387-37825-1
- [20] WU, Z. et al. Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping. *Optics Express*, v. 19, n. 5, p. 11, Feb. 2011.
- [21] PREU, S. Coupled whispering gallery mode resonators in the terahertz frequency range. *Optics Express*, v.16, n. 10, p.8, May. 2008.
- [22] Wang, K.; MITTLEMAN, D. M. Metal wires for terahertz wave guiding. *Nature*, v. 432, p. 3, Nov. 2004.
- [23] R. Islam et al., Low-loss rotated porous core hexagonal single-mode fiber in THz regime, *Opt. Fiber Technol.* (2015).
- [24] M. Theuer, R. Beigang and D. Grischjowisky, "Highly sensitivity terahertz measurement of layer thickness using a two-cylinder waveguide sensor," *Applied Physics Letters*, vol. 97, 071106, 2010.
- [25] P. U. Jepsen, D. G. Cooke and M. Koch, "Terahertz spectroscopy and imaging – modern techniques and applications," *Laser and Photonics Reviews*, vol. 5, pp. 124-166, 2011.
- [26] X. He and X. Zhong, "Investigation of terahertz waves propagating through subwavelength metal-dielectric-metal structure," *Infrared Physics and Technology*, vol. 54, pp. 331-336, 2011.
- [27] www.comsol.com
- [28] Yun-Shik Lee, "Principles of Terahertz Science and Technology", Springer 2008.

- [29] FONTANA, E. Guias de onda. In: Eletromagnetismo. Guias de Onda. Recife: Dept. de Eletrônica e Sistemas, UFPE, 2013. Parte 2 Cap. 10. Disponível em <<http://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap10.htm#mozTocId909567>>. Acessado em: 04 Nov. 2013.
- [30] A. Markov and M. Skorobogatiy, “Two-wire terahertz fibers with porous dielectric support”, *Optics Express*, vol. 21, pp. 12728-12743, 2013.
- [31] LARGE, M. et al. *Microstructured polymer optical fibres*. New York: Springer, 2008.
- [32] ATAKARAMIANS, S. *Terahertz waveguides: a study of microwires and porous fibres*. 2011. 293 p. Thesis (PhD in Physics)-Faculdade of Engineering, Computer and Mathematical Sciences, University of Adelaide, Adelaide
- [33] SNYDER, A. W.; LOVE, D. J. *Optical waveguide theory*. London: Chapman and Hall, 1983.
- [34] UNG, B. et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding. *Optic Express*, v. 21, n. 10, p. 15, May 2013.
- [35] CHEN, L. et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding, *Optics Letters*, v.31, n. 3, p. 3, Feb. 2006
- [36] Alexander Argyros, “Microstructures in Polymer Fibres for optical Fibres, THz waveguides, and Fibre-based Metamaterials”, Hindawi Publishing Corporation, ISRN Optics, Volume 2013.
- [37] Diego Santos et al. “SPR Microstructured D-type optical fiber sensor configuration for refractive index measurement”, *IEEE Sensors Journal*, vol 15 n° 10, October 2015.
- [38] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, 1° ed., Rutgers University, 2008.
- [39] Carlos A. D. Francisco, “Fibras ópticas microestruturadas: modelagem e aplicações”, Tese de doutorado apresentada a Universidade de São Paulo da Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.
- [40] Spadoti H. Danilo, “Proposição e estudo de fibras ópticas microestruturadas tipo D: Gerenciamento de dispersão e alta birrefringência”, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 2008.]

- [41] Maier, S., *Plasmonics – Fundamentals and Applications*, Springer (2007).
- [42] T. D. P. Allsop, R. Neal, C. Mou, K. Kalli, S. Saied, S. Rehman, D. J. Webb, P. F. Culverhouse, J. L. Sullinvan, I. Bennion, “Formation and characterization of ultra-sensitive surface plasmon resonance sensor based upon a nano-scale corrugated multi-layered coated D-shaped optical fiber,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 48, pp. 394-405, 2012.
- [43] R. Islam, Md. S. Habib, G. K. M. Hasanuzzaman, S. Rana and Md. Anwar Sadath, “Novel porous fiber based on dual-assymetry for low-loss polarization maintaining THz wave guidance,” *Optics Letters*, vol. 41, pp. 440-442, 2016.