



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO - DEEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

MIRIELE CARVALHO PAIM

CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO E APLICAÇÕES DE
HIPERCRISTAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SALVADOR-BA

2020

CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO E APLICAÇÕES DE HIPERCRISTAIS

MIRIELE CARVALHO PAIM

Dissertação de mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Júnior Isídio de Lima.

SALVADOR-BA

2020

P143 Paim, Miriele Carvalho.

Características de propagação e aplicações de hiper cristais /
Miriele Carvalho Paim. – Salvador, 2020.

186 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Júnior Isídio de Lima.

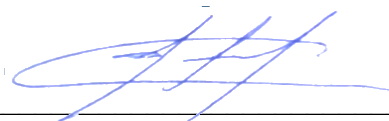
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2020.

1. Ótica de cristais. 2. Cristais fotônicos. 3. Fotônica –
Aplicações. 4. Intensidade da luz. 5. Hiper cristais –
Comportamento. I. Esquerre, Vitaly Félix Rodríguez. II. Lima,
Joaquim Júnior Isídio de. III. Universidade Federal da Bahia. IV.
Título.

Miriele Carvalho Paim

Características de Propagação e Aplicações de Hiper cristais

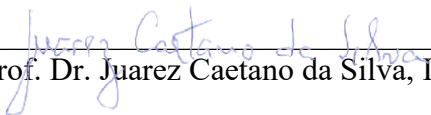
Dissertação de Mestrado aprovada em 31 de Março de 2020 pela banca examinadora
composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre, UFBA
Orientador



Prof. Dr. Igor Leonardo Gomes de Souza, UFBA



Prof. Dr. Juarez Caetano da Silva, IFBA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me fornecer a dádiva da vida e me dar forças e suporte para enfrentar toda a jornada.

Aos meus pais, por todo suporte e carinho e por sempre me motivarem a buscar o melhor para o meu desenvolvimento.

Ao meu noivo, pelo incentivo, apoio e paciência durante todos os momentos dessa jornada.

Ao meu orientador, professor Dr. Vitaly Felix Rodrigues Esquerre, pela oportunidade, pelo apoio oferecido e confiança depositada para a realização do mestrado.

Ao meu coorientador, professor Dr. Joaquim Júnior Isídio de Lima, pela paciência, pelo conhecimento e auxílio junto às ferramentas computacionais.

Aos membros da banca pelas sugestões ministradas para que este trabalho fosse melhorado.

Aos colegas do laboratório de Telecomunicações da Escola Politécnica da UFBA, pelo ambiente alegre e saudável de contribuições técnicas e auxílios importantes para o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia - UFBA, pelo apoio e contribuição durante este percurso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa de dedicação exclusiva e apoio financeiro.

E a todos que foram fundamentais para tornar possível a realização deste trabalho.

“Todas as coisas são feitas de átomos; pequenas partículas que se movem em movimento perpétuo, atraindo-se umas às outras quando estão distantes umas das outras, mas repelem ao serem espremidas umas nas outras. Nessa sentença, [...] há uma enorme quantidade de informações sobre o mundo.”

Richard P.Feynman, Seis Peças Fáceis, 1995

RESUMO

O interesse crescente por novos metamateriais e hiper cristais é justificado pela necessidade de materiais que atendam a constante evolução de demanda do mercado, trazendo novas estruturas e respostas que ponderem de melhor modo características como absorção e/ou reflexão. Este trabalho avalia o comportamento dos hiper cristais, analisando sua transmissão, reflexão e absorção, parâmetros importantes para aplicações em tecnologias como células solares. As estruturas foram simuladas na região do visível ao infravermelho de 400 a 1600 nm compostas por camadas alternadas de metais e dielétricos com variação em seus parâmetros, geometrias e configurações possibilitando alcançar melhores resultados. Os modos Transversal Elétrico (TE) e Transversal Magnético (TM) foram analisados apresentando resultados satisfatórios de absorção e reflexão ao longo de toda a faixa do comprimento de onda demonstrando novas possibilidades de estruturas de hiper cristais e possibilitando o seu uso em fabricação e testes em dispositivos plasmônicos.

Palavras-chave: Metamaterias; hiper cristais; transmissão; absorção; reflexão.

ABSTRACT

The growing interest in new metamaterials and hyper-critics is justified by the need for materials that meet the constant evolution of market demand, brings new questions and answers that reflect on the best ways to use and / or reflect. This work evaluates the behavior of hypercrystals, analyzing their transmission, reflection and absorption, which are important for applications in technologies such as solar cells. As structures were simulated in the region visible to the infrared from 400 to 1600 nm, composed of layers of metals and dielectrics with variation in their parameters, geometries and configurations that allow to obtain better results. The Transversal Electric (TE) and Magnetic Transversal (TM) modes were analyzed satisfactory results of absorption and reflection over the entire wavelength range, demonstrating new possibilities of hypocrisy structures and the possibility of use in tests and tests on devices plasmonic.

Keywords: Metamaterials; hypercrystals; transmission; absorption; reflection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Figura (a) Metamaterial multicamadas, Figura (b) Metamaterial multicamadas, Figura (c) Cristal fotônico 3D.....	30
Figura 2: Figura (a) Hiper cristal multicamadas com variações periódicas da espessura. Figura (b) hiper cristal em nanofios metálicos em dielétricos com densidade periodicamente variável, adaptado de [72].	31
Figura 3: Classificação de um metamaterial com base na permissividade e permeabilidade, adaptado de [45].	33
Figura 4: (a) Refração de um raio de luz ao passar pela interface entre dois meios com índices de refração positivos, (b) Refração de um raio de luz que passa de um meio de índice de refração positivo para outro de índice negativo.....	34
Figura 5: Formas de refração para os quatro tipos de meios óticos, adaptado de [48].....	35
Figura 6: Dispersão hiperbólica em metais/ dielétricos, adaptado de [49].....	38
Figura 7: Representação dos vetores de Poynting e dos vetores da constante de propagação para um meio ordinário na parte superior e material canhoto, adaptado de [61].	39
Figura 8: Representação esquemática de cristais fotônicos periódicos em uma, duas e três dimensões, onde a periodicidade está no material (tipicamente dielétrico) estrutura do cristal [68].	41
Figura 9: Básicos Elementos finitos (a) Unidimensional, (b) Bidimensional , (c) Tridimensional , adaptado de [82].	43
Figura 10: Exemplo de discretização pelo método dos elementos finitos(a), ampliação da malha (b).	43
Figura 11: Estrutura do Hiper cristal	45
Figura 12: Hiper cristais, adaptado de [72]	46
Figura 13: Estrutura de um hiper cristal fotônico com camadas alternadas de metal (dm) e dielétrico (dd).	47
Figura 14: Hiper cristal Fotônico composto por camadas alternadas de Grafeno e Si com período $d = dI + dH < \lambda$, dI e dH são as espessuras de Silício e Grafeno respectivamente, adaptado [9].	48
Figura 15: (a) Diagrama esquemático do metamaterial. (b) Esquema de hiper cristais fotônicos com 2D material. (c) Fator de Purcell calculado para HMM (linha preta) e PHC (linha	

tracejada), abaixo: os espectros de emissão de MoS ₂ e WS ₂ . d) FDTD simulação do campo simulação do campo eletromagnético emitido por um dipolo no plano sobre um HMM. (e) Dipolo no plano sobre uma APS. f) Imagens microscópicas ópticas de flocos esfoliados de MoS ₂ e flocos de CV2 cultivados com CVD.	49
Figura 16: (I) Estrutura do hiper cristal em multicamadas ITO-Si, (II) Absorção do Hiper cristal [73].	50
Figura 17: Diagrama de dispersão do hiper cristal Silício-Safira [77].	51
Figura 18: Estrutura do Hiper cristal validado [73].	52
Figura 19: (I) Resultados apresentados no artigo (II) Resultados validados	53
Figura 20: Representação do hiper cristal baseado na sequência Fibonacci.	54
Figura 21: Hiper cristal multicamadas alternadas de Au-Si	55
Figura 22: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150\text{nm}$ e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.	55
Figura 23: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200\text{ nm}$ e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.	56
Figura 24: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250\text{ nm}$ e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.	57
Figura 25: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300\text{ nm}$ e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.	58
Figura 26: Hiper cristal multicamadas alternadas de Si-Au.	61
Figura 27: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150\text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.	61
Figura 28: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200\text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.	62
Figura 29: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250\text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.	63
Figura 30: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300\text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.	64
Figura 31: Hiper cristal multicamadas alternadas de Ag-Si	66
Figura 32: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150\text{ nm}$ e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.	67
Figura 33: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200\text{ nm}$ e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.	68

Figura 34: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	69
Figura 35: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	70
Figura 36: Hiper cristal multicamadas alternadas de Ag-Si com dielétrico SiO_2	72
Figura 37: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	72
Figura 38: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	73
Figura 39: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	74
Figura 40: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.....	75
Figura 41: Representação do ângulo de incidência do Modo TE (I) e modo TM (II) na estrutura Fibonacci	77
Figura 42: Hiper cristal multicamadas alternadas de Au- SiO_2	78
Figura 43: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	78
Figura 44: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	79
Figura 45: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	80
Figura 46: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	81
Figura 47: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	82
Figura 48: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	83

Figura 49: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	84
Figura 50: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	85
Figura 51: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	86
Figura 52: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	89
Figura 53: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	90
Figura 54: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	91
Figura 55: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	92
Figura 56: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	93
Figura 57: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	94
Figura 58: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	95
Figura 59: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	96

Figura 60: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	97
Figura 61: Hipercristal multicamadas alternadas de SiO ₂ -Au.....	100
Figura 62: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	100
Figura 63: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	101
Figura 64: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	102
Figura 65: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	103
Figura 66: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	104
Figura 67: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	105
Figura 68: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	106
Figura 69: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	107
Figura 70: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	108
Figura 71: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	111

Figura 72: Propagação no metamaterial de Fibonacci de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	112
Figura 73: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	113
Figura 74: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	114
Figura 75: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	115
Figura 76: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	116
Figura 77: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	117
Figura 78: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	118
Figura 79: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87.	119
Figura 80: Hiper cristal multicamadas alternadas de Au- SiO ₂ .	121
Figura 81: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	122
Figura 82: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	123
Figura 83: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.	124

Figura 84: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	125
Figura 85: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	126
Figura 86: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	127
Figura 87: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	128
Figura 88: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	129
Figura 89: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento do dielétrico de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	130
Figura 90: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	133
Figura 91: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	134
Figura 92: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 200 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	135
Figura 93: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	136
Figura 94: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	137

Figura 95: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 250 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	138
Figura 96: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	139
Figura 97: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	140
Figura 98: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO ₂ em função da fração de preenchimento do dielétrico de metal com L = 300 nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, d=30 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	141
Figura 99: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	144
Figura 100: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	145
Figura 101: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 200 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	146
Figura 102: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	147
Figura 103: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	148
Figura 104: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 250 nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	149
Figura 105: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO ₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com L = 300 nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, d=20 nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.....	150

Figura 106: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	151
Figura 107: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	152
Figura 108: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	155
Figura 109: Propagação no metamaterial de Fibonacci de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	156
Figura 110: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	157
Figura 111: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	158
Figura 112: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	159
Figura 113: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	160
Figura 114: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	161
Figura 115: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	162
Figura 116: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	163

Figura 117: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 657$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.75 e ângulo de incidência de 0° ; (b) $\lambda = 760$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.75 e ângulo de incidência de 60° ; (c) $\lambda = 690$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ;(d) $\lambda = 473$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 830$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° ; (f) $\lambda = 470$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° .

..... 166

Figura 118: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 1000$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.75 e ângulo de incidência de 60° ; (b) $\lambda = 793$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.75 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 1004$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 60° ;(d) $\lambda = 1017$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 1080$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 60° ; (f) $\lambda = 550$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° .

..... 166

Figura 119: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 655$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.25 e ângulo de incidência de 0° ; (b) $\lambda = 889$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.25 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 802$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ;(d) $\lambda = 564$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 881$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° ; (f) $\lambda = 492$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° .

..... 167

Figura 120 : Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 697$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.25 e ângulo de incidência de 60° ; (b) $\lambda = 837$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.25 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 802$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ; (d) $\lambda = 650$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 60° ; (e) $\lambda = 758$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 60° ; (f) $\lambda = 582$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° .

..... 168

Figura 121: Curva do índice de refração do grafeno, parte real e imaginária. 170

Figura 122: Estrutura hiper cristal vertical multicamadas composto de Grafeno e Silício 171

Figura 123: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=8.98$ nm, $d=50$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

..... 172

Figura 124: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=8.98$ nm, $d=50$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	172
Figura 125: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=14.98$ nm, $d=80$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	173
Figura 126: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=14.98$ nm, $d=80$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	173
Figura 127: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=16.98$ nm, $d=90$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	174
Figura 128: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=16.98$ nm, $d=90$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	174
Figura 129: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=18.98$ nm, $d=100$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	175
Figura 130: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=18.98$ nm, $d=100$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de preenchimento de 0.1 a 0.9 de um total 20 nm.....	54
Tabela 2: Fator de preenchimento de 0.25 a 0.75 de um total de 20 nm.....	77
Tabela 3: Fator de preenchimento de 0.25 a 0.75 de um total de 30 nm.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HMMs	<i>Metamateriais Hiperbólicos</i>
PCs	<i>Cristais fotônicos</i>
PHCs	<i>Hipercristais fotônicos</i>
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
IR	<i>Infravermelho</i>
ϵ	<i>Permissividade Elétrica</i>
λ	<i>Comprimento de onda</i>
μ	<i>Permeabilidade Magnética</i>
LED	<i>Diodo emissor de Luz</i>
LI-FI	<i>Comunicação com Luz visível</i>
$\vec{E}$	<i>Campo Elétrico</i>
$\vec{H}$	<i>Campo Magnético</i>
D	<i>Densidade do fluxo elétrico</i>
B	<i>Densidade do fluxo magnético</i>
Γ	<i>Reflexão</i>
T	<i>Transmissão</i>
DPS	<i>Meio duplo positivo</i>
ENG	<i>Meio de épsilon negativo</i>
MNG	<i>Meio negativo</i>
DNG	<i>Meio duplo negativo</i>
n	<i>Índice de Refração</i>
LH	<i>Meio com ϵ e $\mu < 0$</i>
$\epsilon_{\perp}$	<i>Permissividade Perpendicular</i>
$\epsilon_{\parallel}$	<i>Permissividade paralela</i>
MEF	<i>Método dos elementos finitos</i>
TE	<i>Modo transversal Elétrico</i>
TM	<i>Modo transversal Magnético</i>
SI	<i>Símbolo do elemento químico Silício</i>

<i>AU</i>	<i>Símbolo do elemento químico Ouro</i>
<i>AG</i>	<i>Símbolo do elemento químico Prata</i>
<i>SIO₂</i>	<i>Símbolo do elemento químico Sílica</i>
<i>TPPS</i>	<i>Taam Plasmas Polaritons</i>
<i>p</i>	<i>Período</i>
<i>λ_g</i>	<i>Comprimento de onda Guiado</i>

SUMÁRIO

Introdução	25
1.1 Motivação	25
1.2 Objetivo	26
1.2.1 Objetivo Geral	26
1.2.2 Objetivos específicos.....	27
1.3 Metodologia.....	27
1.4 Organização do Trabalho.....	27
Revisão Bibliográfica.....	28
2.1 Metamateriais	28
2.2 Histórico estrutural	31
2.2.1 Classificação dos materiais segundo Permeabilidade e Permissividade	31
2.2.2 Dispersão hiperbólica em metais/ dielétricos	36
2.2.3 Índice de Refração Negativo e consequências	38
2.3 Cristais Fotônicos	40
2.3.1 Estruturas de Bandas Fotônicas	40
2.4 Método dos elementos Finitos.....	41
Hipercristais.....	44
3.1 Hipercristais.....	44
3.1.2 Estado da arte em hipercristais	48
Resultados e Discussões.....	52
4.2 Resultados.....	53
4.3 Estrutura de Hipercristal baseada na sequência de Fibonacci	54
4.3.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-Si	54
4.3.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, Si-Au	60
4.3.3 Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si	66

4.3.4 Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si-SiO ₂	71
4.4 Estruturas de Hiper cristal baseada na sequência de Fibonacci com variação de ângulo	76
4.4.1 Modo de Incidência TM	77
4.4.1.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO ₂	77
4.4.1.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO ₂ -Au	99
4.4.2 Modo de Incidência TE	121
4.4.2.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO ₂	121
4.4.2.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO ₂ -Au	143
4.4.3 Análise dos campos	165
4.5 Estrutura de Hiper cristal vertical composta por Grafeno	168
Considerações Finais	177
5.1 Conclusões	177
5.2 Trabalhos futuros	178
5.3 Publicações associadas ao trabalho	178
Referências Bibliográficas	180

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O interesse pelo controle da luz gerou um grande crescimento tecnológico ao longo da história. O estudo das respostas ópticas decorrentes da incidência da luz no material ocasionou um avanço em pesquisas a respeito dos metamateriais nas últimas décadas, visto que, obter um material com características específicas que atendam determinadas condições e aplicações se tornou essencial para suprir as demandas tecnológicas de áreas como a plasmônica, causando uma evolução constante nas pesquisas e abordagens sobre o tema. Muitos estudos foram realizados em torno de metamateriais para descoberta de novas estruturas e resultados, dentro deles destacam-se os metamateriais hiperbólicos (HMM's) e os cristais fotônicos (PC's) que são os meios artificiais mais utilizados para controlar a interação da luz em um meio. Ambos apresentam características interessantes, mas ambos trazem consigo restrições que impedem um maior desempenho do metamaterial projetado [1-8].

Os cristais fotônicos com modulação do índice de refração na escala de comprimento de onda da luz têm como características o espalhamento de luz de Bragg que gera a formação das lacunas de banda no espectro de propagação de onda, este espalhamento necessita de variação periódica na escala comparável ao comprimento de onda da luz [9-10] e tem sido utilizada amplamente para melhorar ou inibir espontaneamente o seu confinamento [14]. Já os metamateriais hiperbólicos (HMM's) seguem uma dispersão hiperbólica que pode suportar números de onda extremamente grandes nos modos de propagação, consequentemente, os modos high-k correspondentes às ondas evanescentes no ar podem se propagar nessas estruturas, eles apresentam uma abordagem alternativa para o aumento espontâneo de emissões confiando na densidade de banda larga dos estados no regime de dispersão hiperbólica. Como resultado, o limite de difração pode ser superado e os modos high-k podem sofrer Difração de Bragg se uma variação periódica de permissividade elétrica for introduzida nos metamateriais hiperbólicos [9-11], no entanto, os HMM's sofrem com acoplamento externo muito ruim devido à excitação dos estados de high-k que ficam abaixo da linha de luz [14].

Os hiper cristais fotônicos (PHC's) surgiram como uma nova classe de metamateriais. Eles unem as propriedades dos HMM'S e dos PC's com o objetivo de obter melhores características, superando os limites ópticos apresentados por esses metamateriais que até então são os mais utilizados [10]. Os hiper cristais podem ser projetados com a combinação de diferentes materiais, períodos e dimensões para serem aplicados em determinados comprimentos de onda e frequências, de modo a obter o melhor aproveitamento da estrutura.

Essa nova classe de metamaterial consegue superar as desvantagens da limitação da largura de banda e o fraco confinamento de luz dos metamateriais. Diferente dos metamateriais e dos cristais fotônicos, os hiper cristais possuem células unitárias que tem subcomprimento de onda e resposta eletromagnética qualitativamente diferente do comportamento médio esperado observado em metamateriais [14-15].

Em relação aos metamateriais hiperbólicos os hiper cristais fotônicos trazem melhores desempenhos em aspectos como estrutura de bandas, saídas eficientes dos modos high-k, regulação e confinamento da onda de superfície. No HMM existe um Band Gap completo no espaço vetorial, enquanto no PHC existem múltiplas bandas proibidas nas dimensões de frequência [9]. Essas estruturas complexas dos PHC's permitem um maior controle na propagação da luz [13].

Em prática é difícil obter os HMM's em dispositivos reais, pois neles existem modos high-k que estão abaixo da linha de luz e não se propagam para dentro do espaço livre [9]. Enquanto que no hiper cristal fotônico a sua periodicidade dobra os modos high-k o que permite um maior acoplamento de luz [14].

Os hiper cristais estão sendo atualmente pesquisados devido à possibilidade de estarem atuantes na tecnologia mudando suas características nano estruturais, aplicado a conceitos inovadores como LED's (diodos emissores de luz), Li-Fi (Light Fidelity) e Células solares [14-15].

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é a análise do comportamento dos hiper cristais fotônicos por meio de um estudo da formação de padrões periódicos dos PHC a partir de alterações propostas na geometria do metamaterial (espessura e alterações de metal e dielétrico) e características ópticas como índice de refração, permissividade, ângulo de incidência.

1.2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como meta alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a formação de padrões periódicos dos hiper cristais;
- Analisar a estrutura dos hiper cristais, assim como os diferentes materiais e arranjos;
- Analisar as propriedades ópticas de transmissão e propagação de luz dos hiper cristais;
- Analisar as respostas nas propagações para os modos TE e TM;
- Realizar simulações alterando a estrutura dos materiais e ângulo de incidência.

1.3 Metodologia

Para a metodologia do trabalho foram utilizadas como ferramentas para construção da simulação das estruturas e tratamento de dados os softwares: Comsol, Origin, Surfer e Matlab. Com o Comsol foi possível projetar estruturas e escolher os materiais responsáveis pela composição das mesmas, além de definir parâmetros variáveis como dimensionamento, permissividades, índices de refração e variação do comprimento de onda a serem analisados. Para o tratamento de dados foi utilizado o software Matlab que permitiu observar os resultados nas regiões de maior interesse de maneira mais ágil além de verificar o comportamento dos materiais. O Surfer e o Origin foram utilizados para geração dos gráficos resultantes.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos para fornecer ferramentas teóricas e computacionais modelando hiper cristais fotônicos. O presente capítulo apresenta uma motivação para a leitura assim como os objetivos do trabalho e metodologia utilizada para obter os resultados esperados das estruturas dos hiper cristais. O capítulo 2 contém uma breve revisão bibliográfica a respeito dos metamateriais mais conhecidos nas literaturas até então e que são à base dos hiper cristais. No capítulo 3 consta uma explanação sobre hiper cristais, assim como um estudo da arte apresentando literaturas sobre o tema. No capítulo 4 e 5 são apresentados os resultados das simulações e conclusões com sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Metamateriais

O estudo das propriedades dos materiais é possível através das suas respostas eletromagnéticas com o uso de suas constantes magnéticas (a permissividade dielétrica ϵ e a permeabilidade magnética μ) que permitem a análise da interação dos elétrons entre eles e com os núcleos, obtendo características que diferem os materiais com as suas propriedades de propagação e transmissão [11,16-18].

Existe uma extensa gama de materiais naturais disponíveis na natureza, entretanto, as suas propriedades eletromagnéticas são limitadas para uma variedade de aplicações que são necessárias para uma série de avanços científicos, como por exemplo, a fraca interação dos materiais naturais com os campos magnéticos em altas frequências [17], que limitam o grau de controle das interações luz-matéria no regime visível e IR. Tais limitações levantaram a necessidade de criar um material artificial (metamaterial) que possibilitasse a manipulação das propriedades de onda com alteração de características como combinação de materiais e periodicidade, que juntos melhorassem seu desempenho tornando possível obter características não obtidas em materiais naturais. Por exemplo, a absorção de material próximo à frequências visíveis e infravermelhas próximas (IR) é desejável para a coleta solar, aplicações fotovoltaicas, portanto, essa funcionalidade é altamente procurada em um material artificial [19-24].

Em 1967 V. G. Veselago começou a discutir a ideia de um material que tivesse simultaneamente ϵ (permissividade) e μ (permeabilidade) negativos, constantes dielétricas que são de importância fundamental para determinar a propagação eletromagnética no material [25], Veselago mostrou que a permeabilidade e a permissividade simultaneamente negativas resultam em um índice de refração negativo para tal meio o que resultava na distorção da luz [33,58]. Entretanto, apenas em 1999, D. R. Smith, realizou experimentalmente um sistema simultaneamente negativo (ϵ e μ negativos requerida para o índice de refração negativo) nas micro-ondas, sistema este que era composto por um raio periódico de ressonadores e fios condutores de anéis, nesse momento o nome metamaterial foi estabelecido como o termo geral para a matéria construída artificialmente, feito de elementos ressonantes (subwoofers) periodicamente posicionados, muitas vezes referidos como meta-átomos [32].

Rodger M. Walser, em 2003, sintetizou o termo Metamaterial definindo como uma composição macroscópica tendo um sintético, tridimensional, arquitetura celular periódica projetada para produzir uma combinação otimizada, não disponível na natureza, de duas ou mais respostas de excitação específicas [28].

Um metamaterial em geral pode ser descrito como um composto macroscópico de estrutura periódica ou não periódica, cuja função é devida tanto à arquitetura celular quanto à composição química. Se o metamaterial é considerado como um meio eficaz, existe um requisito adicional de que o tamanho celular seja menor ou igual ao subcomprimento de onda [31].

Os metamateriais são uma nova classe de materiais gerados pelo arranjo de elementos estruturais artificiais (como pode ser visto na Figura 1) projetados para obter propriedades vantajosas e / ou incomuns que não ocorrem em materiais naturais, os quais possuem um limite em suas propriedades elétricas ou magnéticas restringindo a manipulação da luz [42]. Sua funcionalidade dependerá das combinações que seus materiais estruturais podem oferecer em propriedades magnéticas [33]. Eles podem ser também definidos como estruturas eletromagnéticas eficazes com propriedades incluindo dielétricos, uma vez que constituem estruturas celulares unitárias de subcomprimento de onda. Nesta definição, o tamanho da célula unitária da estrutura, ou período p , é muito menor que o comprimento de onda guiado λ_g da onda de propagação ($p \ll \lambda_g$), de modo que os campos são calculados em média por meio das células unitárias tornando possível ver a estrutura como um meio homogêneo em escala macroscópica [34].

Os resultados experimentais iniciais na pesquisa de metamateriais na década de 2000 pertenciam à faixa de frequência de micro-ondas, com elementos de metamaterial na escala de milímetros (mm) [32]. O progresso tecnológico na nano fabricação permitiu dimensionar as dimensões dos elementos do metamaterial para o regime de micrômetros (μm) e nanômetros (nm) [35].

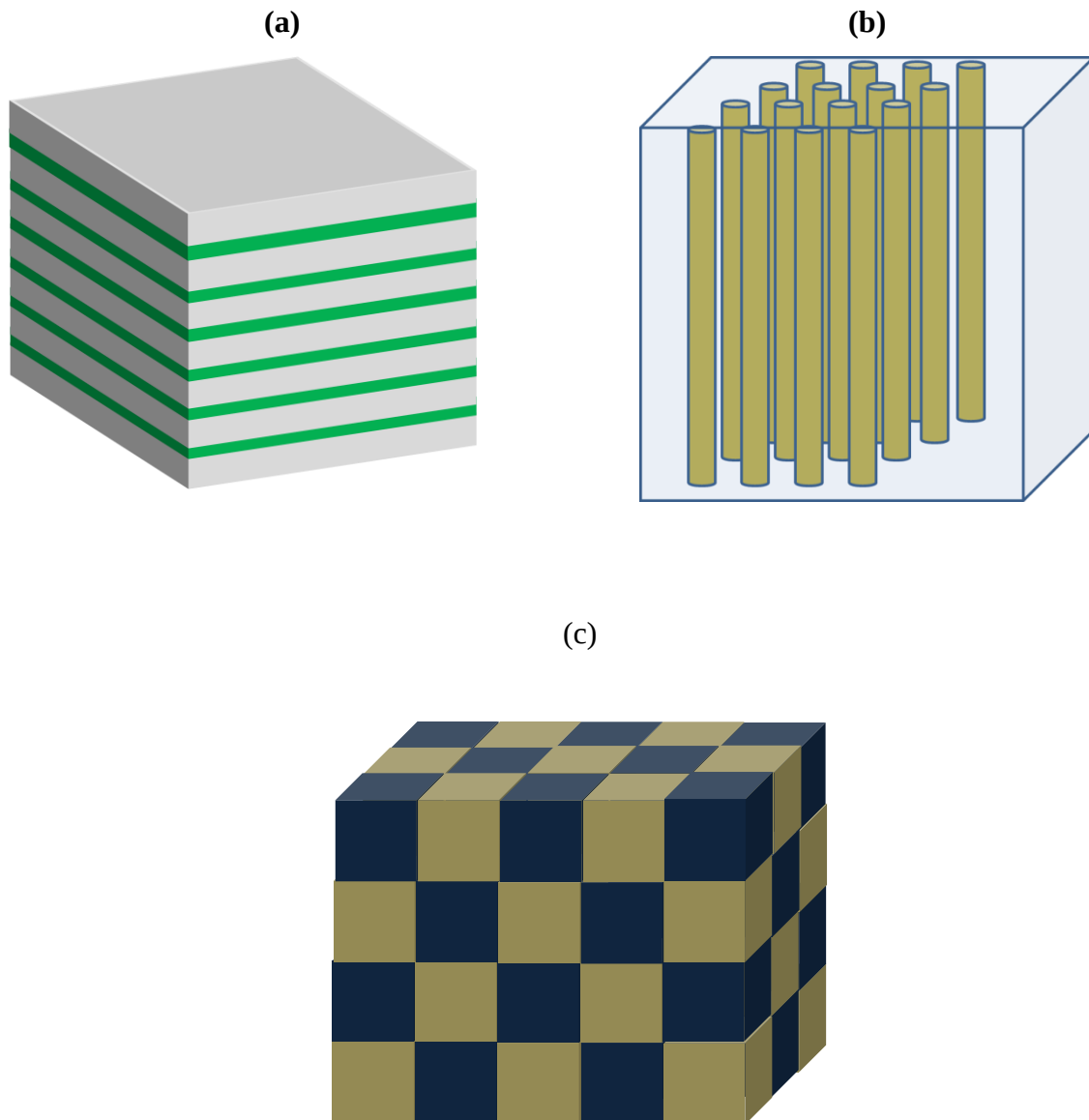


Figura 1: Figura (a) Metamaterial multicamadas, Figura (b) Metamaterial multicamadas, Figura (c) Cristal fotônico 3D.

A Figura 2(a) mostra uma estrutura planar de um hiper cristal em que as camadas são compostas por metamateriais e dielétricos e as variações periódicas na espessura das camadas de um dos materiais transformam o meio em um hiper cristal. Na Figura 2 (b) é apresentado um conjunto de nanofios em que sua variação periódica de densidade possibilita a criação de um hiper cristal. A fabricação de hiper cristais planares é possível através da epitaxia de feixe molecular ou deposição de vapor químico, no entanto ainda é estudada a fabricação baseada em nanofios [72].

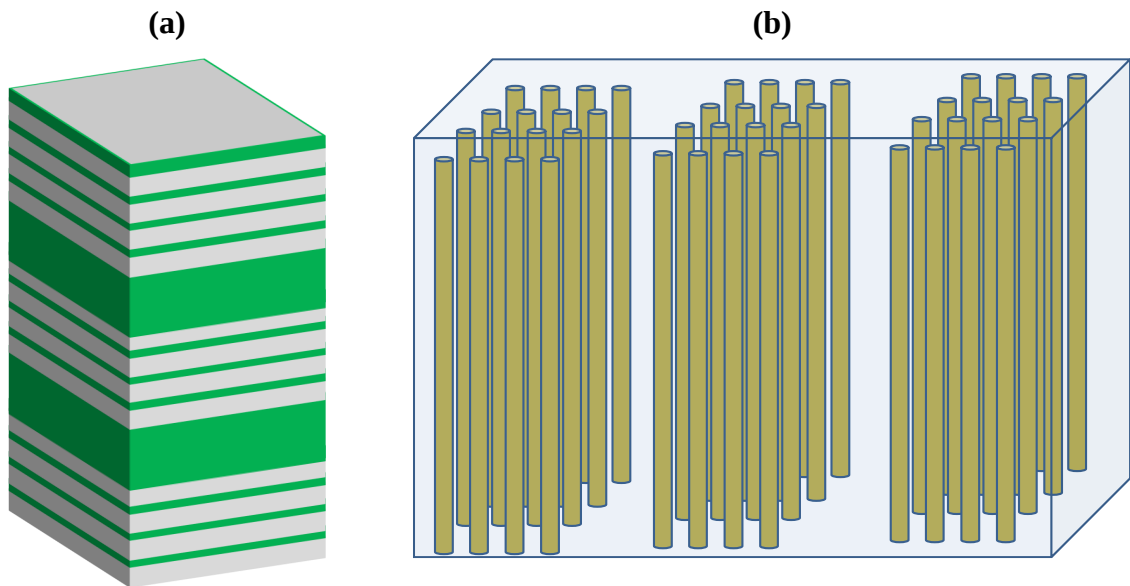


Figura 2: Figura (a) Hiper cristal multicamadas com variações periódicas da espessura. Figura (b) hiper cristal em nanofios metálicos em dielétricos com densidade periodicamente variável, adaptado de [72].

2.2 Histórico estrutural

Essa seção apresenta características importantes para o comportamento dos metamateriais, abordando assuntos como as propriedades de permeabilidade, permissividade, hiperbolicidade e a resposta da luz quando incidida no meio.

2.2.1 Classificação dos materiais segundo Permeabilidade e Permissividade

A permissividade e permeabilidade permitem uma classificação dos materiais de acordo com a resposta dos seus parâmetros medidos (valores positivos ou negativos). Essa representação pode ser constatada na Figura 3 que representa a divisão dos materiais segundo esses parâmetros. Isso se deve ao fato de que a resposta de um sistema à presença de um campo de energia eletromagnética é determinada pelas propriedades dos materiais envolvidos, tais propriedades são descritas pela definição de parâmetros de permissividade ϵ e permeabilidade μ .

Nos metamateriais, mudanças na estrutura provocam mudanças no comportamento eletromagnético, levando a valores antes inesperados. Com a escolha dos valores de permissividade e permeabilidade é possível obter determinados valores para o índice de refração (n), que é dado por:

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2.1)$$

Usando permissividade ϵ e permeabilidade μ para a classificação dos metamateriais é obtido os seguintes meios [44,45]:

- Um meio com permissividade e permeabilidade maior que zero ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$), que são chamados de meio de duplos positivos (DPS). A maioria dos meios de ocorrência como, por exemplo, dielétricos, recebem esta designação, isto ocorre pelo fato de que os sentidos dos campos elétrico ($\vec{E}$) e magnético ($\vec{H}$) possuem uma direção de propagação equivalente.
- Um meio com permissividade menor que zero e permeabilidade maior que zero ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$), que são chamados meio de épsilon negativo (ENG). Em certas faixas de frequência, muitos plasmas (que são considerados o 4º estado da matéria) exibem essas características.
- Um meio com permissividade maior que zero e permeabilidade menor que zero ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$), que são chamados de meio negativo (MNG). Em certos regimes de frequência, alguns materiais girotrópicos exibem essa característica.
- Um meio com permissividade e permeabilidade menor que zero ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$), que são chamados de meio de duplos negativos (DNG), levando a um índice de refração negativo. Esta classe de materiais só foi demonstrada com construções artificiais (metamateriais).

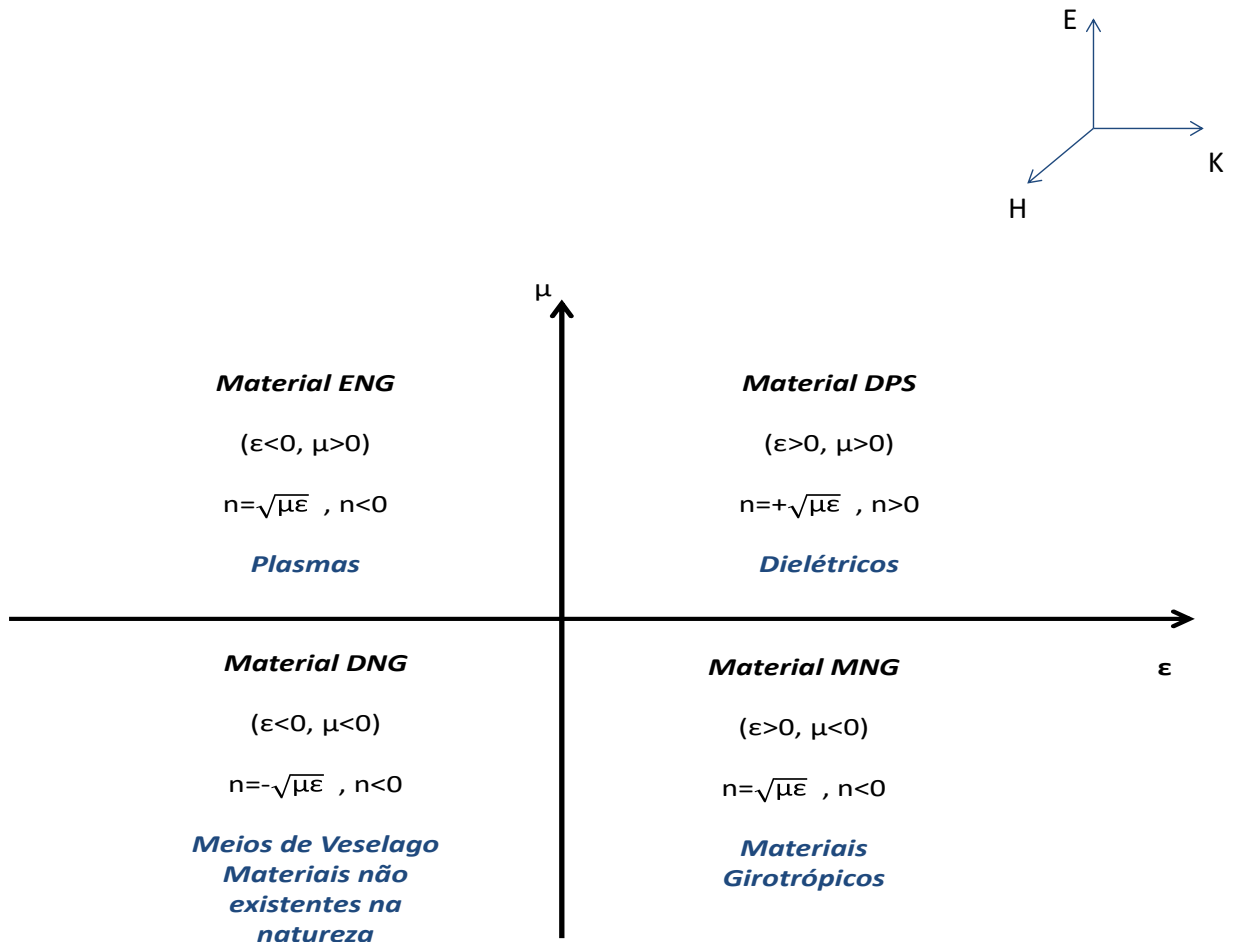


Figura 3: Classificação de um metamaterial com base na permissividade e permeabilidade, adaptado de [45].

Um metamaterial fotônico é projetado com o objetivo de se obter uma estrutura periódica que interaja com frequências ópticas e o seu período de subcomprimento de onda distingue o metamaterial das estruturas de lacunas da banda fotônica [44]. Meios com μ negativo são mais difíceis de encontrar na natureza devido às fracas interações magnéticas na maioria dos materiais de estado sólido, diferente do que ocorre, por exemplo, em materiais ferromagnéticos, no qual as interações magnéticas são fortes o suficiente (e as perdas são pequenas o suficiente) para produzir regiões com permeabilidade magnética negativa [56].

Nos meios com $\epsilon < 0$ e $\mu < 0$, os campos $\vec{E}$ e $\vec{H}$ de uma onda eletromagnética formam um sistema de regra da mão esquerda com o vetor de onda $\vec{K}$, esses materiais foram denominados por Veselago de material canhoto. Os materiais canhotos possuem como característica o vetor de Poynting $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ e o vetor de onda $\vec{K}$ apontando em sentidos opostos,

fazendo com que a energia se propague em sentido contrário ao deslocamento de fase já que a velocidade de fase tem a mesma direção e sentido do vetor de onda.

Um meio que apresenta simultaneamente permissividade e permeabilidade negativa apresenta como resposta um índice de refração negativo, que acontece devido ao fato da luz ser refratada para o mesmo lado da normal em que se encontra o raio incidente. Essa relação (no caso de materiais não magnéticos) é conhecida como lei de Snell.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.2)$$

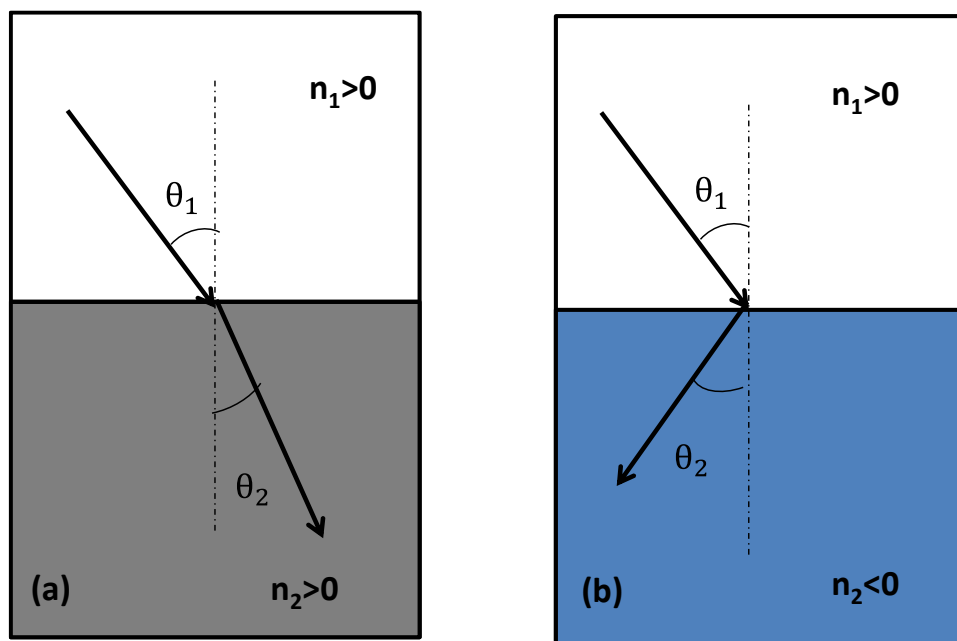


Figura 4: (a) Refração de um raio de luz ao passar pela interface entre dois meios com índices de refração positivos, (b) Refração de um raio de luz que passa de um meio de índice de refração positivo para outro de índice negativo.

Os coeficientes de transmissão e reflexão são determinados pela continuidade dos componentes do campo na fronteira e são dadas pelas Equações de Fresnel e pela lei de Snell, respectivamente [55]. A forma matemática da Lei de Snell mostra que caso um dos materiais possua um índice de refração negativo (o que não existe na natureza) o feixe seria refratado em ângulos negativos, um dos motivos pelos quais Victor Veselago começou a propor a criação de um metamaterial. A Figura 5 ilustra os quatro casos de refração existentes até o momento com

base na Figura 3 que classifica um metamaterial com base na permissividade e permeabilidade [48].

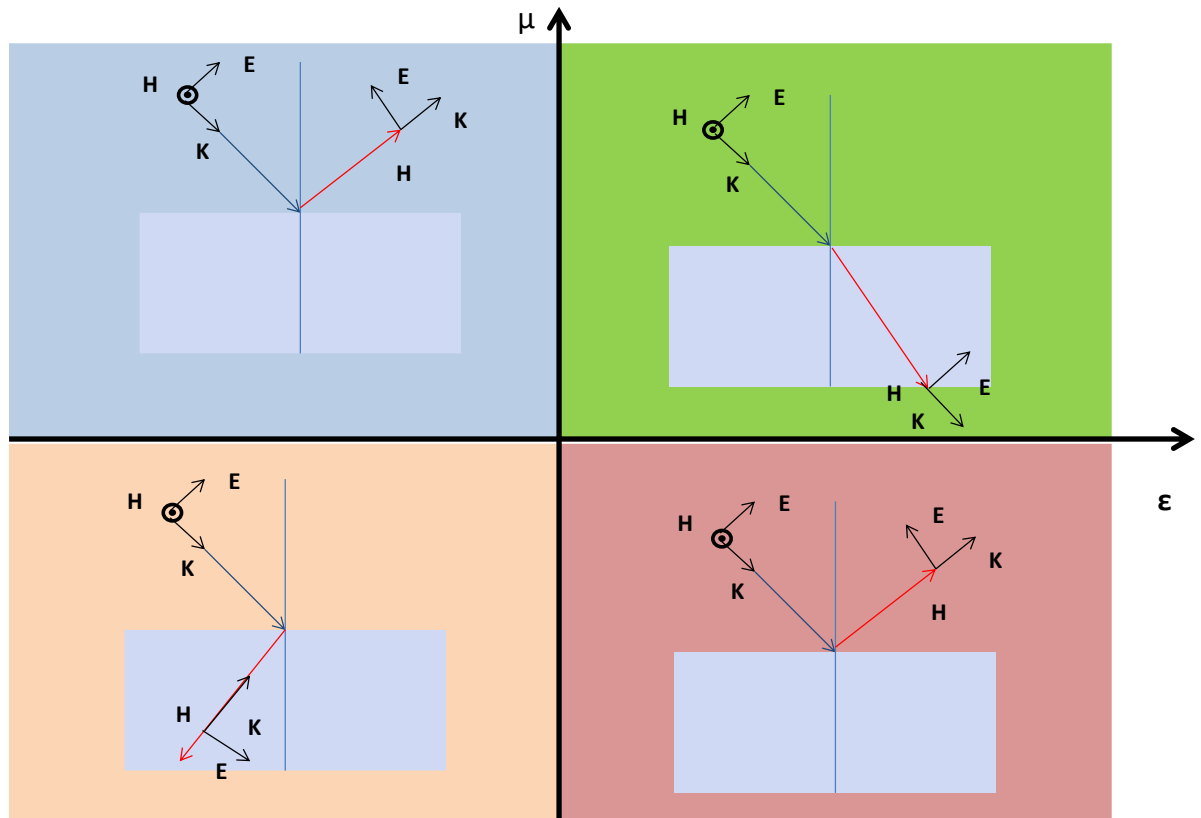


Figura 5: Formas de refração para os quatro tipos de meios óticos, adaptado de [48].

A Figura 5 demonstra os quatro diferentes comportamentos que ocorrem em um material quando a luz é incidida em um meio com determinados valores de permissividade e permeabilidade. Nos materiais DPS ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$) o raio é refratado, nos materiais ENG ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$), os raios são completamente refletidos, no qual apenas ondas evanescentes conseguem penetrar neles. Nos materiais MNG ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) também ocorre reflexão não permitindo a propagação de ondas. Por fim no meio DNG ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$), ocorre refração, porém é possível verificar que ela vai para o lado oposto do meio DPS, em muitas literaturas dito como o “lado errado”. Materiais com essa propriedade foram descobertos por Veselago e já produzidos em laboratórios.

2.2.2 Dispersão hiperbólica em metais/ dielétricos

Metamateriais hiperbólicos (HMM's) são materiais eletromagnéticos uniaxiais extremamente anisotrópicos que se comportam como um metal em uma direção e como um dielétrico na direção ortogonal [49,54]. O seu principal objetivo é superar os limites de difração óptica [50,51]. Inicialmente acreditava-se que apenas materiais estruturados (metamateriais) pudessem apresentar características hiperbólicas, no entanto foi verificado que se submetido a um campo magnético muito forte outros materiais poderiam exibir propriedades hiperbólicas [52,53].

Uma das principais características dos metamateriais hiperbólicos é a sua capacidade de suportar ondas ópticas com vetores de ondas muito grandes, que são os modos High-k [26]. Tal característica ocorre devido a excitação de estados eletromagnéticos que permite que os HMM's manipulem em banda larga a densidade de fótons de estados e confinamento da luz abaixo do comprimento de onda [27].

Os HMM's suportam modos de propagação com vetores de onda muito grandes, o que permite uma gama de aplicações físicas como imagens de subdifração, modos de subcomprimento de onda e engenharia de emissão térmica espontânea [74]. Formados por metal-dielétrico, o metamaterial hiperbólico é validado com uma célula unitária com espessura menor que $\lambda/10$ e com pelo menos quatro períodos [29]. Esses metamateriais representam o limite ultra anisotrópico dos cristais uniaxiais tradicionais, sendo que um dos principais componentes de seus tensores de permissividade (ϵ) ou permeabilidade (μ) é oposto em sinal aos outros dois componentes principais [54], ou seja, os sinais opostos dos componentes de permissividade dielétrica em duas direções levam a uma dispersão hiperbólica das ondas de propagação polarizadas pela TM [77].

.

A relação entre o deslocamento elétrico $\mathbf{D}$ e a indução magnético $\mathbf{B}$ para os campos elétricos $\mathbf{E}$ e magnéticos $\mathbf{H}$ é dada por:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \bar{\epsilon} \mathbf{E} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \bar{\mu} \mathbf{H} \quad (2.4)$$

onde ϵ_0 e μ_0 são a permeabilidade e a permissividade do vácuo e $\bar{\epsilon}$ e $\bar{\mu}$ são os tensores.

Analizando um material não magnético com os tensores de permissividade e permeabilidade têm-se:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix}, \quad \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Onde $\epsilon_{\parallel}$ e $\epsilon_{\perp}$ são os componentes dos tensores de permissividade paralelo e perpendicular e $\mu_{\parallel}$ e $\mu_{\perp}$ são os componentes dos tensores de permeabilidade. Os três componentes diagonais são positivos e dependem da frequência angular ω .

Metamateriais hiperbólicos (HMM's) possuem o nome derivado da topologia da superfície de isofrequência. No vácuo, a dispersão linear e o comportamento isotrópico das ondas de propagação implica uma superfície de isofrequência esférica (Figura 6 a) que pode ser descrita por [46]:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2.6)$$

Onde k_x, k_y, k_z formam o vetor de onda de propagação, ω é a frequência de radiação e c a velocidade da luz no espaço livre.

Considerando uma onda extraordinária TM polarizada em um material dielétrico uniaxial sua relação de dispersão seria:

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\epsilon_{\parallel}} + \frac{k_z^2}{\epsilon_{\perp}} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2.7)$$

A superfície de isofrequência esférica do vácuo se torna um elipsoide para o caso anisotrópico, no entanto, quando temos anisotropia extrema que acontece quando $\epsilon_{\parallel}$ e $\epsilon_{\perp} < 0$, a superfície da isofrequência se abre para um hiperboloide aberto (Figura 6b e 6c). Tal fenômeno exige que o material se comporte como um metal em uma direção e um dielétrico na outra, dando o comportamento de um metamaterial hiperbólico o que não ocorre facilmente na natureza em frequências ópticas e é possível obter através da criação estruturas artificiais.

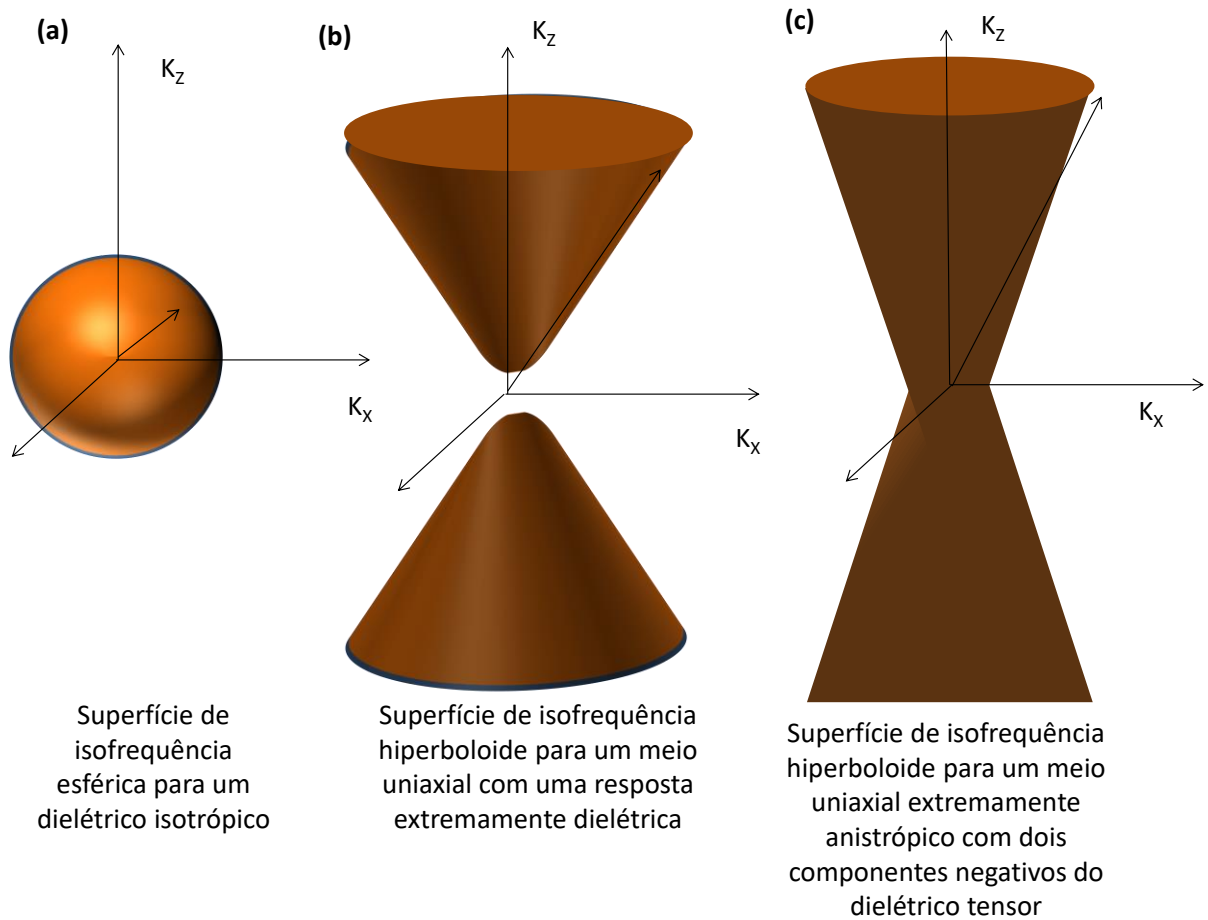


Figura 6: Dispersão hiperbólica em metais/ dielétricos, adaptado de [49].

2.2.3 Índice de Refração Negativo e consequências

Materiais com índice de refração negativo foram teoricamente previstos em 1967 por Veselago [33,58], no entanto, a maioria das ideias relacionadas à refração negativa já haviam sido descritas em 1944 quando L.I.Mandelstam descreveu refração negativa e propagação inversa de ondas em seu livro [59].

Analisando o comportamento de um vetor de onda ($\vec{k}$), considerando a refração de um raio incidente entre um meio de permissividade e permeabilidade > 0 e um meio com ϵ e $\mu < 0$, como pode ser visto na Figura 7, as condições de contorno demanda a continuidade das componentes tangenciais do vetor de ondas ao longo da superfície e a propagação *backward* ocorre imediatamente. O que não acontece na refração comum, que os ângulos de incidência e refração precisam ter sinais opostos.

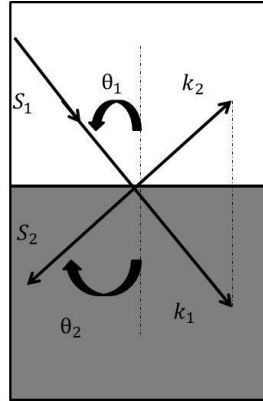


Figura 7: Representação dos vetores de Poynting e dos vetores da constante de propagação para um meio ordinário na parte superior e material canhoto, adaptado de [61].

A partir da continuidade dos componentes tangenciais dos vetores de onda dos raios incidentes e refratados, tem-se que:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_r)} = \frac{-|\vec{k}_2|}{|\vec{k}_1|} = \frac{n_2}{n_1} < 0 \quad (2.8)$$

Onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios 1 e 2.

Como visto na Equação 2.1, a relação de permissividade e permeabilidade que permite encontrar o índice de refração do material recebia um sinal positivo, o que ocorre nos materiais convencionais [38]. Entretanto Veselago propôs que quando ϵ e μ fossem negativos, essa relação também deveria ser negativa, logo a expressão do índice de refração passaria a ser [57]:

$$-n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2.9)$$

Podem ser citados alguns fenômenos provenientes dos materiais com índice de refração negativo, como a modificação da resposta da lei de Snell, onde o vetor de onda e o vetor de Poynting, que são paralelos no caso de materiais com índice positivo, passam a ser antiparalelos em materiais com índice de refração negativo [12,60]. Deste modo, a luz que incide no material é refratada para o mesmo lado de onde veio e o ângulo de feixe refletido permanece inalterado pelo material. Isso acontece devido à natureza do subconjunto das estruturas, onde ocorre uma série de efeitos diferentes que não acontecem em estruturas difrativas [58,61-62].

O efeito Cerenkov também sofre reversão no material duplo negativo. O efeito mostra que quando uma partícula carregada eletricamente atravessa um meio com velocidade maior que a luz deste meio ele emite uma radiação eletromagnética que pode ser vista na luz visível

em determinado ângulo angular, já no material DNG essa radiação é emitida na direção inversa, em um ângulo obtuso [63].

2.3 Cristais Fotônicos

Os cristais fotônicos, que também são denominados materiais de banda fotônica proibida (PBG- *Photonic Band Gap*), são metamateriais altamente ordenados onde a relação entre a frequência e comprimentos de onda é periódica e possuem uma estrutura de banda [64]. Eles possuem um *gap* que proíbe a propagação da luz em certa faixa de frequência onde ela não se propaga em nenhuma direção e que resulta em uma emissão de luz apenas na região de interesse. Tal propriedade permite controlar a luz com incrível facilidade e produzir efeitos impossíveis com a óptica convencional [65-66].

Dispositivos de cristais fotônicos podem ser agrupados em duas classes genéricas: aquelas que fazem uso de bandas fotônicas e aquelas que fazem uso de propriedades de dispersão [67]. A primeira classe de dispositivos inclui filtros espectrais, interconexões óticas em microescala e dispositivos a laser de micro cavidades. Todas essas aplicações fazem uso das propriedades reflexivas de um *gap* de banda fotônica para confinar a luz dentro de uma microcavidade, região ou um guia de ondas com defeito de linha, ou para fornecer reflexão de volta sobre certa faixa de comprimento de onda [68].

2.3.1 Estruturas de Bandas Fotônicas

O conceito de bandas fotônicas parte da conexão entre as propriedades das ondas eletromagnéticas e as propriedades do meio óptico [69]. Essas estruturas podem ser periódicas em uma, duas ou três dimensões e esta mudança está relacionada às variações no índice de refração no período e no espaço, gerando cristais fotônicos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Em particular, os cristais fotônicos 3D possuem modulação de permissividade ao longo das três direções.

No que se refere aos cristais fotônicos bidimensionais, tem-se uma periodicidade que ocorre em duas dimensões e periodicidade que acontece na terceira, tendo assim um cristal homogêneo. A banda proibida ocorre no plano da periodicidade e depende do contraste das constantes dielétricas dos materiais, da geometria da estrutura e da polarização da luz [70].

Um intervalo de banda completo pode ser formado em um cristal fotônico se existir uma periodicidade e uma taxa de preenchimento dielétrico adequado. Assim, a luz com uma frequência específica será proibida dentro de três direções de cristais fotônicos, o que facilita o controle da emissão espontânea e a propagação da luz, tendo uma atenção maior aos cristais fotônicos 3D que são considerados um dos materiais mais potenciais [71-72].

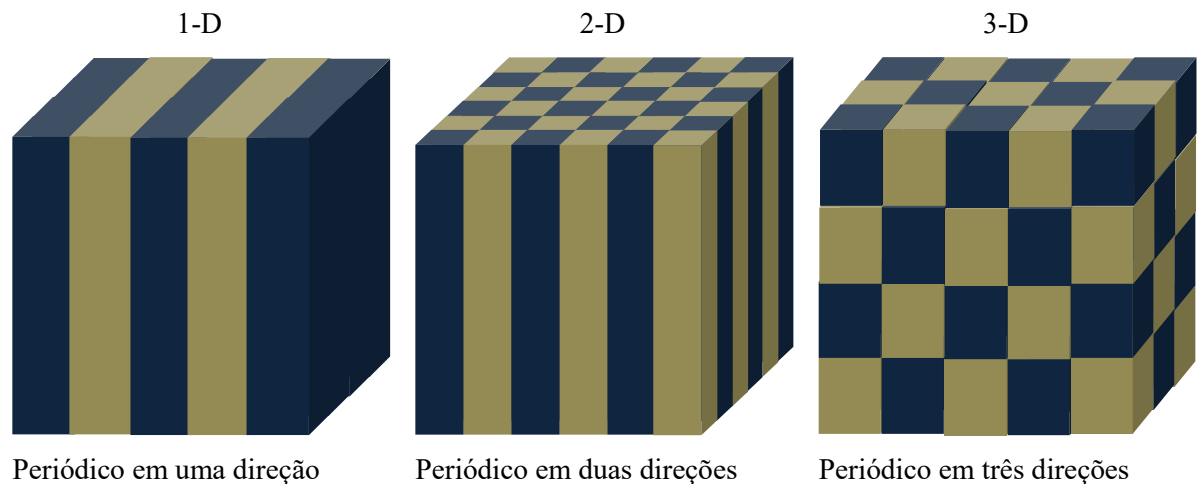


Figura 8: Representação esquemática de cristais fotônicos periódicos em uma, duas e três dimensões, onde a periodicidade está no material (tipicamente dielétrico) estrutura do cristal [68].

Em tese um cristal fotônico, explora o espalhamento das ondas de luz por Bragg. Isso leva à formação de bandas permitidas e proibidas, assim como o arranjo periódico de átomos em um semicondutor resulta na criação das bandas de condução e de valência, separadas por uma lacuna proibida. Os cristais fotônicos permitem fenômenos ópticos, como a inibição da emissão espontânea, a refletividade omnidirecional e o guia de ondas altamente eficiente [72].

2.4 Método dos elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico que auxilia na análise computacional da estrutura. Este método foi utilizado neste trabalho pela ferramenta computacional Comsol para obter as respostas de transmissão, reflexão e absorção dos hiper cristais. O MEF foi proposto pela primeira vez em 1940 e começou a ser utilizado em 1950 [75]. Ele se baseia na resolução de problemas com soluções de Equações diferenciais e um conjunto de condições de contorno a partir da subdivisão da geometria em partes menores que são denominadas de elementos finitos, onde a Equação diferencial é aplicada e interpolações podem ser utilizadas para chegar a um resultado aproximado [75]. A estrutura é dividida em

elementos finitos e esses elementos são interligados por nós. Este método foi utilizado, pois apesar das Equações de Maxwell permitirem analisar o comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas, isso só é possível para situações simples [79], além disso, o tratamento numérico possui vantagens em relação aos métodos analíticos.

O MEF é uma ferramenta que possui flexibilidade e é adequada para resolução de Equações diferenciais parciais e problemas eletromagnéticos e pode ser aplicado em regiões não uniformes [74-75].

Neste trabalho foram utilizadas estruturas compostas por camadas alternadas de metal e dielétrico que possuem propriedades físicas diferentes, portanto o método de elementos finitos, embora com resultados aproximados, se apresenta como uma alternativa viável por apresentar alta convergência nos resultados [74].

Os principais passos realizados para a aplicação do MEF são:

- Discretização da geometria utilizando elementos finitos, ou seja, subdividindo a geometria em partes menores;
- Interpolação do domínio, selecionando as funções de interpolação;
- Para apenas um dos elementos subdivididos, formular o sistema de Equações;
- Resolver os sistemas usando técnicas algébricas e lineares.
- Processar o resultado.

A discretização da estrutura neste trabalho foi realizada pelo programa computacional Comsol, que realizou a análise numérica utilizando o método dos elementos finitos que para problemas eletromagnéticos apresenta respostas aproximadas da Equação de Maxwell determinando o valor do campo elétrico ou magnético em cada ponto do domínio. A discretização da geometria é o passo seguinte da aplicação do MEF, para isso o método dos elementos finitos utiliza a geometria linear unidimensional, bidimensional e tridimensional (Figura 9).

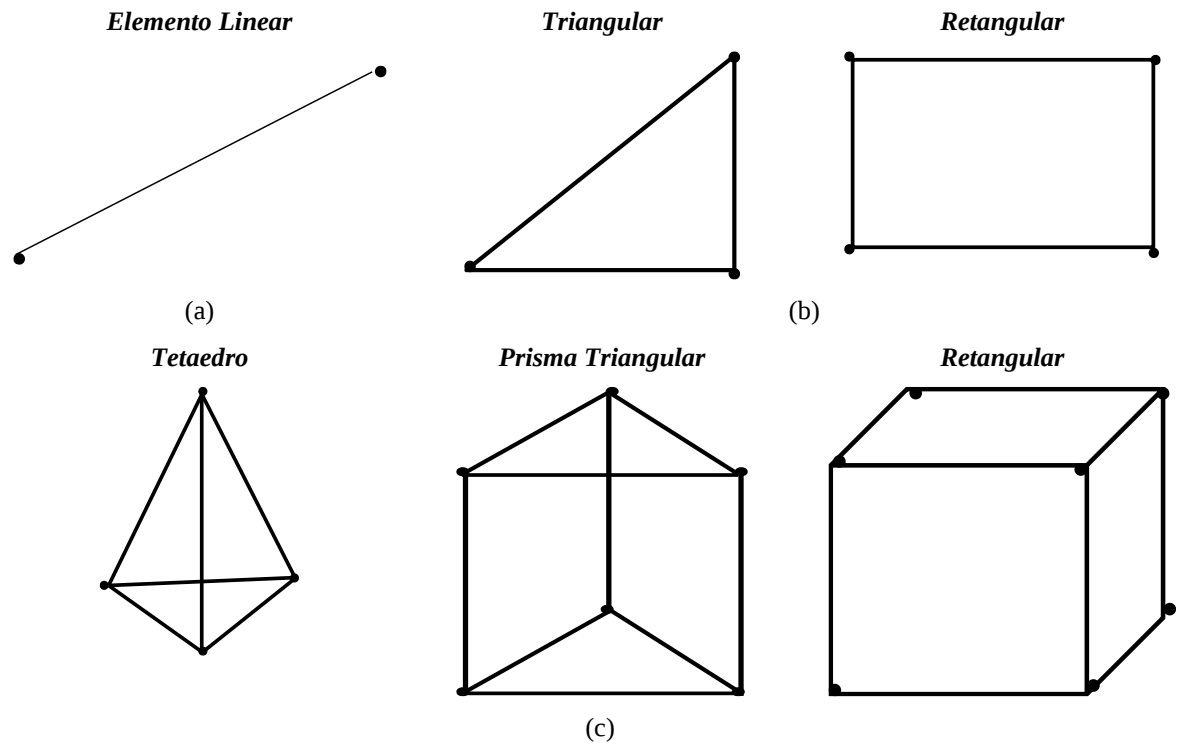
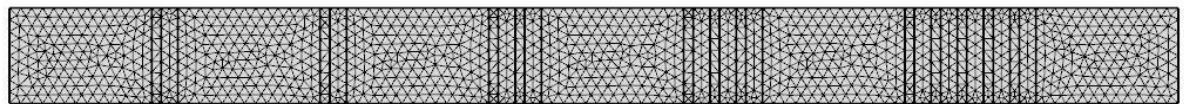
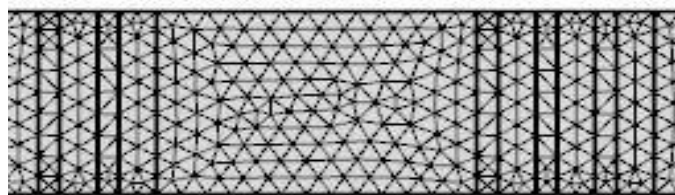


Figura 9: Básicos Elementos finitos (a) Unidimensional, (b) Bidimensional , (c) Tridimensional , adaptado de [82].



(a)



(b)

Figura 10: Exemplo de discretização pelo método dos elementos finitos(a), ampliação da malha (b).

Capítulo 3

Hiper cristais

3.1 Hiper cristais

Os hiper cristais fotônicos surgiram como uma nova alternativa para a obtenção de um o maior domínio da propagação da luz no meio, já que as abordagens atuais para controlar essas interações como cristais fotônicos e metamateriais dependem de mecanismos como ressonância de frequência que limitam a largura de banda e/ou sofrem de problemas relacionados ao fraco acoplamento de luz [15].

Um hiper cristal fotônico é uma estrutura periódica de subcomprimento de onda que consiste em camadas alternadas de dielétrico e metamaterial hiperbólico, em que sua variação periódica desejada pode ser alcançada por meio da introdução de um segundo meio (que pode ser um metal, ou um dielétrico, ou outro meio hiperbólico com um tensor de permissividade dielétrico diferente) mostrado na Figura 11 [42,73]. Introduzido teoricamente em 2014 [13], a sua estrutura pode ser tratada como um meio eficaz quando se trata da parcela do metamaterial e como um meio periódico observando a estrutura geral que apresenta duas escalas de comprimento de onda diferentes (uma para o dielétrico e outra para o metamaterial) [10].

Os hiper cristais fotônicos são utilizados em pesquisas de emissores de luz e células solares devido a uma grande densidade fotônica de banda larga dos estados por causa da dispersão hiperbólica ao mesmo tempo em que aumenta o acoplamento de luz no subcomprimento de onda [15], essa nova classe de metamaterial combina o controle do ambiente dielétrico por um meio hiperbólico junto à lei de Bragg com as propriedades de difração de um componente cristal fotônico [13].

Em questão comparativa, os metamateriais contam com a polarização média de células unitárias com tamanho menor que o comprimento de onda para controlar a resposta eletromagnética do material. Em contrapartida, os cristais fotônicos dependem da modificação periódica da constante dielétrica na escala de tamanho de onda resultando em resposta eletromagnética em decorrência do espalhamento de Bragg e da propagação do campo eletromagnético, além disso, os hiper cristais diferem dos cristais fotônicos pelo período (tempo em que uma partícula leva em um meio para fazer um ciclo vibratório completo) e as estruturas repetitivas dos cristais, unidades que são os subcomprimento de onda.

Os Hiper cristais surgem como estruturas periódicas que mesclam as propriedades de materiais hiperbólicos (com estruturas micrométricas) e cristais fotônicos (com estruturas nanométricas) [76-77]. A sua estrutura, formato, periodicidade e material que o compõe são projetados de forma a se ampliar o controle da luz. Essas características são originadas pela estrutura dos cristais fotônicos (que possuem boa dispersão de luz) e dos metamateriais (com grande densidade fotônica de banda larga).

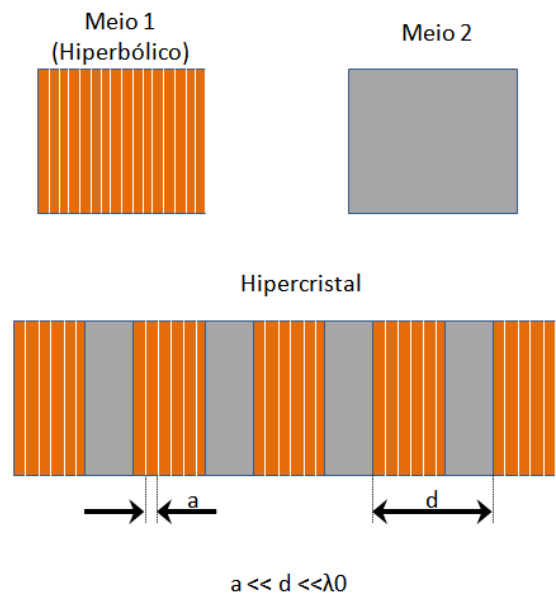


Figura 11: Estrutura do Hiper cristal

Esse novo material tende a superar as desvantagens da limitação da largura de banda e a fraca emissão de luz observada tanto em metamateriais quanto em cristais fotônicos, manipulando apenas uma ou poucas cores simultaneamente. O Hiper cristal melhora o controle de luz incidente por mais tempo dentro do material melhorando a interação com a matéria [47,78].

Os hiper cristais podem ser fabricados usando uma variedade de materiais e métodos. A Figura 12 (a) mostra quatro exemplos de materiais hiperbólicos naturais. A safira (hiperbólica em meio Infravermelho (IR)); o bismuto de estrôncio que é um supercondutor de alta temperatura e óxido de cobre-cálcio (BSCCO) (hiperbólico em IR em seu estado normal); grafite (hiperbólica em IR e UV (Ultravioleta)); e bismuto (hiperbólico em IR). A Figura 12 (c) mostra um metamaterial com comportamento hiperbólico obtido através do empilhamento de camadas finas de condução e isolantes umas sobre as outras (metal e dielétrico). A Figura 12 (e) mostra um metamaterial hiperbólico usando nanofios metálicos paralelos em um meio dielétrico. As Figuras 12 (b) e (d) ilustram um desenho plano de um hiper cristal, onde as

camadas hiperbólicas são formadas por meios naturais, tais como safira ou o polítipo hexagonal de carboneto de silício, ou usando os metamateriais hiperbólicos planares existentes. Na Figura 12 (d), variações periódicas na espessura das camadas de um dos componentes transformam o meio em um hiper cristalino. Da mesma forma, uma variação periódica na densidade de nanofios pode transformar o composto de nanofios hiperbólico em um hiper cristal, como mostrado na Figura 12 (f) [72].

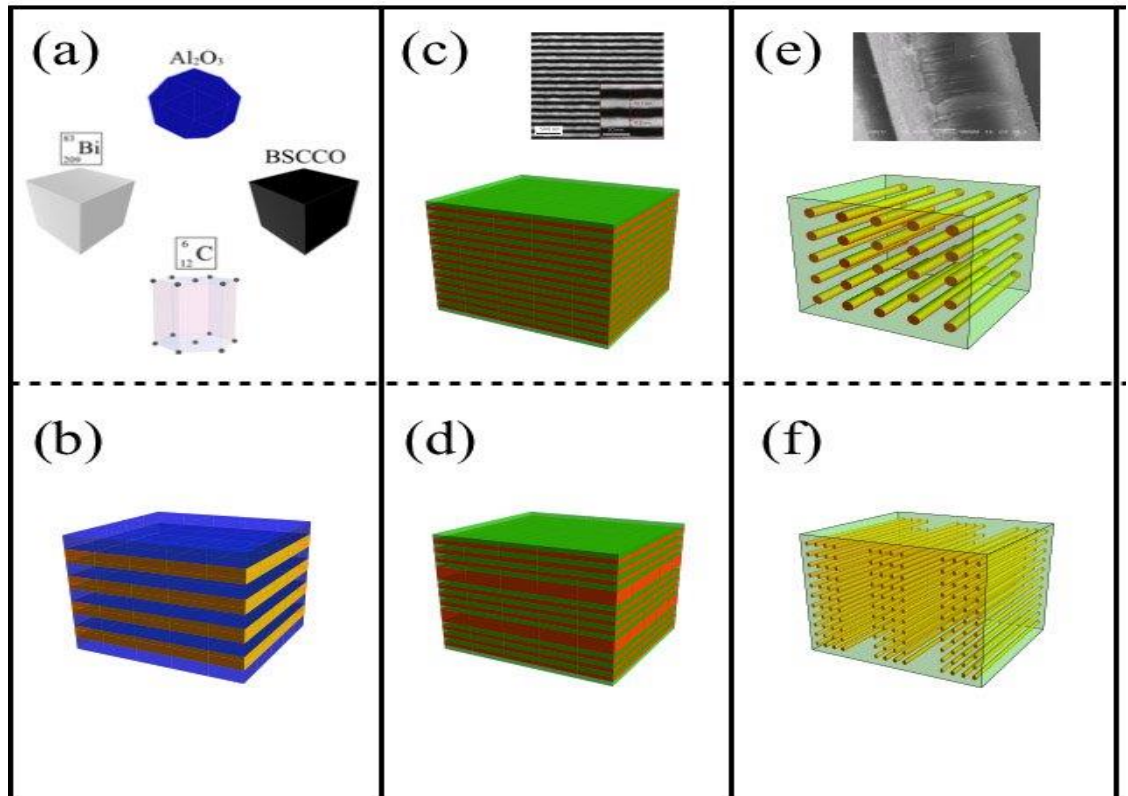


Figura 12: Hiper cristais, adaptado de [72]

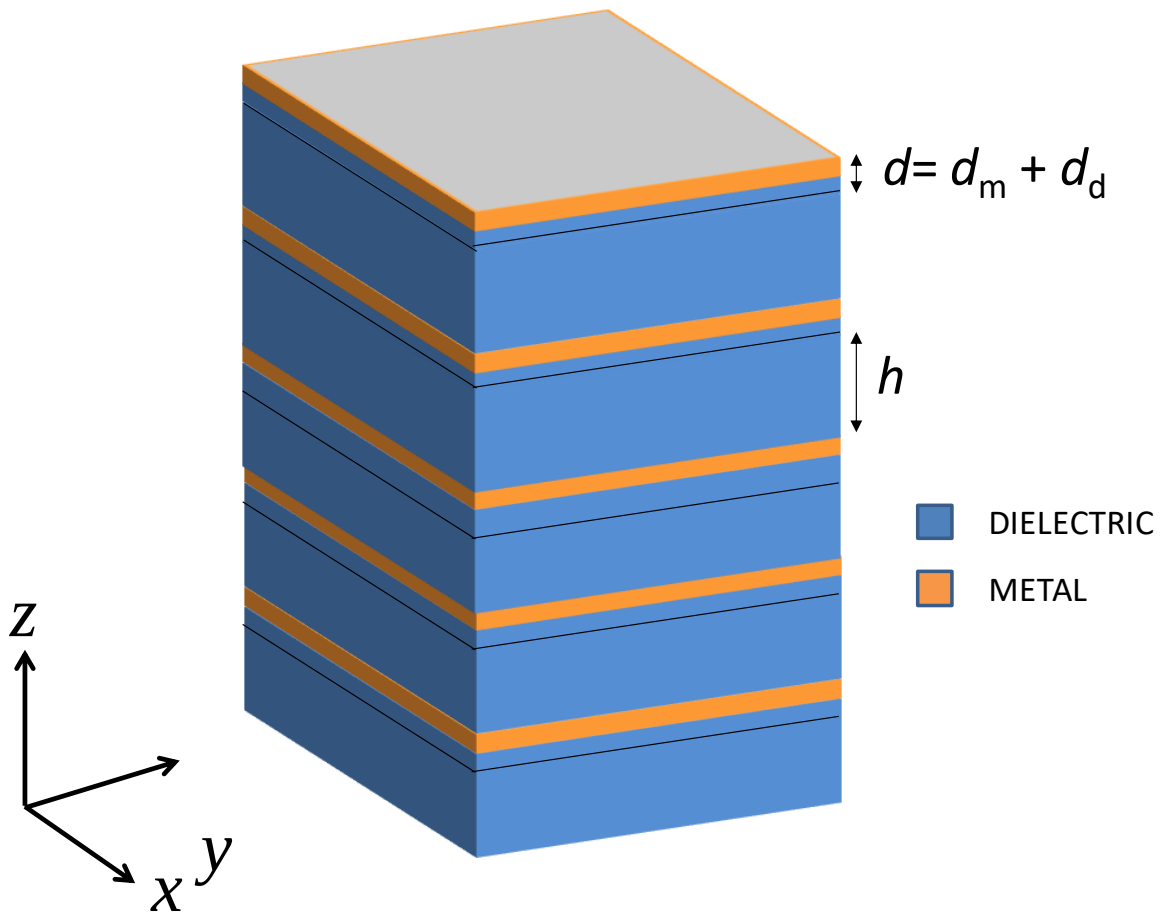


Figura 13: Estrutura de um hiper cristal fotônico com camadas alternadas de metal (d_m) e dielétrico (d_d).

O regime do hiper cristal fotônico possui como restrição $a \ll d \ll \lambda_0$, sendo d a espessura do dielétrico junto ao metamaterial, a é a espessura do dielétrico e metal que formam o metamaterial e λ_0 é o comprimento de onda no hiper cristal.

Ao realizar uma comparação entre as estruturas de metamateriais já conhecidas na literatura e os hiper cristais fotônicos, têm-se como resultados pesquisas que mostram que em um HMM existe banda proibida completa no espaço de onda, em contrapartida no PHC existem várias bandas permitidas e proibidas em ambas às dimensões de frequência [13]. O controle da propagação de luz obtido em um hiper cristal é alto em suas estruturas de banda, o que não ocorre em HMM, onde os Modos High K se encontram abaixo da linha da luz, o que impede a propagação para o espaço livre [9]. A periodicidade do hiper cristal fotônico dobra os números de modos de High-K no interior da luz permitindo um acoplamento eficiente nos Modos de High-K [14].

Os hiper cristais com suas características que prometem uma maior interação da luz com o meio material podem ser aplicados em LED's ultrarrápidos para o LI-FI, tecnologia sem fio que possibilita a transmissão de dados em alta velocidade usando luz viável, células solares

com maior capacidade de absorção de luz e emissores fótons individuais para computação quântica.

3.1.2 Estado da arte em hiper cristais

Este tópico apresenta uma revisão bibliográfica contendo as principais estruturas encontradas na literatura de hiper cristais, apresentando conceitos, estruturas e desempenho.

A estrutura apresentada na Figura 15 apresenta um hiper cristal contendo camadas alternadas de Silício (Si) e um metamaterial composto por Grafeno e Si com um substrato de Quartzo no regime de terahertz (THz) e se encontra na literatura [9]. Considerando uma propagação ao longo do ar e na estrutura foi observado que comparado com um metamaterial hiperbólico, o PHC possui melhora em estrutura de banda para acoplamento eficiente dos modos High K, regulação e confinamento da onda de superfície. O artigo apresenta uma comparação de estruturas hiper cristalinas compostas Si e um metamaterial composto por Grafeno e Silício e outra estrutura composta por Si e Safira. Foi notado que existem longas distâncias de propagação e altos números de onda da superfície do hiper cristal e que as características dos estados de superfície no hiper cristais de Si-Grafeno podem ser superiores às que no hiper cristalino silício-safira com resultados até oito vezes maiores em distâncias de propagação. Em geral o artigo mostra que superfícies contendo Grafeno e Silício podem apresentar localização de luz na escala de subcomprimento de onda mais profunda em comparação com PC's e HMM's.

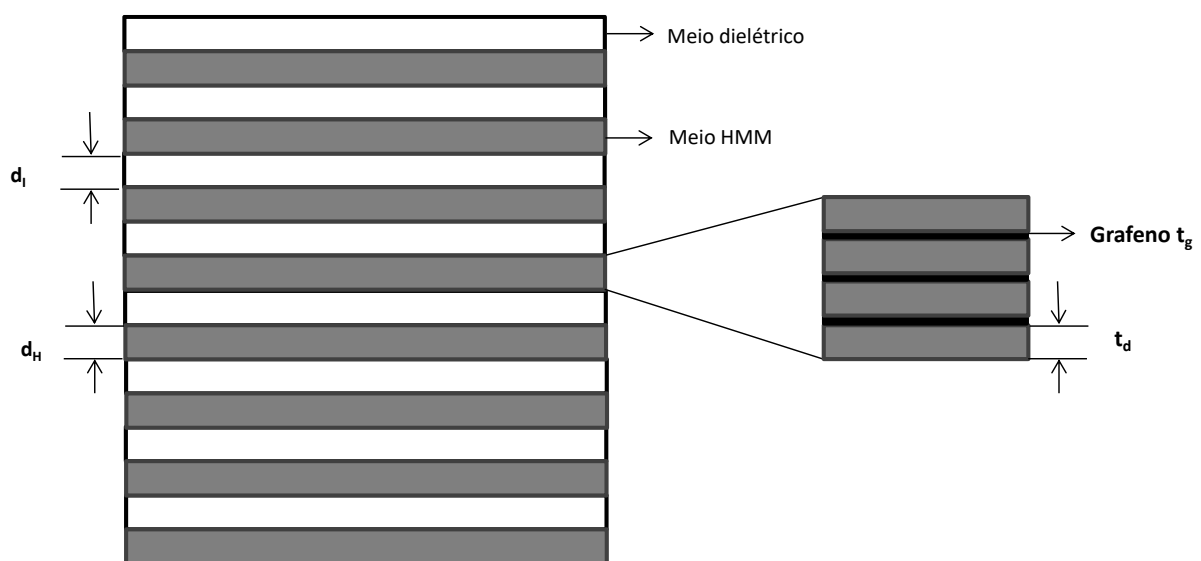


Figura 14: Hiper cristal Fotônico composto por camadas alternadas de Grafeno e Si com período $d = d_l + d_H < \lambda$, d_l e d_H são as espessuras de Silício e Grafeno respectivamente, adaptado [9].

Em [15], o hiper cristal fotônico 2D composto por Prata e dióxido de alumínio e um HMM também com a mesma composição são comparados (Figura 16). O autor sugere a implementação do hiper cristal fotônico para resolver o problema de perda ôhmica que ocorre no metamaterial devido a energia emitida que fica presa nos modos High- k que se propagam dentro do HMM. Isso ocorre porque a maior parte da radiação é direcionada para o HMM devido ao estado fotônico de densidade. Para resolver esse problema são inseridos no HMM orifícios que se estende pelas multicamadas para superar a luz presa nos modos High- k .

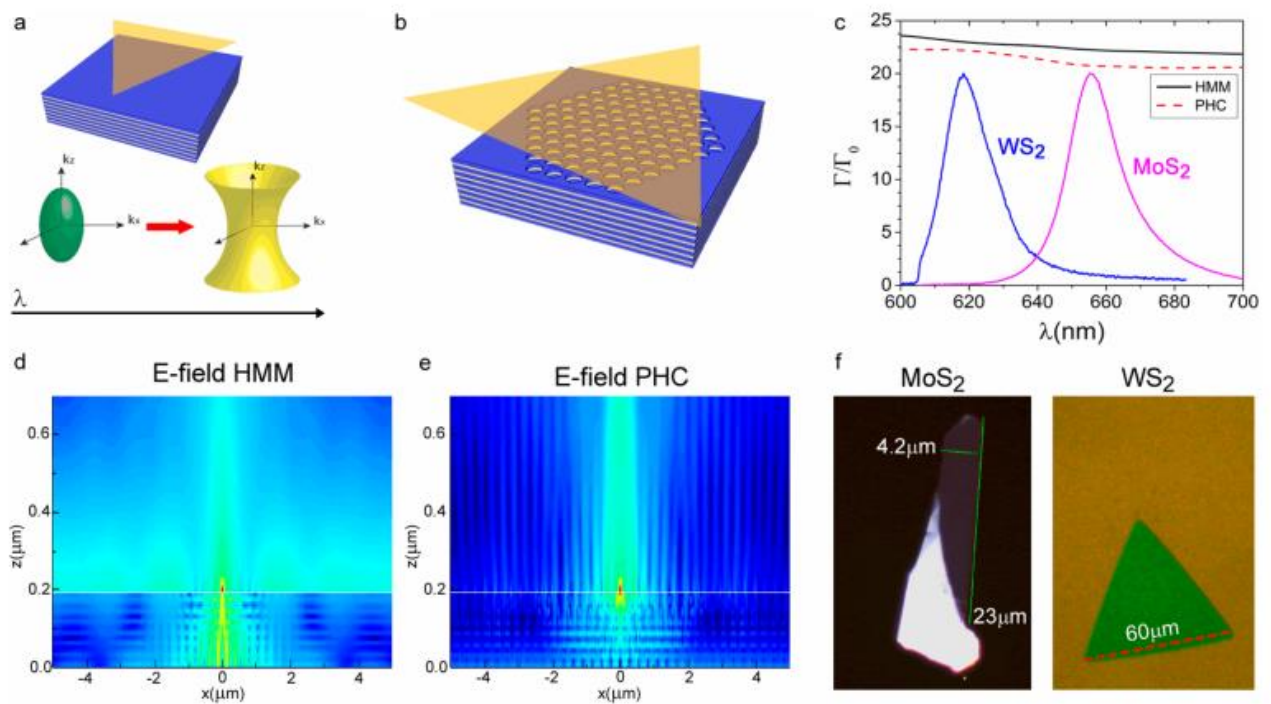


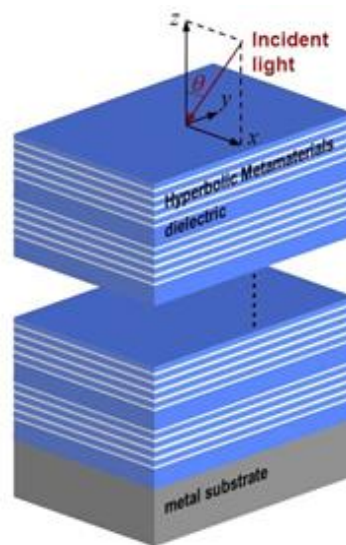
Figura 15: (a) Diagrama esquemático do metamaterial. (b) Esquema de hiper cristais fotônicos com 2D material. (c) Fator de Purcell calculado para HMM (linha preta) e PHC (linha tracejada), abaixo: os espectros de emissão de MoS₂ e WS₂. d) FDTD simulação do campo eletromagnético emitido por um dipolo no plano sobre um HMM. (e) Dipolo no plano sobre uma APS. f) Imagens microscópicas ópticas de flocos esfoliados de MoS₂ e flocos de CV2 cultivados com CVD.

Como resultado foi verificado que o campo elétrico emitido pelo hiper cristal ficava 24% retido dentro da estrutura e o restante acoplado na direção do espaço, além disso, a radiação de campo distante se tornava altamente direcional para o hiper cristal com 70% de potência irradiada dentro do meio ângulo de 50 ° cone em comparação com apenas 40% para o HMM.

Em [73] foi apresentado um absorvedor quase perfeito utilizando a seleção angular de incidência da luz com uma estrutura multicamadas composta por ITO e silício. Eles investigaram um absorvedor espectral seletivo de ângulo amplo utilizando TPPs no modo TM. TPPs são efeitos de tunelamento ressonantes que ocorrem na interface entre cristais fotônicos

unidimensionais e placas de metal, e suas as propriedades de dispersão são essencialmente determinadas pelas de uma dimensão. Nas pesquisas eles mostraram que TPPs sem dispersão podem ser excitados contendo metamaterials hiperbólicos (HMMs) em metais substrato. Com base em TPPs sem dispersão, as ondas eletromagnéticas penetram no substrato metálico e são absorvidos inteiramente pelo metal com perdas, exibindo uma absorção perfeita de banda estreita e grande angular para Polarização TM. Como resultado foi encontrado na faixa do infravermelho um comprimento de onda onde era possível alternar em alguns ângulos de 0-80° obtendo resultados acima de 98% de absorção.

I



II

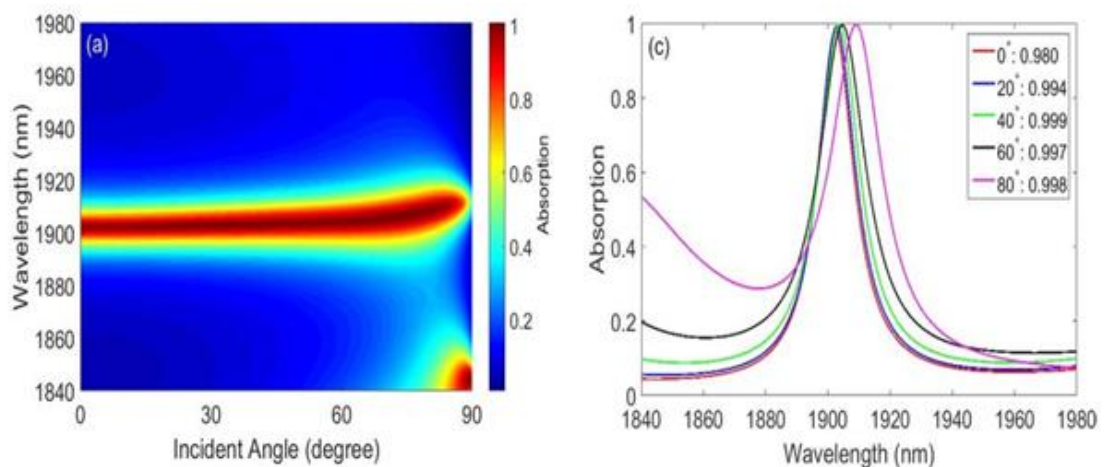


Figura 16: (I) Estrutura do hiper cristal em multicamadas ITO-Si, (II) Absorção do Hiper cristal [73].

Em [77] é estudado o uso de hiper cristais fotônicos em dispersões de Dirac, efeito que não é encontrado em superfícies planares, mas foi verificado que em estruturas que combinam as propriedades de cristais fotônicos e metamateriais hiperbólicos é possível obter a formação de Cones de Dirac no espaço de fase do hiper cristal devido ao efeito resultante sobre a propagação da onda e dispersão por formação de intervalo de banda, no que é essencialmente o limite metamaterial. Para essa simulação foi estudada uma estrutura multicamadas de silício e safira que permitiu dois cones de Dirac apresentados no diagrama de dispersão (Figura 18).

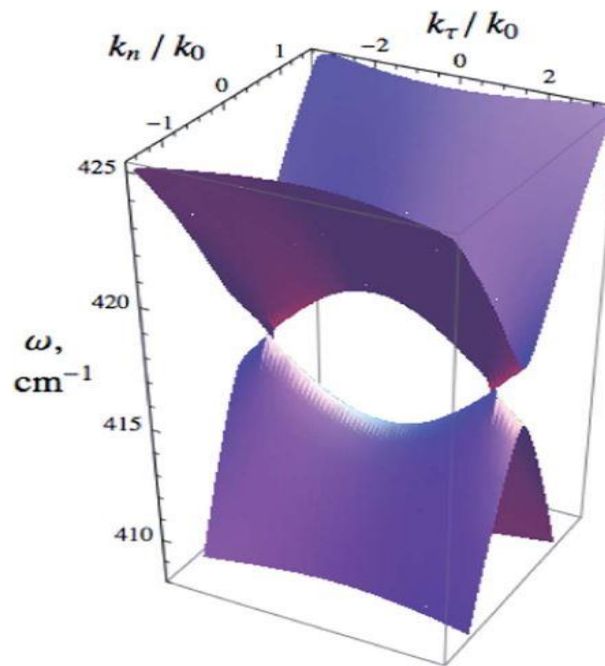


Figura 17: Diagrama de dispersão do hiper cristal Silício-Safira [77].

CAPITULO 4

Resultados e Discussões

4.1 Validação Estrutural

Os resultados do hiper cristal foram validados por meio do artigo [73], no qual a estrutura foi replicada e os resultados propostos foram observados. No artigo supracitado o hiper cristal está em dimensões dentro das restrições de um hiper cristal, $a \ll d \ll \lambda_0$, onde d é a espessura do dielétrico junto ao metamaterial, a é a espessura do dielétrico e metal que formam o metamaterial e λ_0 é o comprimento de onda no hiper cristal.

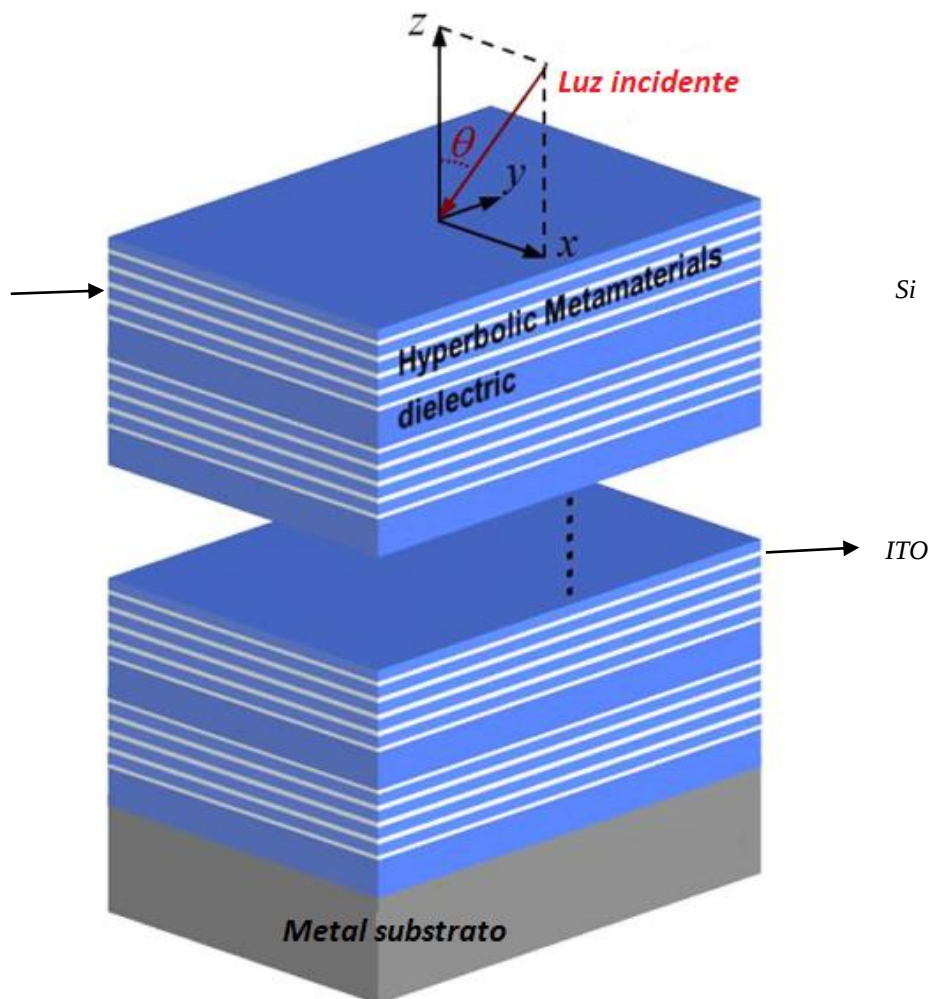
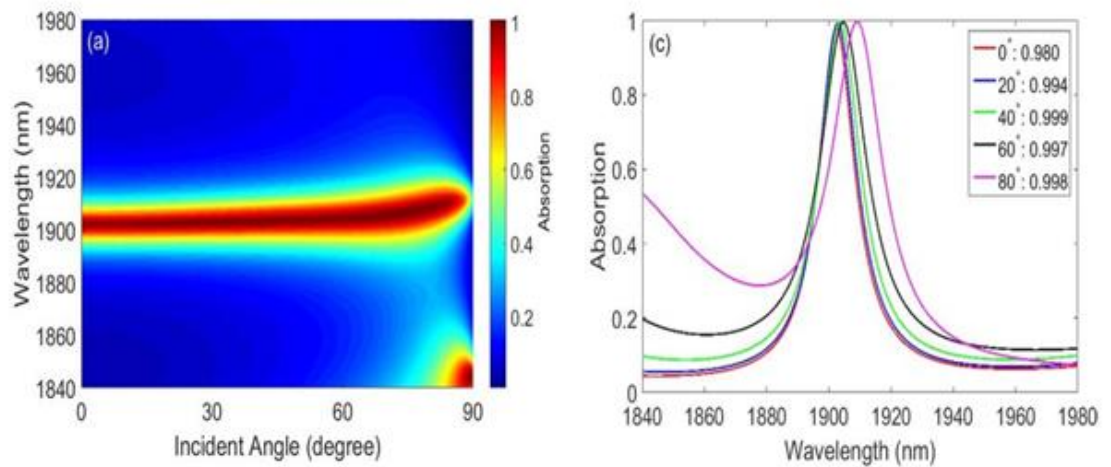


Figura 18: Estrutura do Hiper cristal validado [73].

(I)



(II)

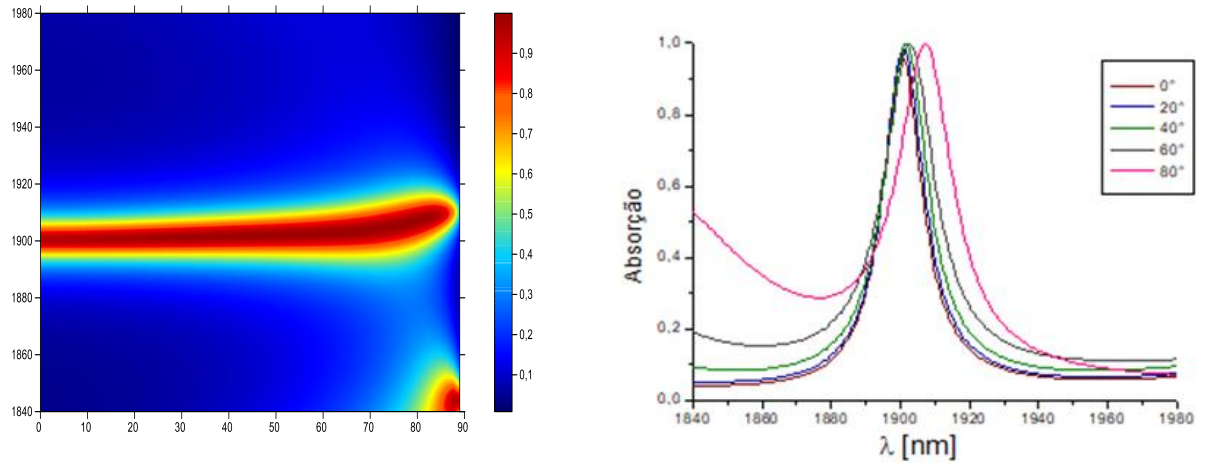


Figura 19: (I) Resultados apresentados no artigo (II) Resultados validados

A estrutura formada por ITO e Si apresenta grande grau de absorção entre 1900-1920 nm em variados graus de incidência no modo TM. Esta estrutura foi replicada e os mesmos resultados foram obtidos como visto na Figura 19.

4.2 Resultados

Nesta seção serão apresentados os dispositivos assimétricos propostos nesse trabalho, assim como uma análise da resposta dos mesmos. As estruturas propostas são compostas de metamateriais multicamadas (compostas por metal – dielétrico) e dielétrico. Cada estrutura, no entanto, apresenta respostas e características diferentes que serão apresentadas nessa seção e percebe-se que a escolha dos parâmetros geométricos permite a proposta de projetos de dispositivos como espelhos e absorvedores com as características desejadas.

4.3 Estrutura de Hiper cristal baseada na sequência de Fibonacci

A sequência de Fibonacci é uma sucessão de números que aparece em diversas situações na natureza com resultados positivos em suas aplicações [80-81]. A organização matemática para gerar a sequência não periódica da estrutura apresentada neste trabalho é feita com a junção de dois materiais, B e C, baseados nas regras da sequência de Fibonacci para obter a sequência desejada. O número de camadas é dado por F_n , sendo F_n o número de Fibonacci obtido da relação recursiva $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$, com $F_0 = F_1 = 1$, o qual pode ser encontrado em [81].

A variação da sequência de Fibonacci foi usada para gerar apenas os cinco primeiros termos {1,1,2,3,5}, os quais foram relacionados para combinar o dielétrico e o metal, separados por dielétrico. Na estrutura analisada (Figura 20), d_m e d_d são respectivamente as espessuras do metal e dielétrico e h é a espessura da separação entre o par dielétrico-metal. Os termos direita e esquerda significam a direção da propagação usada na simulação, sendo os resultados da direita também ditos como mais (+) e os esquerda (-).

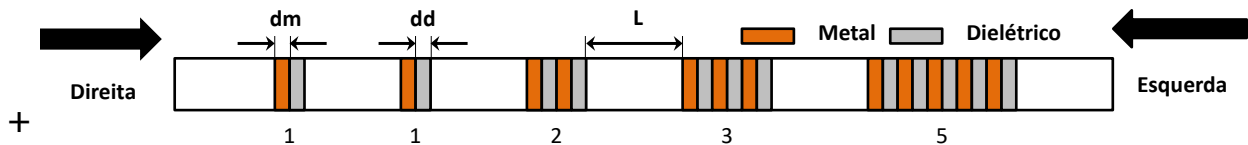


Figura 20: Representação do hiper cristal baseado na sequência Fibonacci.

Para todas as estruturas foram analisadas as características de absorção, transmissão e reflexão, como pode ser visto nos tópicos abaixo.

4.3.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-Si

Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-Si, separadas pelo dielétrico ar, com variação do comprimento de onda na faixa do visível de 400-700nm. Os parâmetros L variaram de 150nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal- dielétrico variaram de 0.1 a 0.9 com um total de 20 nm como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1: Fator de preenchimento de 0.1 a 0.9 de um total 20 nm.

PREENCHIMENTO	PARCELA METAL (nm)	PARCELA DIELÉTRICO (nm)
0.1	2	18
0.2	4	16
0.3	6	14
0.4	8	12
0.5	10	10
0.6	12	8
0.7	14	6
0.8	16	4
0.9	18	2

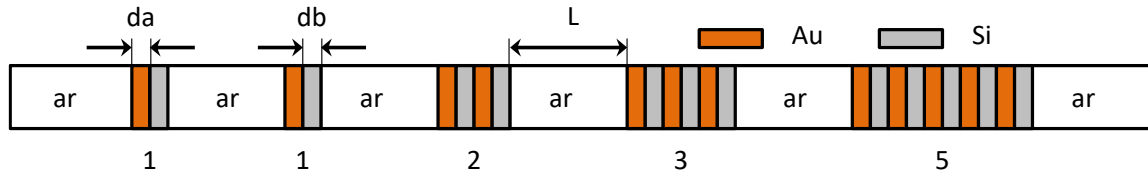


Figura 21: Hiper cristal multicamadas alternadas de Au-Si

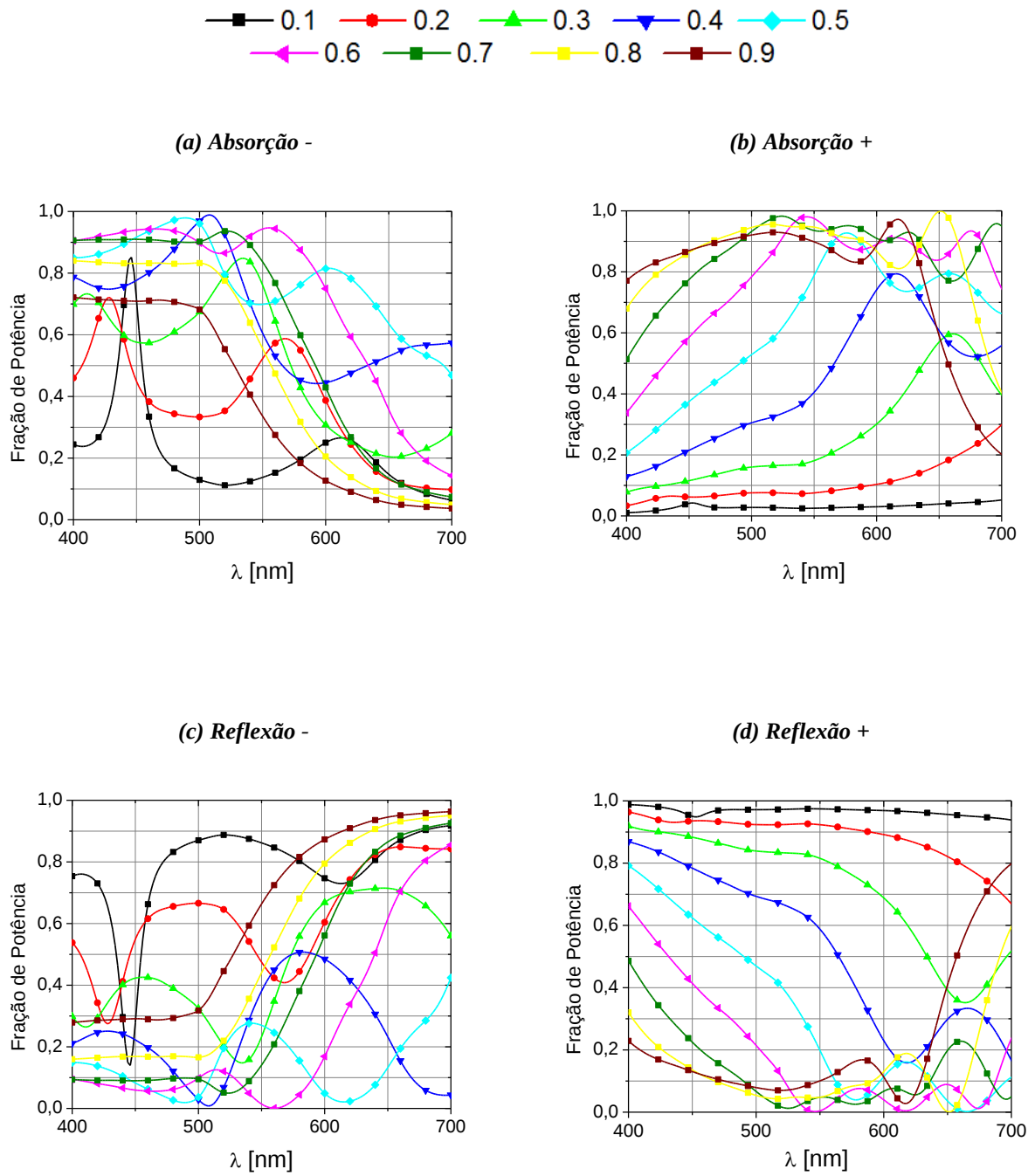


Figura 22: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150\text{nm}$ e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.

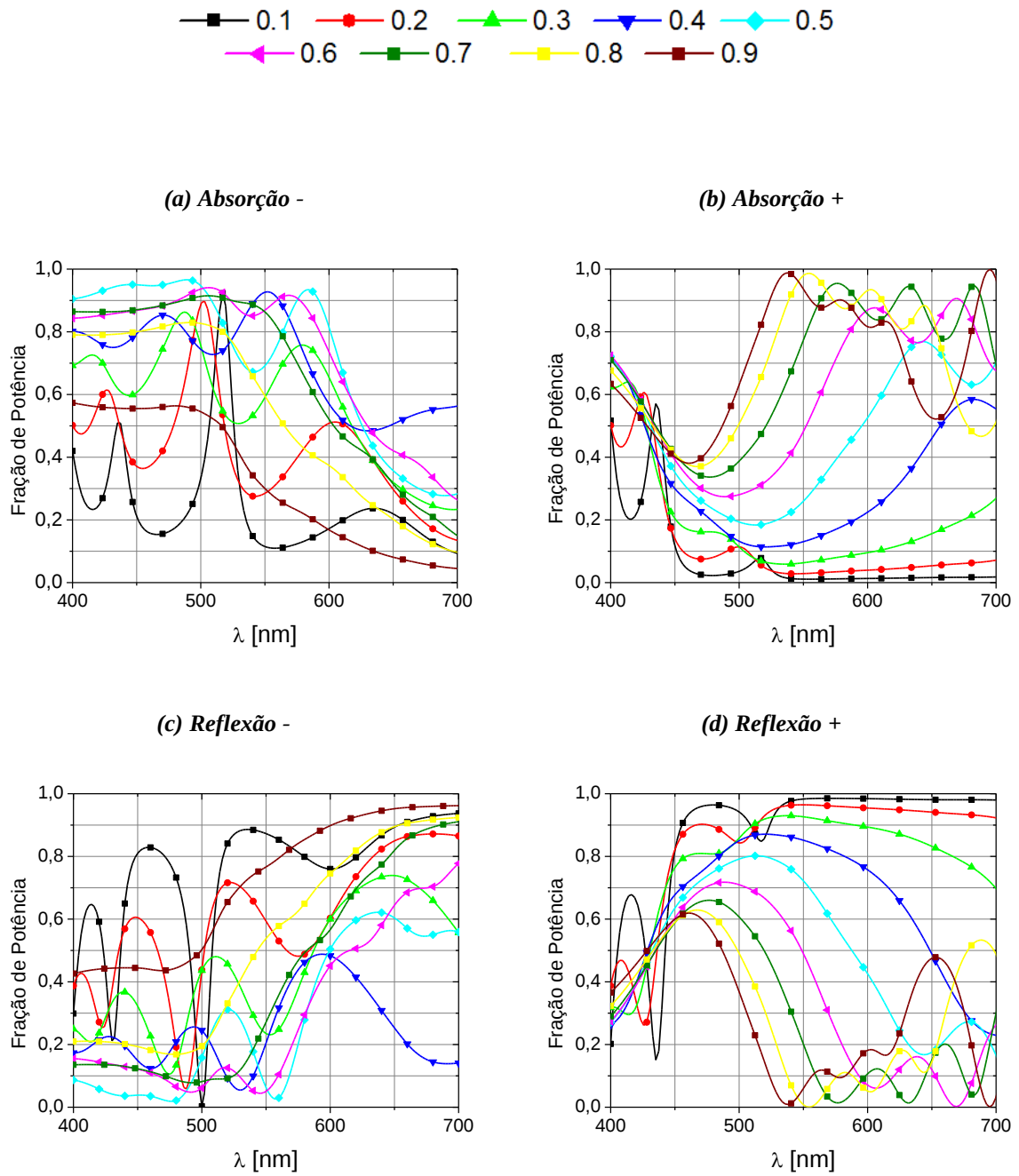


Figura 23: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.

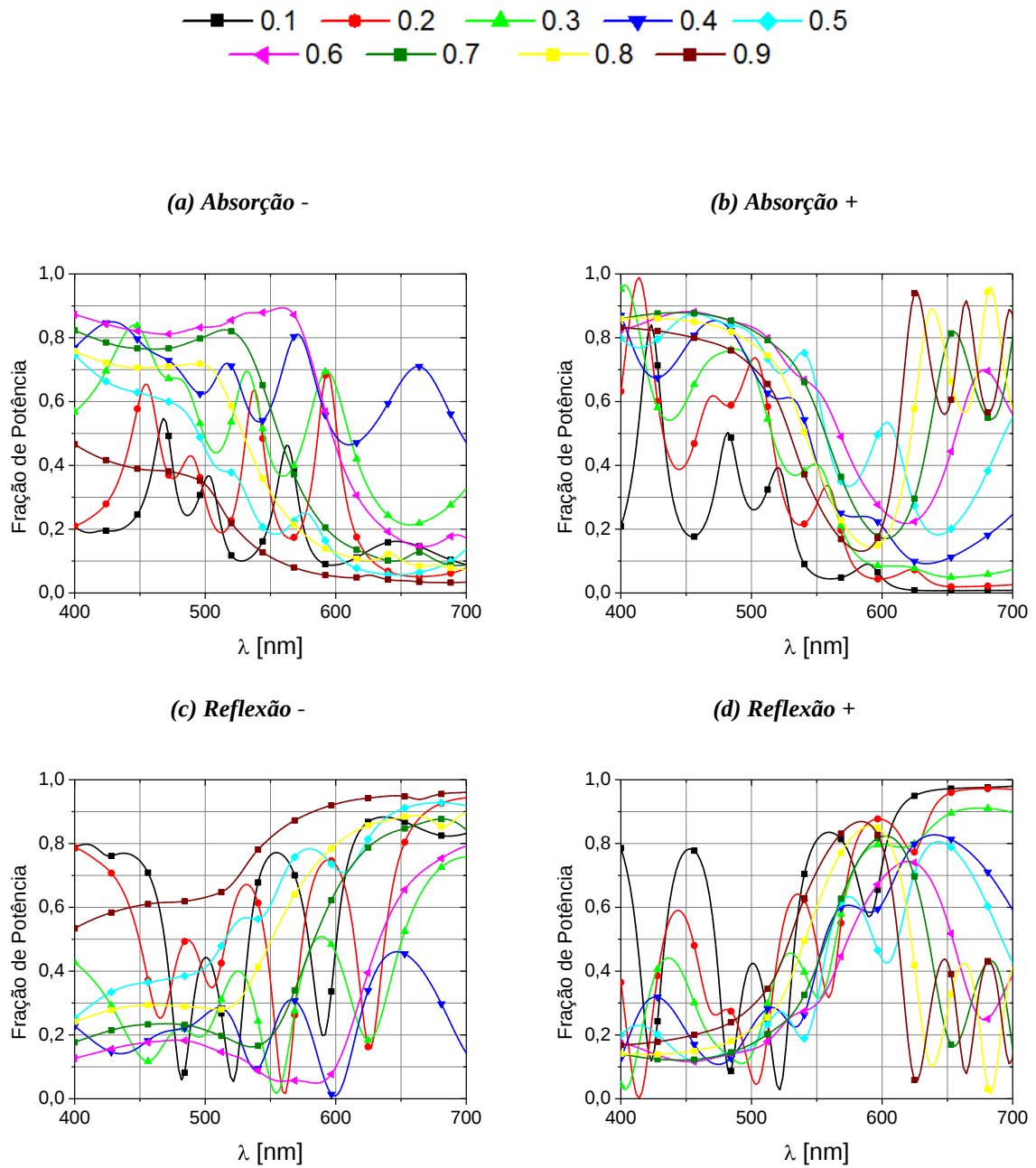


Figura 24: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.

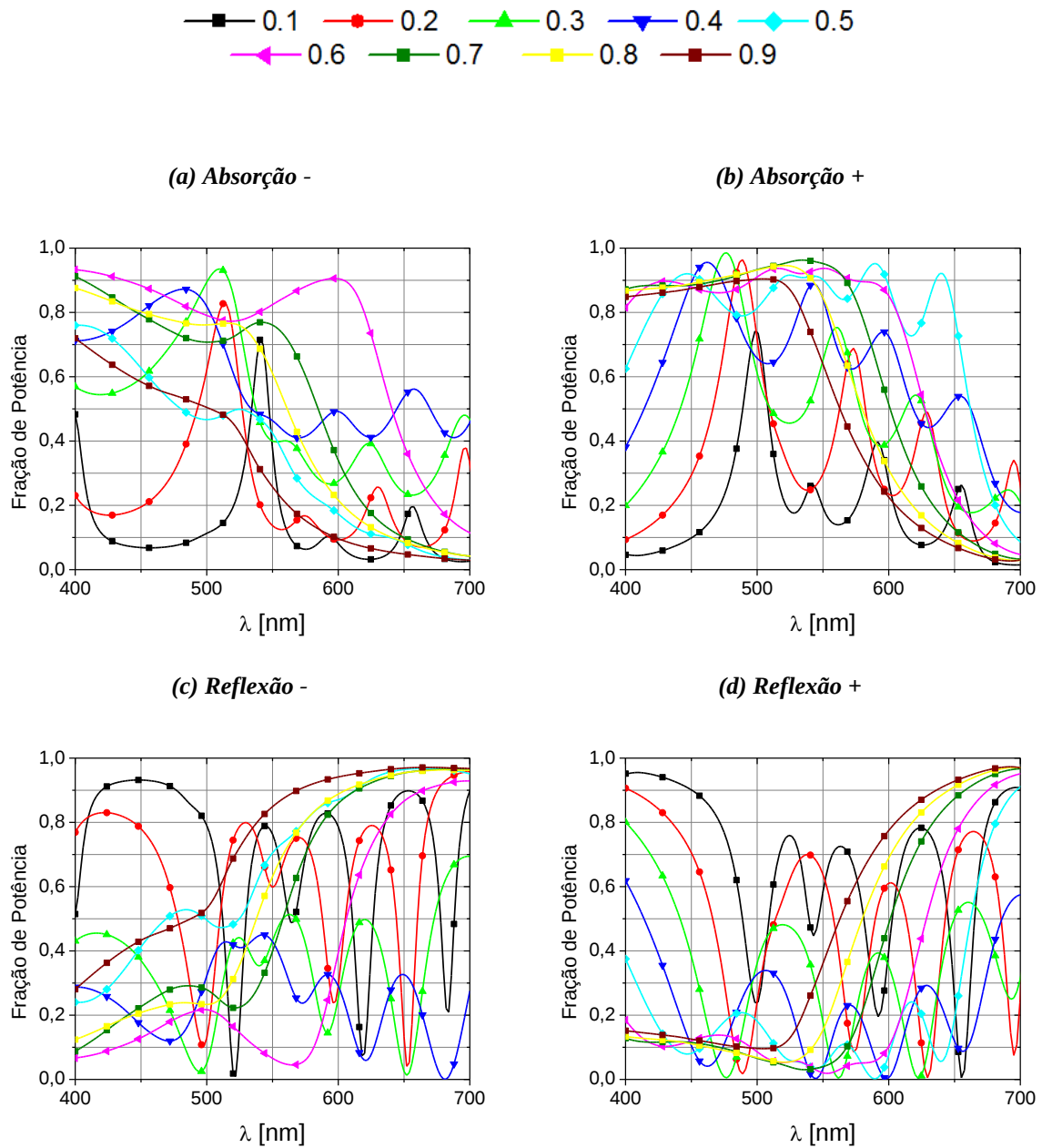


Figura 25: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal dielétrico de 0.1 a 0.9.

As Figuras 22 a 25 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hipercristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Au-Si). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.1 a 0.9 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 150 a 300 nm preenchidos por ar. Com os resultados é possível notar o comportamento assimétrico da estrutura. A transmitância na maioria dos casos não apresenta relevância sendo a mesma da direita para esquerda. A estrutura apresenta o comportamento de refletor e absorvedor por

diversos comprimentos de onda e configurações diferentes, o que demonstra que a estrutura pode ser variada para se obter um resultado desejado.

É possível observar que os valores de absorção na maioria dos casos aumentam com uma maior fração de preenchimento de metal apresentando oscilações no espectro de análise com alguns picos de absorção.

Para os resultados de $L=150$ apresentados na Figura 22, a estrutura se expõe como absorvedor em variados comprimentos de onda. A resposta de absorção na Figura 22 (a) apresenta maiores picos de incidência nos comprimentos de onda iniciais da região do visível de 400 a 550 nm principalmente nas estruturas preenchimento de metal entre 0.5 e 0.7. A influência do metal na resposta da estrutura se mostra ainda mais aparente na Figura 22 (b) que traz as respostas da absorção para direita, onde fica nítido que quanto maior o preenchimento do metal maior o comportamento de absorvedor na estrutura, nessa resposta foram obtidos resultados de absorvedores quase perfeitos nos preenchimentos de 0.8 e 0.9 de metal para os comprimentos de onda de 620 e 650 nm respectivamente com respostas próximas a 100% de fração de potência absorvida, assim como para 0.6 e 0.7 entre 500 e 550 nm a estrutura apresenta comportamentos de reflexão opostos aos da absorção, quanto maior o preenchimento do metal menor o comportamento de refletor da estrutura. Na Figura 22 (d) para o preenchimento de 0.1 a estrutura se apresenta como um refletor quase perfeito por toda a região do visível com resultados muito próximos para o preenchimento de 0.2 até os 600 nm onde se vê uma redução da reflexão. A estrutura apresenta assimetria em alguns pontos durante a sua propagação, como pode ser visto nas Figuras 22 (c) e (d) para o preenchimento de 0.6 e 0.3.

Para os resultados de $L=200$, apresentados na Figura 23, nota-se que semelhante à configuração da estrutura anterior, os picos de absorção e reflexão mantêm-se alternado em diferentes comprimentos de onda o que fortalece a ideia que a estrutura pode ser adaptada para a resposta necessária a diferentes aplicações. Em 23 (a) para os preenchimentos de 0.5, 0.6 e 0.7 a absorção apresenta picos nos comprimentos de onda iniciais até 500 nm, entre 550 e 590 nm existem três picos com os preenchimentos de 0.4, 0.5 e 0.6 com fração de potência acima de 90 %. Na Figura 23 (b) a partir dos 500 nm para os maiores preenchimentos de metal de 0.6 a 0.9 existem maiores oscilações de picos de absorção, com fração de potência variando de 89 % a 99 %. Em 23 (c) e (d) são observados os resultados de reflexão da estrutura, na reflexão para direita é obtido um refletor quase perfeito para o preenchimento de 0.1 a partir de 550 nm com respostas semelhantes para o preenchimento de 0.2, a assimetria é novamente notada nas reflexões, ao observar as Figuras 23 (c) e (d) percebe-se que nas variações de 0.5 a 0.9 existem

mais disparidades, o que permite que a mesma estrutura tenha reflexão diferente no mesmo comprimento de onda a depender do sentido de propagação.

Para $L=250$, Figura 24, a absorção na imagem 24 (a) possui várias oscilações, mas nenhum pico acima de 90 %, sua melhor resposta é apresentada com o preenchimento de 0.6 com variações entre 80 e 90% dos 400 aos 560 nm. Já a absorção para direita apresenta picos no início e no final do regime do visível, apresentando absorvedores quase perfeitos em determinados comprimentos de ondas para os preenchimentos de 0.2 e 0.3, 0.8 e 0.9. A reflexão em ambos os sentidos de propagação apresentam suas maiores incidências nos comprimentos de onda finais do regime visível, em (c) no preenchimento de 0.9 a fração de potência cresce ao longo do comprimento de onda ultrapassando 90 % e em (d) para os preenchimentos de 0.1 a 0.3 as melhores respostas de reflexão estão a partir dos 650 nm.

Para $L=300$, Figura 25, a estrutura possui diversas oscilações com picos de absorção fazendo a estrutura se apresentar como um bom absorvedor para diferentes configurações de preenchimento de metal-dielétrico como pode ser visto em (a) e (b). A assimetria da absorção é vista no preenchimento de 0.5 onde na absorção para direita ela oscila para valores mais altos de fração de potência e para esquerda para valores mais baixos de potência. Em (b) existem picos de absorção próximos a 100% com os preenchimentos de 0.2 a 0.4 entre 450 e 500 nm, em (a) com o preenchimento de 0.3 ocorre um pico acima de 90 % em torno de 510 nm. A reflexão para esquerda tem altos picos com os preenchimentos de 0.8 e 0.9 de 600 a 700 nm, já a reflexão para direita tem picos em 400 a 450 nm e 650 a 700 nm com os preenchimentos de 0.1 no início do comprimento de onda e preenchimentos de 0.6 a 0.9 nos comprimentos de onda finais da região do visível.

Para as diferentes frações de preenchimentos de L foram obtidos resultados semelhantes, altos valores de absorção e reflexão encontrados nas diferentes parcelas de preenchimento, apresentado resultados que podem ser utilizados em diferentes configurações, a depender da necessidade de aplicação do material pretendido como faixa de operação e fração de potência necessária.

4.3.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, Si-Au

Estrutura composta por dielétrico-metal, Si-Au, separadas pelo dielétrico ar, com variação do comprimento de onda na faixa do visível de 400-700nm. Os parâmetros L variaram de 150nm a 300nm em passos de 50 nm. O par de dielétrico-metal variou de 0.1 a 0.9 com um total de 20 nm.

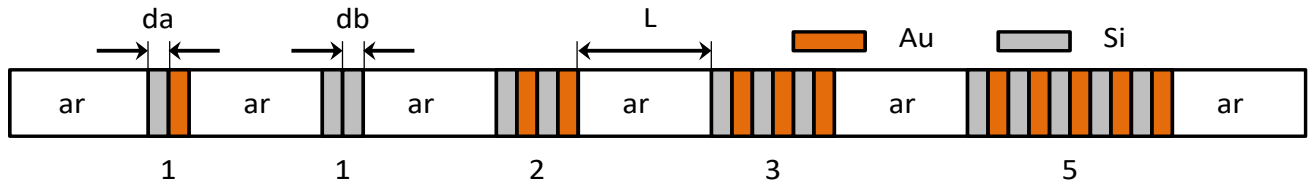


Figura 26: Hiper cristal multicamadas alternadas de Si-Au.

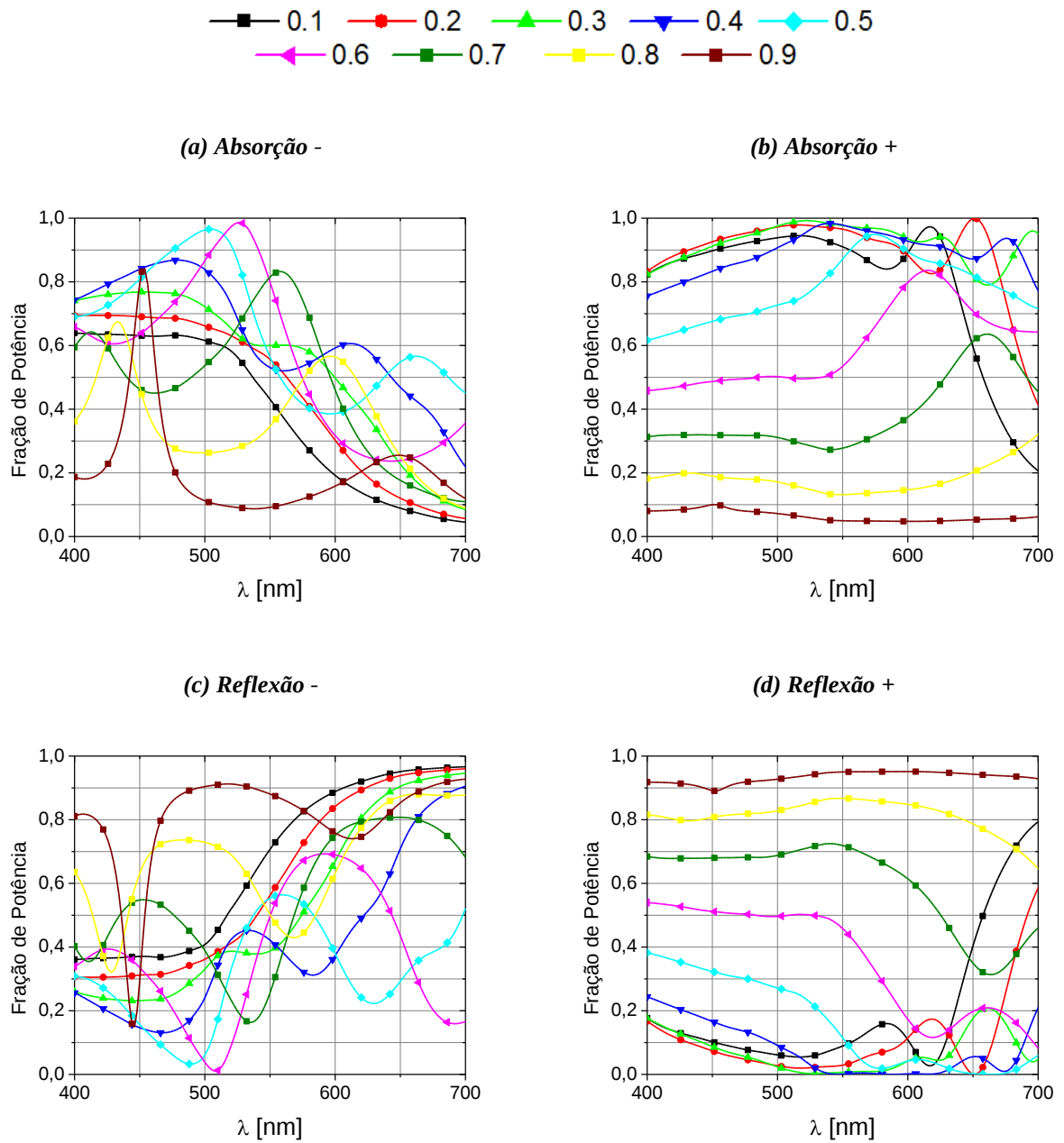


Figura 27: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.

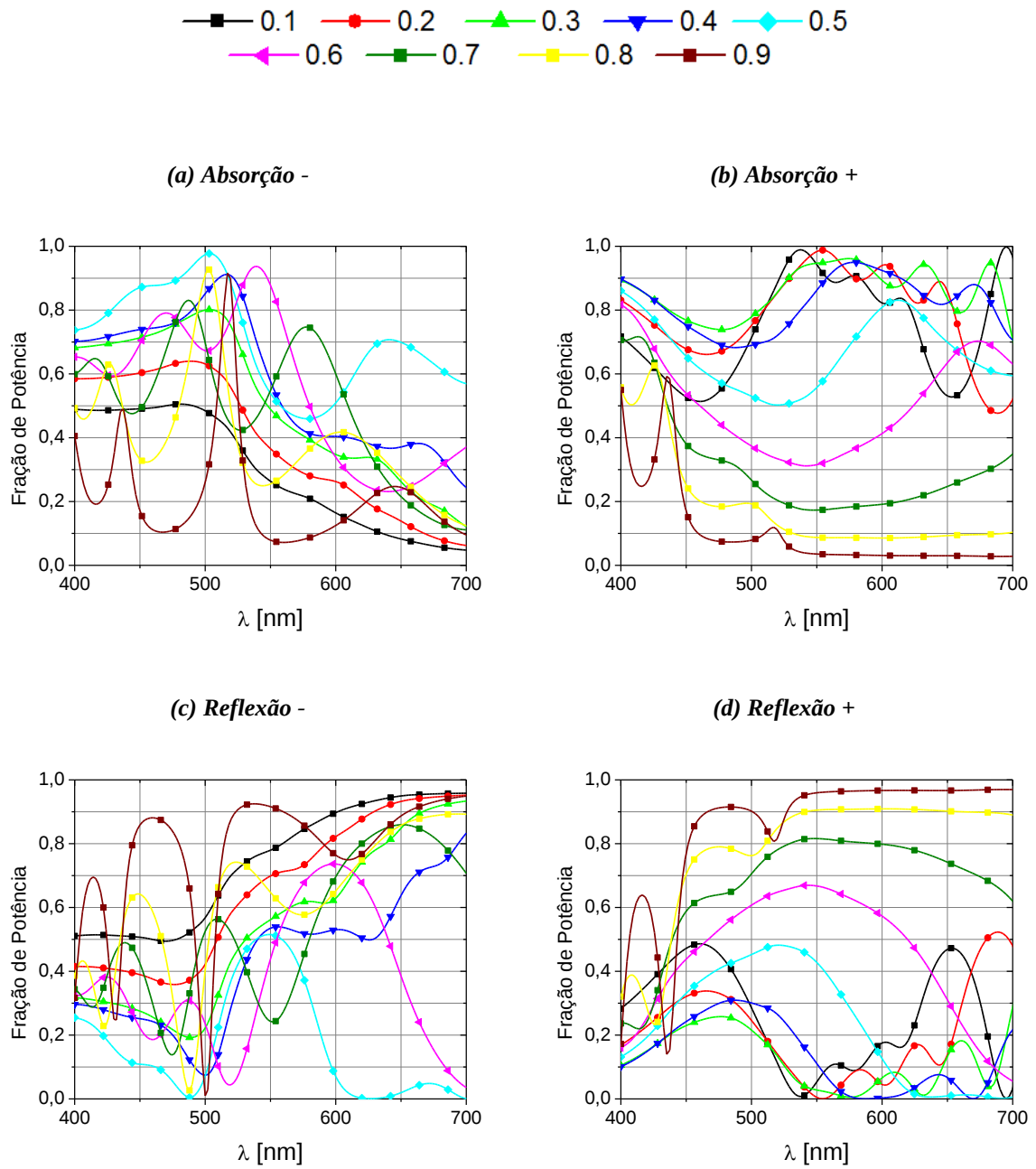


Figura 28: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.

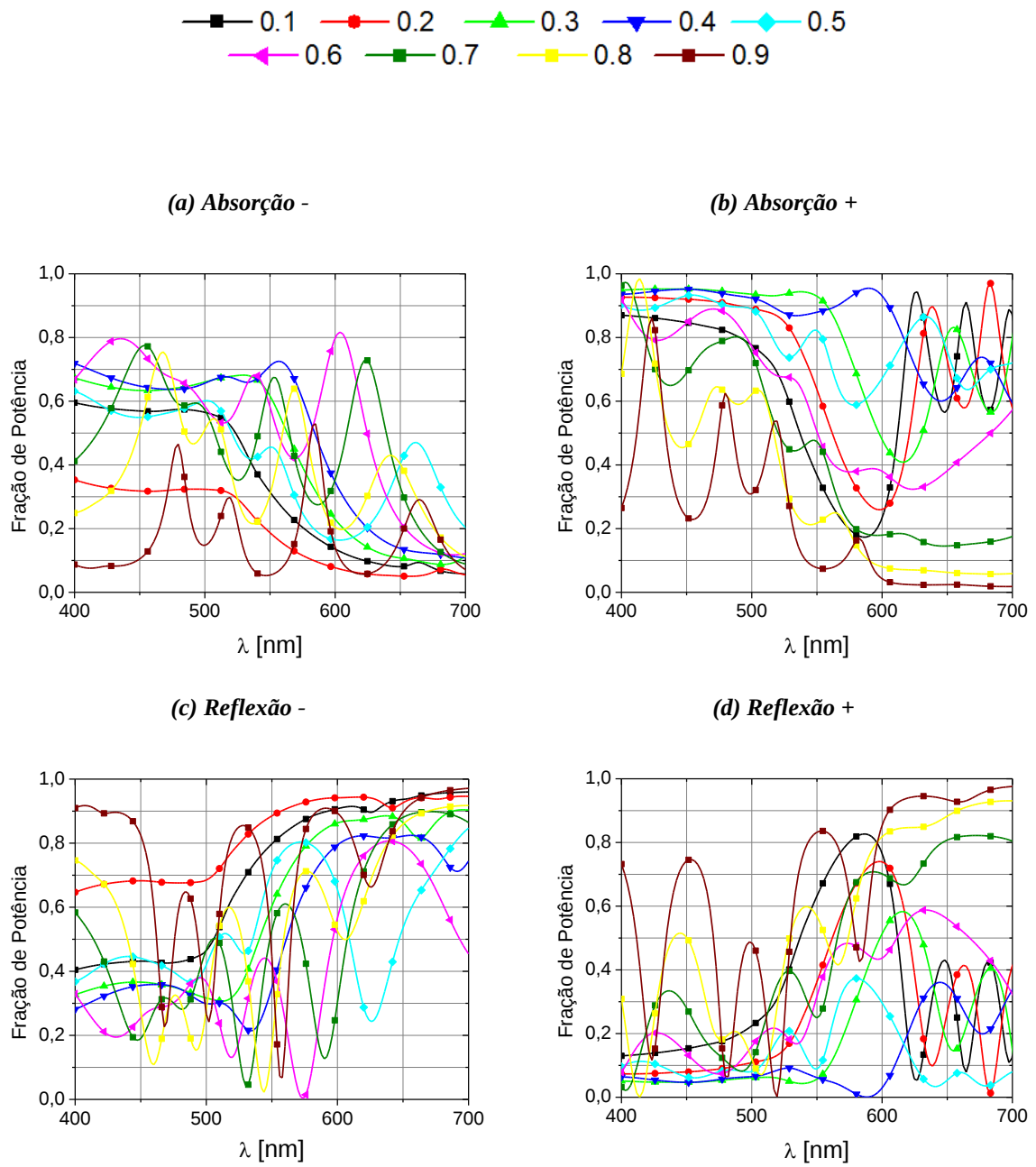


Figura 29: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.

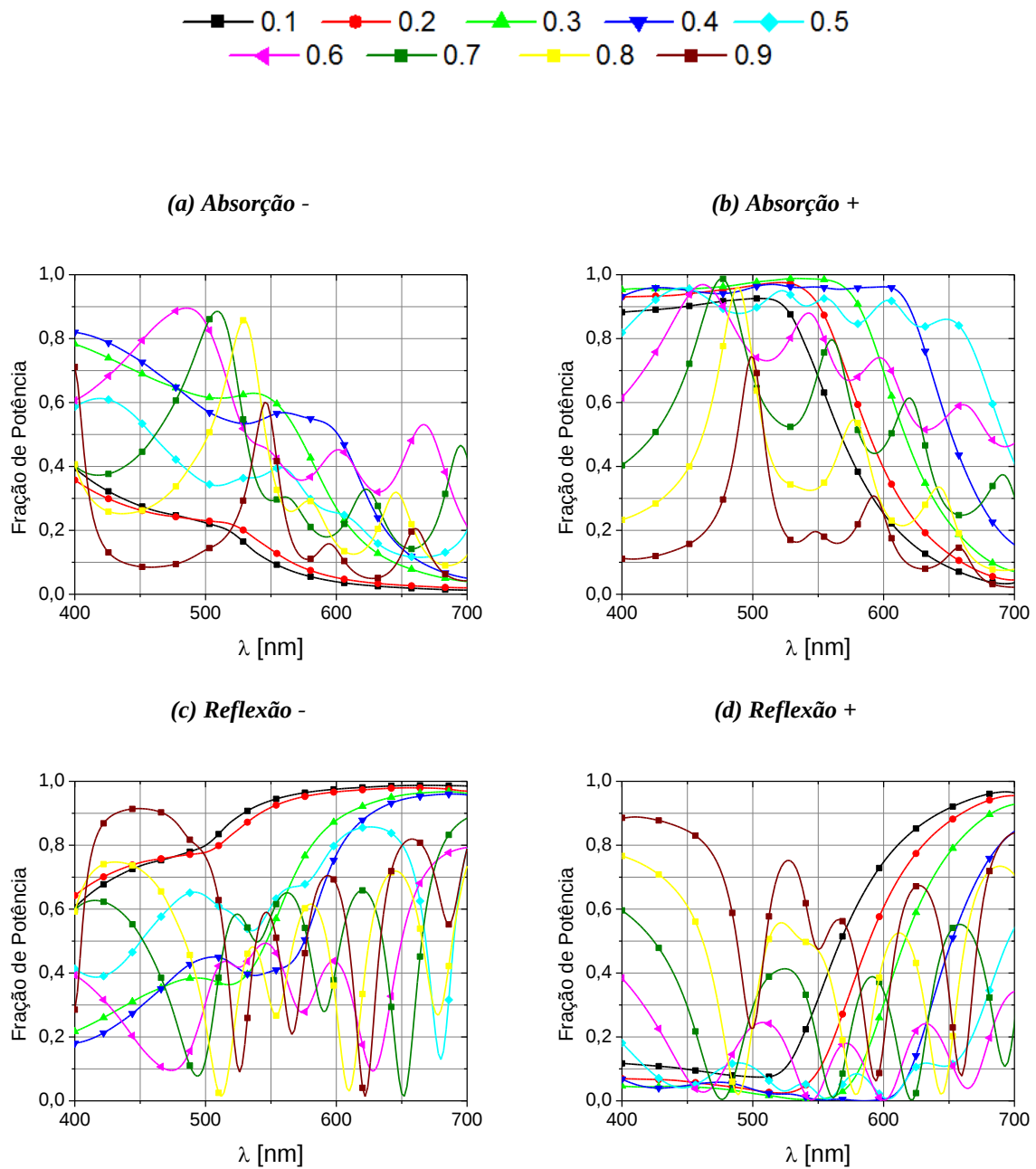


Figura 30: Propagação no metamaterial de Fibonacci Si-Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.1 a 0.9.

As Figuras 27 a 30 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de dielétrico-metal (Si-Au). A fração de preenchimento do

dielétrico-metal variou de 0.1 a 0.9 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 150 a 300 nm preenchidos por ar. A estrutura mantém o comportamento assimétrico e do mesmo modo que no caso anterior, a transmitância na maioria dos casos não apresenta relevância sendo a mesma da direita para esquerda. O novo arranjo da estrutura mantém o comportamento de refletor e absorvedor por diversos comprimentos de onda e configurações diferentes, sustentando a definição de que a estrutura pode ser variada para se obter um resultado desejado.

Essa estrutura apresenta diversas oscilações ao longo do comprimento de onda na faixa do visível com comportamento semelhante à apresentada anteriormente, onde na maioria dos casos a maior parcela de metal influencia no aumento da absorção na estrutura.

Para os resultados de $L=150$ apresentados na Figura 27, a estrutura se expõe como absorvedor em variados comprimentos de onda. A resposta de absorção na Figura 27 (a) apresenta picos de entre 500 e 550 nm para um preenchimento de dielétrico de 0.5 e 0.6. A Figura 27 (b), que traz as respostas da absorção para direita, apresenta resultados de um absorvedor quase perfeito nos preenchimentos de 0.2, 0.3 e 0.4 (com menor preenchimento de dielétrico) em 550 nm, com respostas próximas a 100% de fração de potência absorvida. A estrutura apresenta picos de reflexão que podem ser vistos na imagem 27 (c) de 670 a 700 nm com os índices de 0.1 a 0.3 mais próximos de 100%. Na Figura 27 (d) a melhor resposta de reflexão é obtida para o preenchimento de 0.9.

Para os resultados de $L=200$, apresentados na Figura 28, nota-se que semelhante a configuração da estrutura anterior a estrutura atual apresenta alternados picos de absorção e reflexão em diferentes comprimentos de onda. Em 28 (a) para o preenchimento de 0.5 a absorção apresenta um pico em 500 nm, na Figura 28 (b) entre 500 e 600 nm é obtido um absorvedor quase perfeito para os 0.1 e 0.2 que possuem maiores parcelas de metal com outro pico no final da região do visível também com o preenchimento de 0.1. O comportamento assimétrico da absorção é observado ao comparar as curvas de preenchimento 0.1 em (a) e (b), onde no primeiro momento apresenta curvas abaixo de 50 % e no segundo momento atinge picos de quase 100%. Em 28 (c) e (d) são observados os resultados de reflexão da estrutura, na reflexão para direita é obtido um refletor com potência acima de 95% para o preenchimento de 0.9 a partir dos 550 nm. A assimetria é novamente notada nas reflexões ao observar as Figuras 28 (c) e (d) que apresentam nas variações de 0.1 mais disparidades, no primeiro caso obtendo reflexão acima de 95% e no segundo caso chegando ao máximo em 50%, o que permite que a mesma estrutura tenha reflexão diferente no mesmo comprimento de onda a depender do sentido de propagação.

Para $L=250$, Figura 29, a absorção na imagem 29 (a) possui várias oscilações, mas nenhum pico acima de 85%, já a absorção para direita apresenta picos no início e no final do regime do visível apresentando um absorvedor quase perfeito para o preenchimento de 0.8, próximo aos 400 nm. A reflexão em ambos os sentidos de propagação apresenta suas maiores incidências nos comprimentos de onda finais do regime do visível, em (c) no preenchimento de 0.9 a fração de potência ultrapassa 95 % e em (d) para os preenchimentos de 0.8 a 0.9 as melhores respostas de reflexão estão a partir dos 650 nm.

Para $L=300$, Figura 30, a estrutura se apresenta como um bom absorvedor para diferentes configurações de preenchimento de metal-dielétrico como pode ser visto em (b). A assimetria da absorção é vista no preenchimento de 0.1 e 0.2, onde ela oscila para valores mais altos de fração de potência na propagação para direita e na esquerda para valores mais baixos de potência. Em (b) existem picos de absorção próximos a 100% principalmente entre 500nm e 550 nm com o preenchimento de 0.3, em (a) não houve picos acima de 90 %. A reflexão para esquerda tem altos picos com os preenchimentos de 0.1 e 0.2 de 600 a 700 nm, já a reflexão para direita tem seus maiores picos entre 670 e 700 nm com os preenchimentos de 0.1.

Para as diferentes frações de preenchimentos de L , foram obtidos resultados semelhantes, com variados picos de absorção e reflexão, satisfazendo os resultados esperados da estrutura.

4.3.3 Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si

Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si, separadas pelo dielétrico ar, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao infravermelho de 400-1100 nm. Os parâmetros L variaram de 150nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.1 a 0.9 com um total de 20 nm.

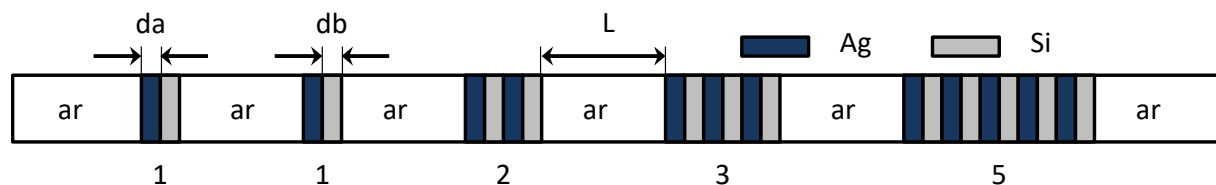


Figura 31: Hiper cristal multicamadas alternadas de Ag-Si

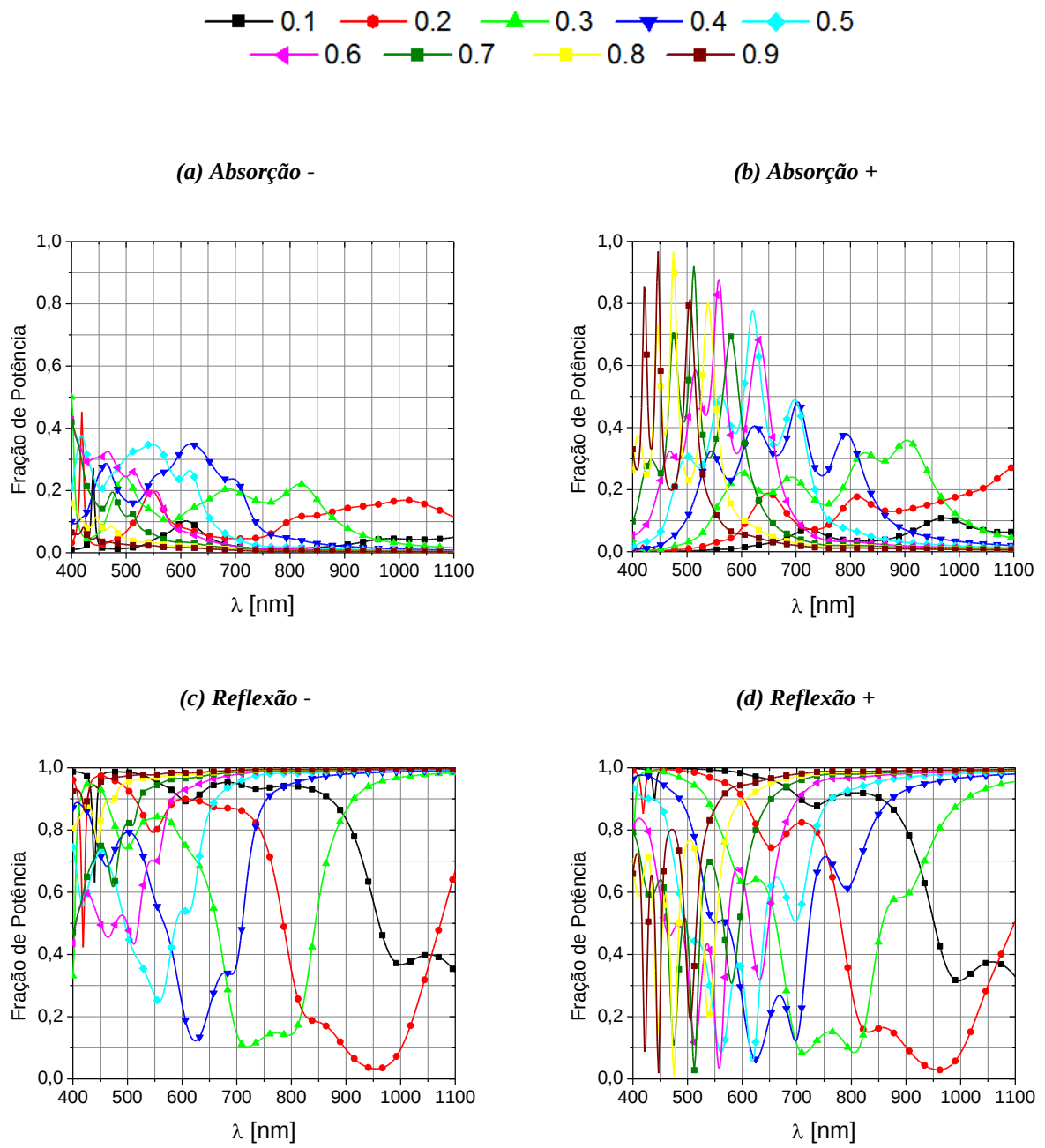


Figura 32: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

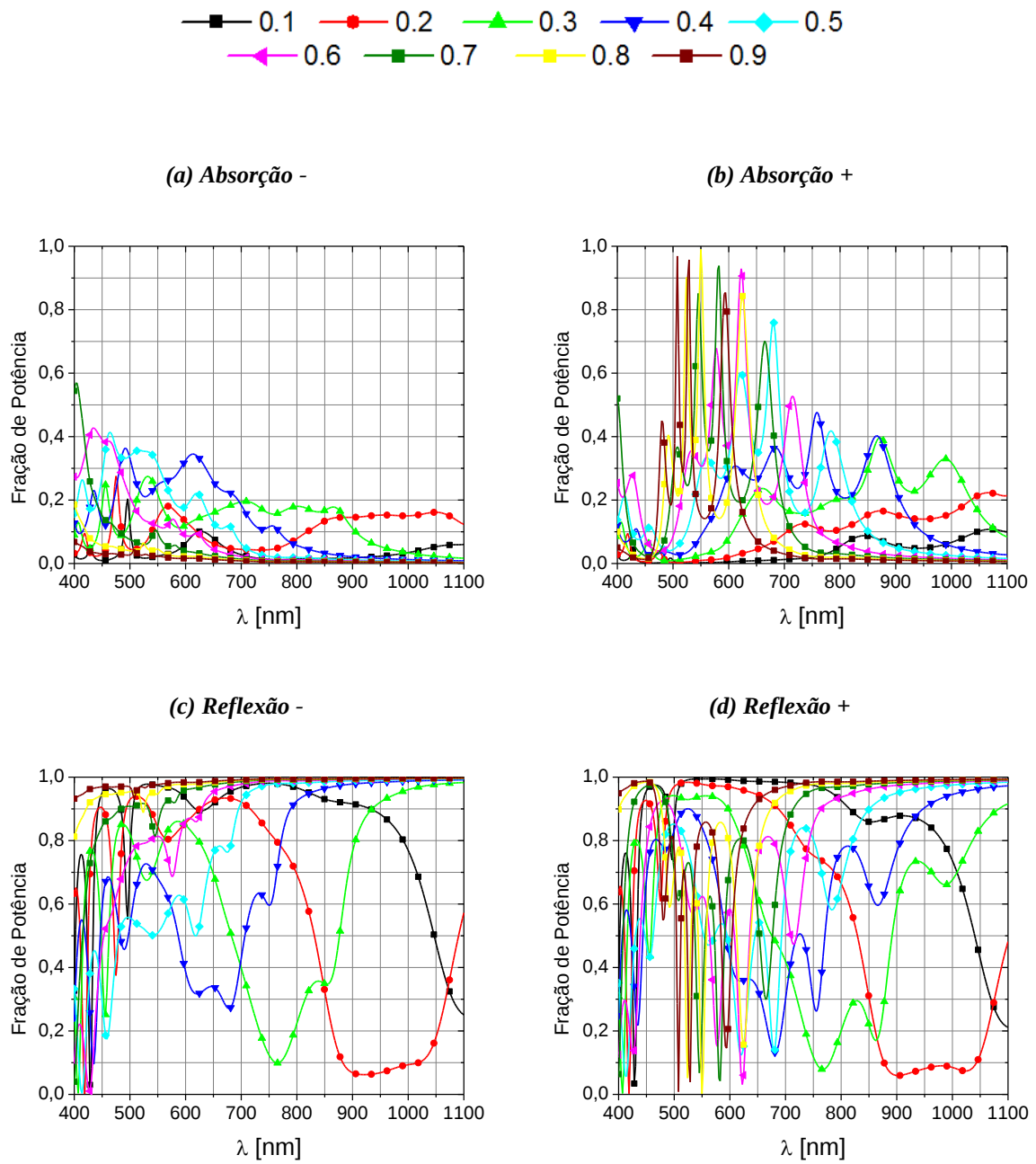


Figura 33: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

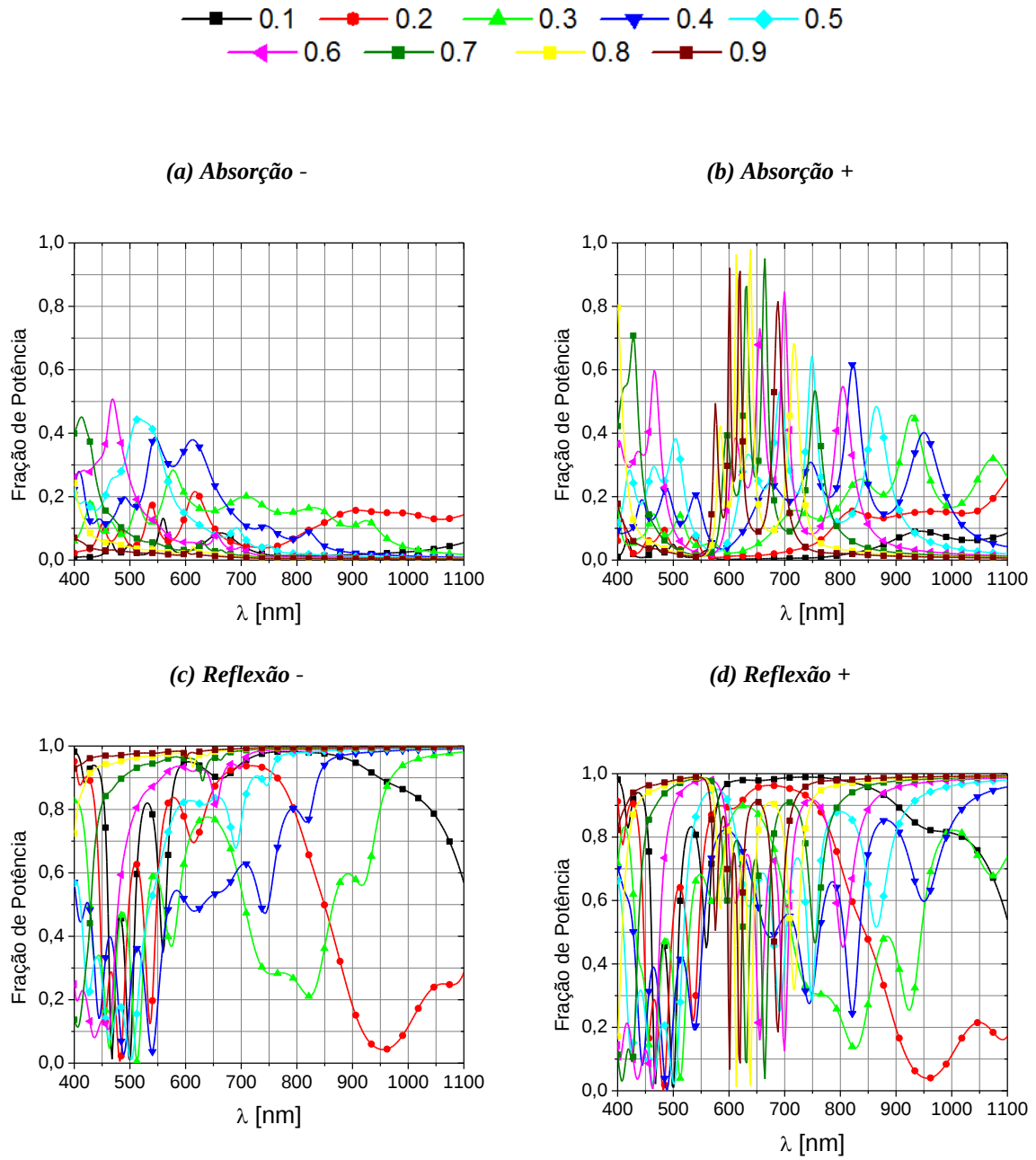


Figura 34: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

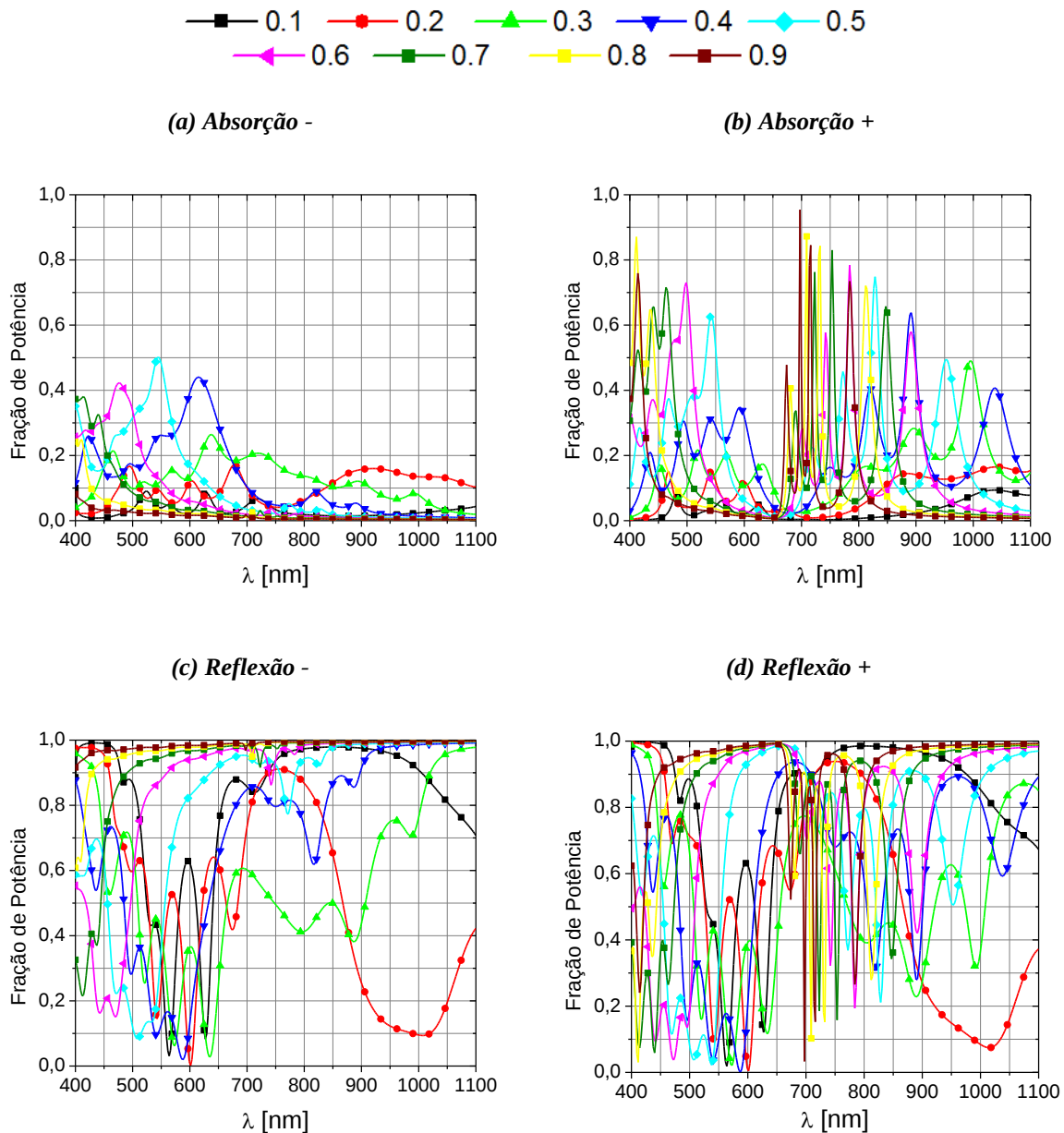


Figura 35: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9

As Figuras 32 a 35 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Ag-Si). A fração de preenchimento do metal-dielétrico variou de 0.1 a 0.9 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 150 a 300 nm preenchidos por ar. A estrutura não apresenta tanta assimetria como nos casos anteriores e a transmitância na maioria dos casos não apresenta relevância sendo a mesma da direita para esquerda. O novo arranjo da estrutura apresenta comportamentos que se aplicam na maioria dos casos como bons refletores, mas possui alguns picos que demonstram que a estrutura ainda pode ser utilizada como absorvedores em determinados comprimentos de onda e disposições.

Para os resultados de $L=150$ apresentados na Figura 32, a estrutura não apresenta respostas relevantes de absorção, apenas na absorção com propagação para direita houve picos para os maiores preenchimentos de metal (0.8 e 0.9). Em relação às respostas apresentadas nas Figuras 32 (c) e (d) foram obtidos refletores quase perfeitos na propagação para esquerda com os preenchimentos de 0.8 e 0.9, obtendo frações de potência acima de 98% por quase todo regime da luz do visível até o regime do infravermelho analisado (1100 nm), já a partir dos 750 nm os preenchimentos de 0.5 e 0.6 obtiveram respostas semelhantes. Na propagação para direita (c), para a parcela de metal de 0.1, a reflexão obteve melhores resultados no início da região do visível, para o fim do regime analisado a parcela de 0.9 de metal obteve as maiores frações.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 33 nota-se respostas semelhantes às obtidas em 32. Para absorção para esquerda, 33 (a), não houveram respostas relevantes para absorção. Já na absorção para direita 33 (b), em 550 nm para o preenchimento de 16 nm de Ag e 4 nm de Si é obtido um absorvedor quase perfeito. Em 29 (c) o preenchimento de 0.9 de metal foi obtido um refletor com 99% de eficiência por quase todo o comprimento de onda analisado, sendo sua menor eficiência 94 %. Essa mesma fração de preenchimento atingiu resultados semelhantes para absorção para direita, entretanto, iniciando em 700 nm chegando aos 1100 com absorção acima de 98 %.

Para $L=250$, Figura 34, a absorção na imagem 34 (a) continua sem resultados consideráveis, a absorção para direita também manteve picos de absorção semelhantes as análises anteriores da estrutura. A reflexão em ambos os sentidos de propagação apresentam grandes incidências por todo o comprimento de onda, sendo o maior preenchimento de metal o responsável pela reflexão quase perfeita do hiper cristal. Para $L=300$, Figura 35, os resultados foram semelhantes aos analisados anteriormente para os preenchimentos de Ag-Si, sem alterações significativas. Para as diferentes frações de preenchimentos de L, foram obtidos resultados semelhantes, sem muitas variações entre as respostas. A estrutura apresentou boa absorção apenas no sentido de propagação para direita e em poucos comprimentos de onda, tendo a sua melhor aplicação em refletores, pois pode ser utilizado em variados comprimentos de ondas com fatores de potência acima de 99%.

4.3.4 Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si-SiO₂

Estrutura composta por metal-dielétrico, Ag-Si, separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao infravermelho de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 150nm a 300nm em passos de 50 nm. O par de metal dielétrico variaram de 0.1 a 0.9 com um total de 20 nm.

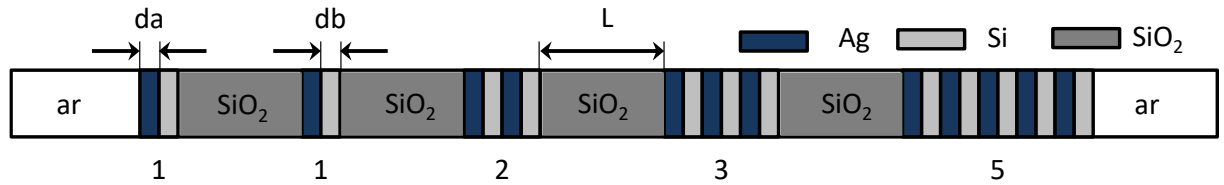


Figura 36: Hipercristal multicamadas alternadas de Ag-Si com dielétrico SiO_2

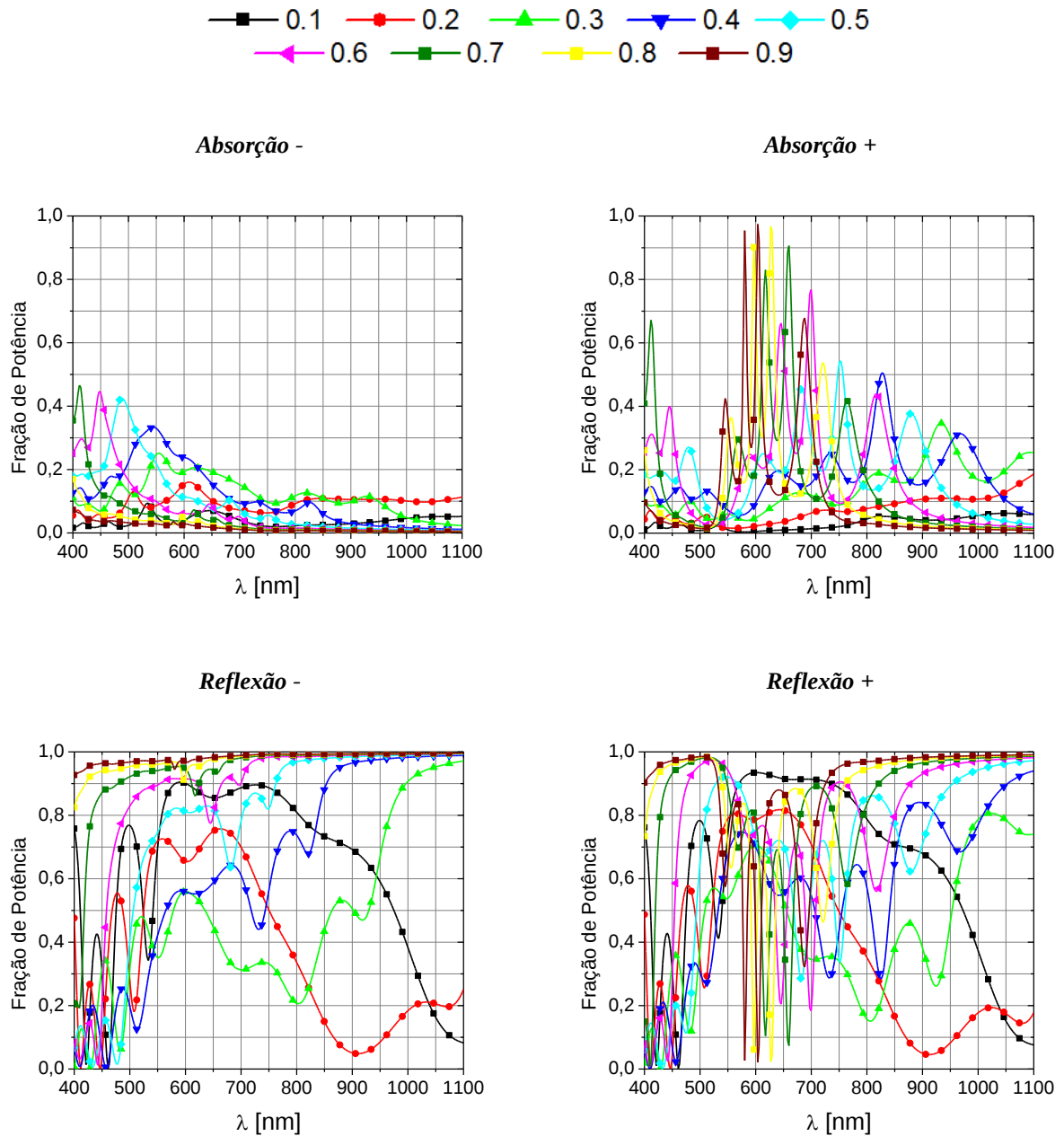


Figura 37: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 150$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

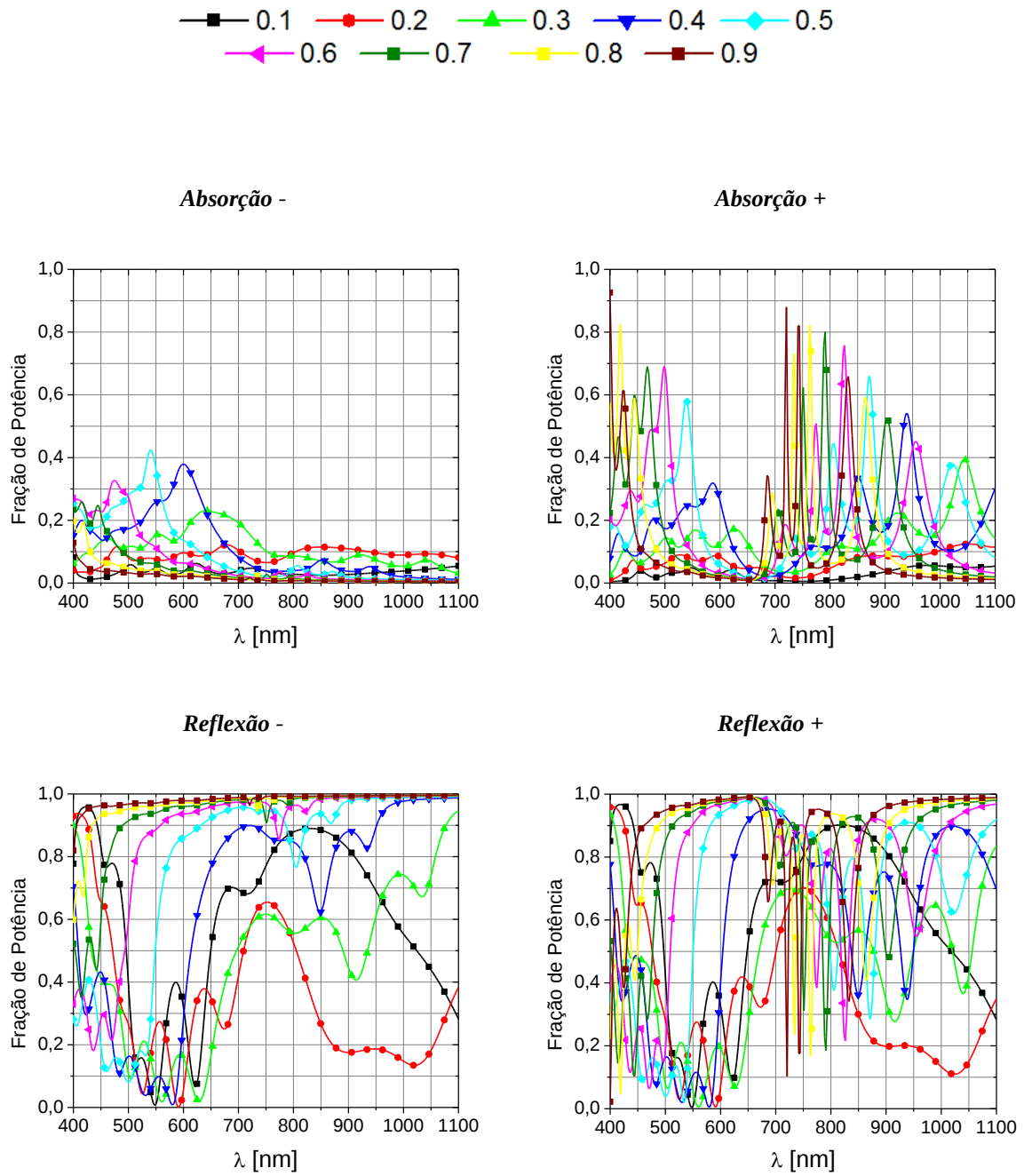


Figura 38: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

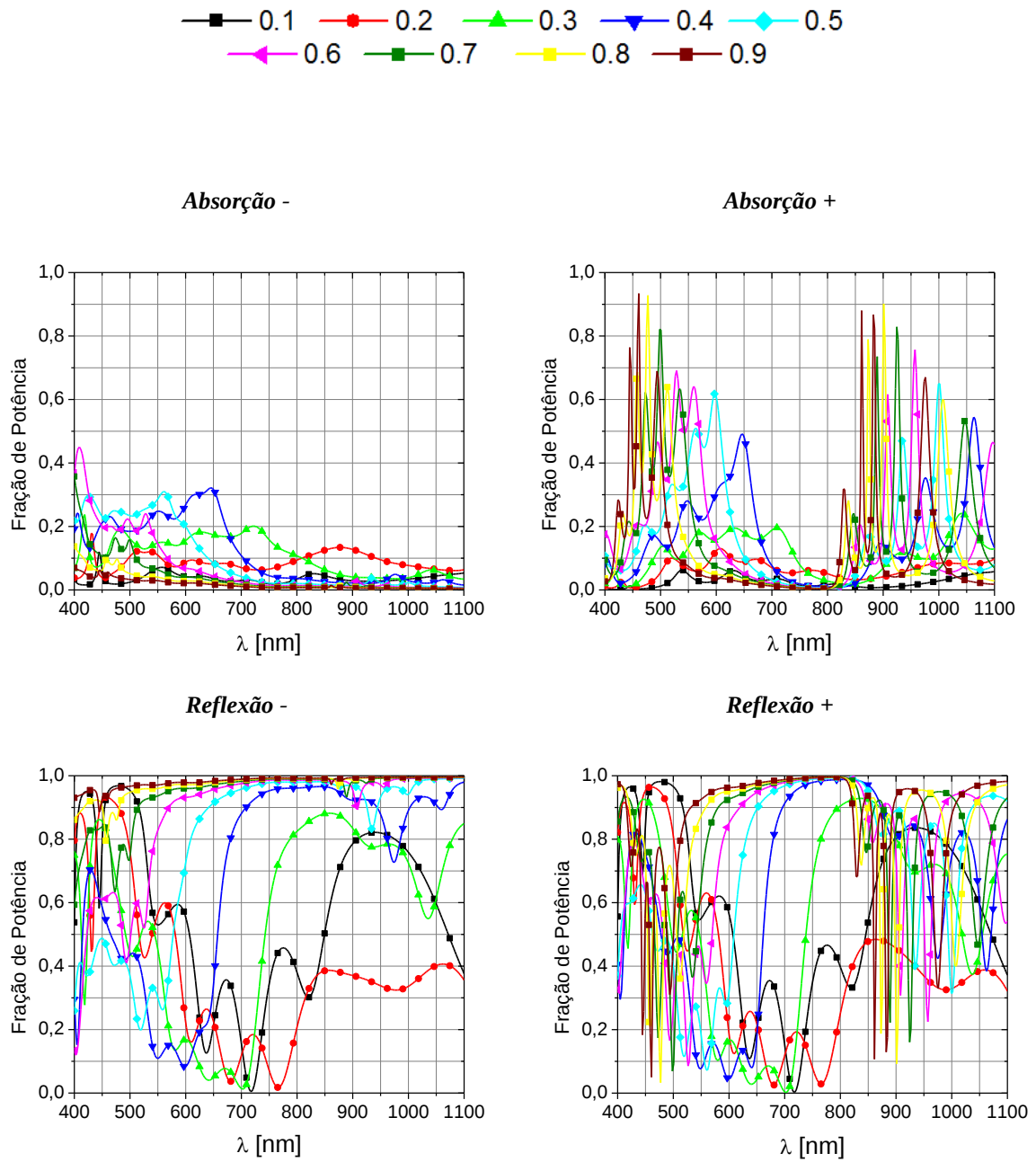


Figura 39: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

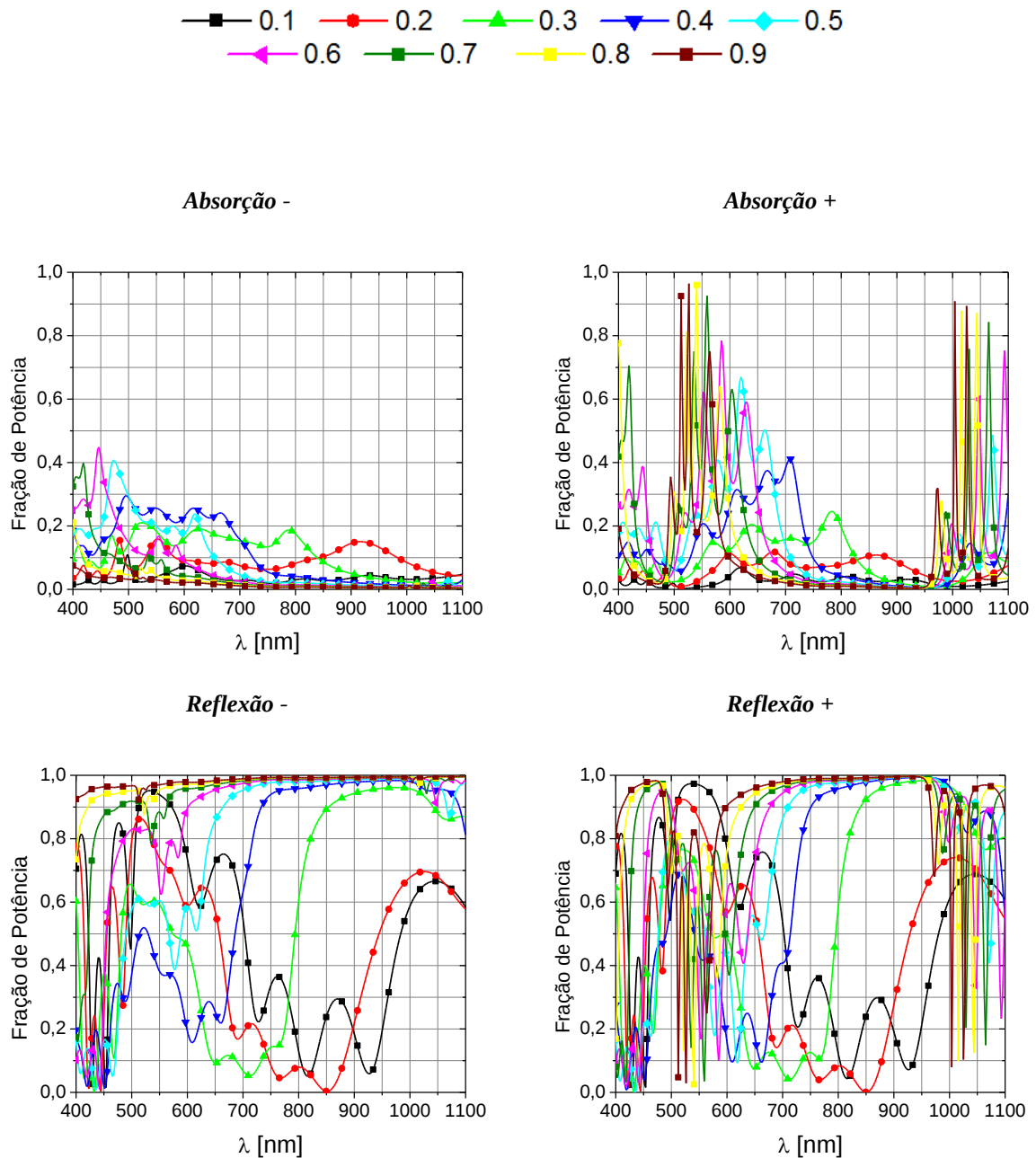


Figura 40: Propagação no metamaterial de Fibonacci Ag-Si-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.1 a 0.9.

As Figuras de 37 a 40 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Ag-Si). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.1 a 0.9 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 150 a 300 nm preenchidos agora pelo dielétrico SiO₂. A alteração do dielétrico ar por outro dielétrico foi realizada pensando-se no processo de fabricação do hiper cristal o qual seria mais factível com estruturas intercaladas com outros dielétricos. Com os resultados é possível notar que mesmo alterando o ar pela sílica a estrutura mantém o seu comportamento

sem redução significativa de seus resultados. A transmitância na maioria dos casos não apresenta relevância sendo a mesma da direita para esquerda. A estrutura apresenta o comportamento de refletor e absorvedor por diversos comprimentos de onda e configurações, o que demonstra que a estrutura pode ser variada para se obter um resultado desejado.

Os resultados obtidos para todas as configurações foram similares a estrutura apresentada na Figura 31. A estrutura manteve o melhor comportamento de refletor para as diferentes configurações por todas as variações de L , d_a e d_b , se comportando como absorvedor apenas na propagação para direita em alguns picos durante a região trabalhada.

Para os resultados de $L=150$ apresentados na Figura 37, a estrutura não apresentou respostas relevantes de absorção, apenas na absorção com propagação para direita houve picos para os maiores preenchimentos de metal (0.8 e 0.9). Em relação às respostas apresentadas em (c) e (d) foram observados refletores quase perfeitos, onde, na propagação para esquerda os preenchimentos de 0.8 e 0.9 obtiveram frações de potência acima de 98% por quase todo regime da luz do visível até o regime do infravermelho analisado (1100 nm) e a partir dos 750 nm foram obtidos resultados semelhantes para os preenchimentos de 0.5 e 0.6.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 38 notam-se respostas semelhantes às obtidas em 37. Para absorção para esquerda, 38 (a), não houve respostas relevantes para absorção e no sentido direito as frações de potência não ultrapassaram 90%. Em 38 (c) o preenchimento de 0.9 de metal apresentou um refletor com 99% de eficiência por quase todo o comprimento de onda analisado, sendo sua menor eficiência 94 %. Essa mesma fração de preenchimento atingiu resultados semelhantes para absorção para direita, entretanto, não se mantendo por todo comprimento de onda, mas se mantendo em alguns períodos como de 600 a 700 nm e 950 a 1100nm.

Para $L=250$ e $L=300$ (Figuras 39 e 40) os resultados são similares sem alterações consideráveis, à absorção para esquerda não possui resultados acima de 50 % e a propagação para direita mantém picos de absorção semelhantes às análises anteriores da estrutura. A reflexão em ambos os sentidos de propagação apresentam grandes incidências por todo o comprimento de onda, sendo o maior preenchimento de metal o responsável pela reflexão quase perfeita do hiper cristal.

4.4 Estruturas de Hiper cristal baseada na sequência de Fibonacci com variação de ângulo

Nesta seção serão apresentados resultados do hiper cristal baseado na sequência de Fibonacci com variação do ângulo de incidência θ de 0° a 87° no modo TE e TM como apresentado na Figura 40.

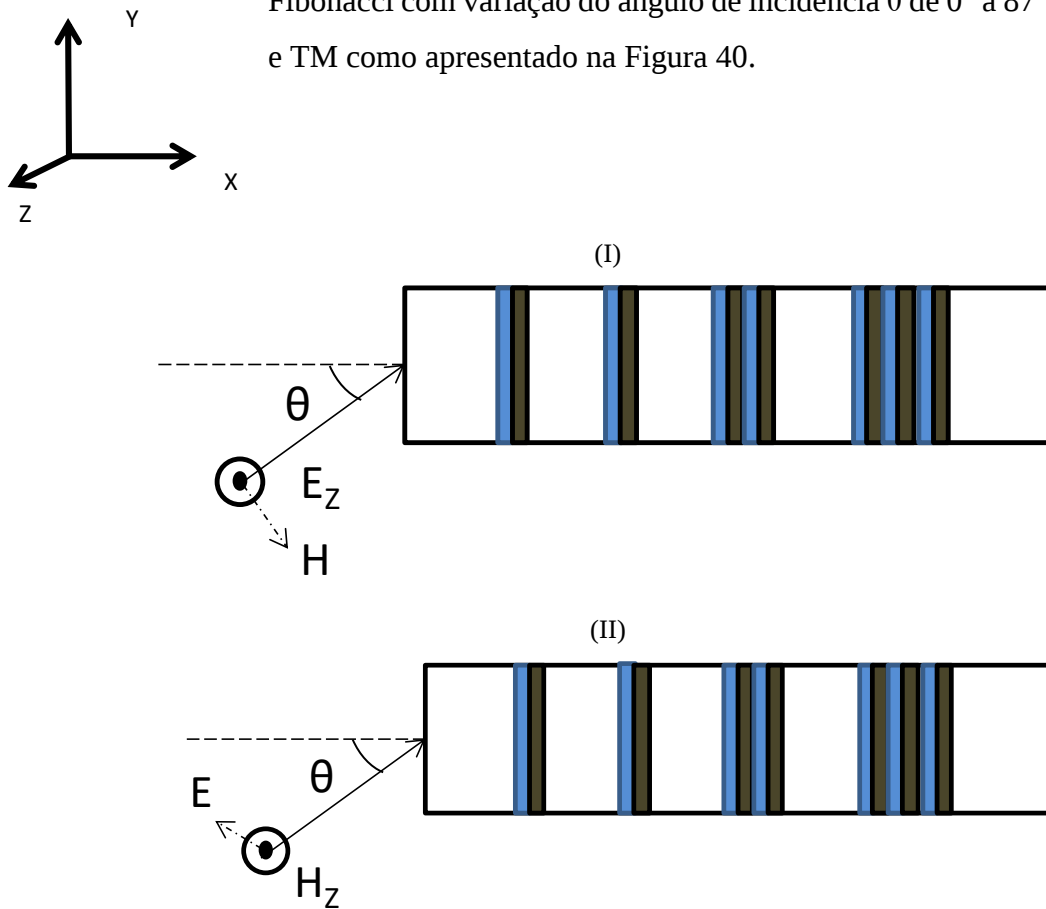


Figura 41: Representação do ângulo de incidência do Modo TE (I) e modo TM (II) na estrutura Fibonacci

4.4.1 Modo de Incidência TM

4.4.1.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂

Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂, separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda indo da faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 20 nm como pode ser visto na tabela 2. O modo de incidência utilizado é o TM com variação angular de 0° a 87° .

Tabela 2: Fator de preenchimento de 0.25 a 0.75 de um total de 20 nm.

PREENCHIMENTO	PARCELA METAL (nm)	PARCELA DIELÉTRICO (nm)
0.25	5	15
0.50	10	10
0.75	15	5

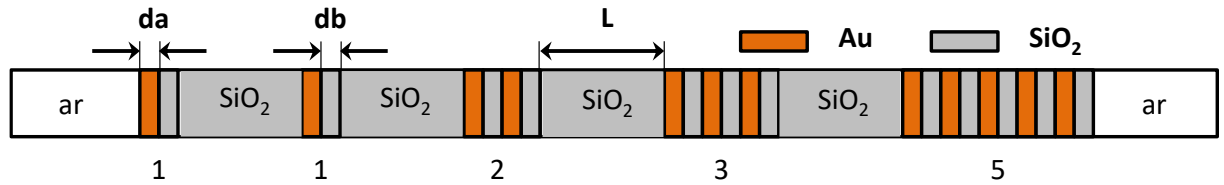


Figura 42: Hiper cristal multicamadas alternadas de Au- SiO_2

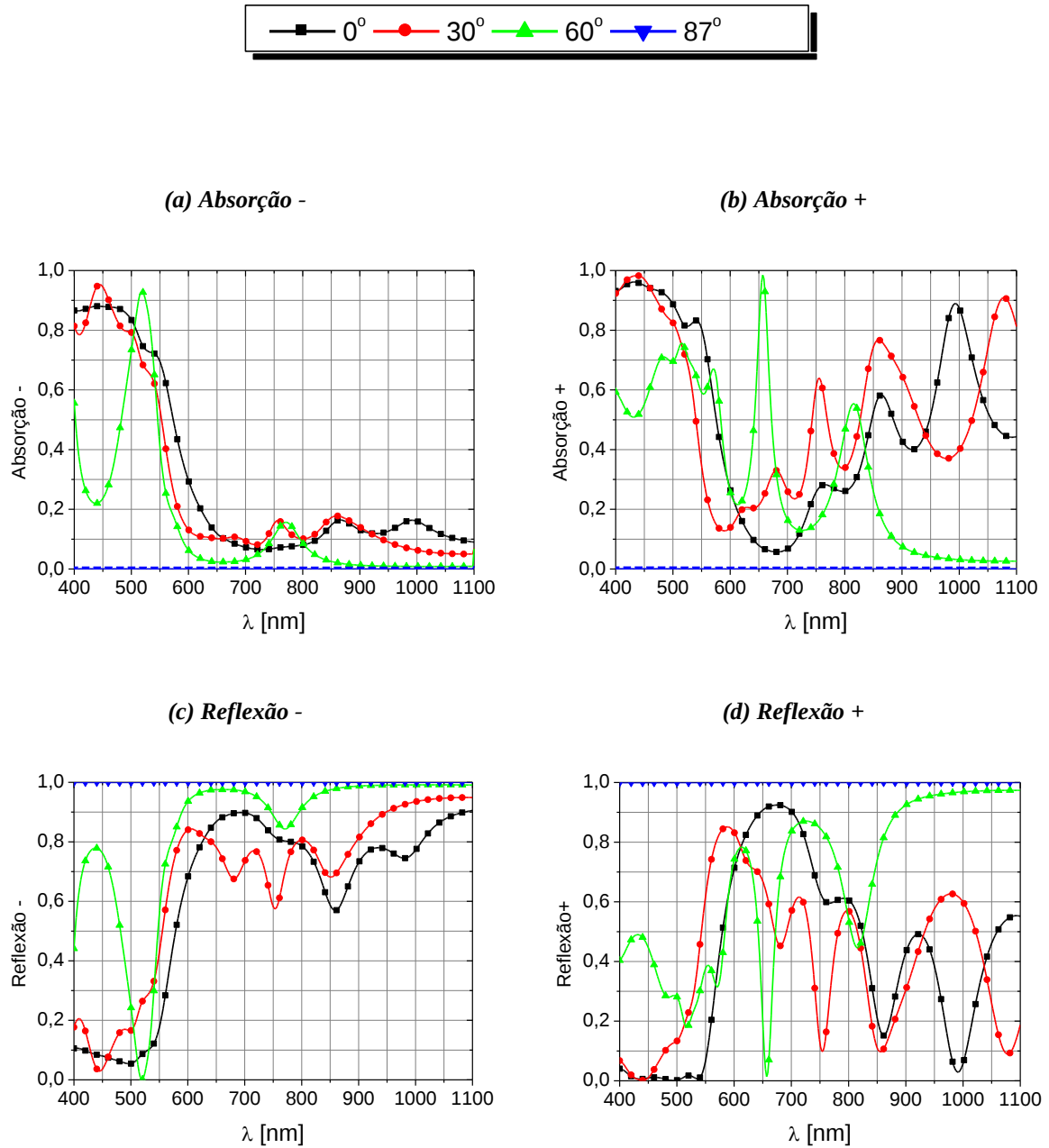


Figura 43: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO_2 em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

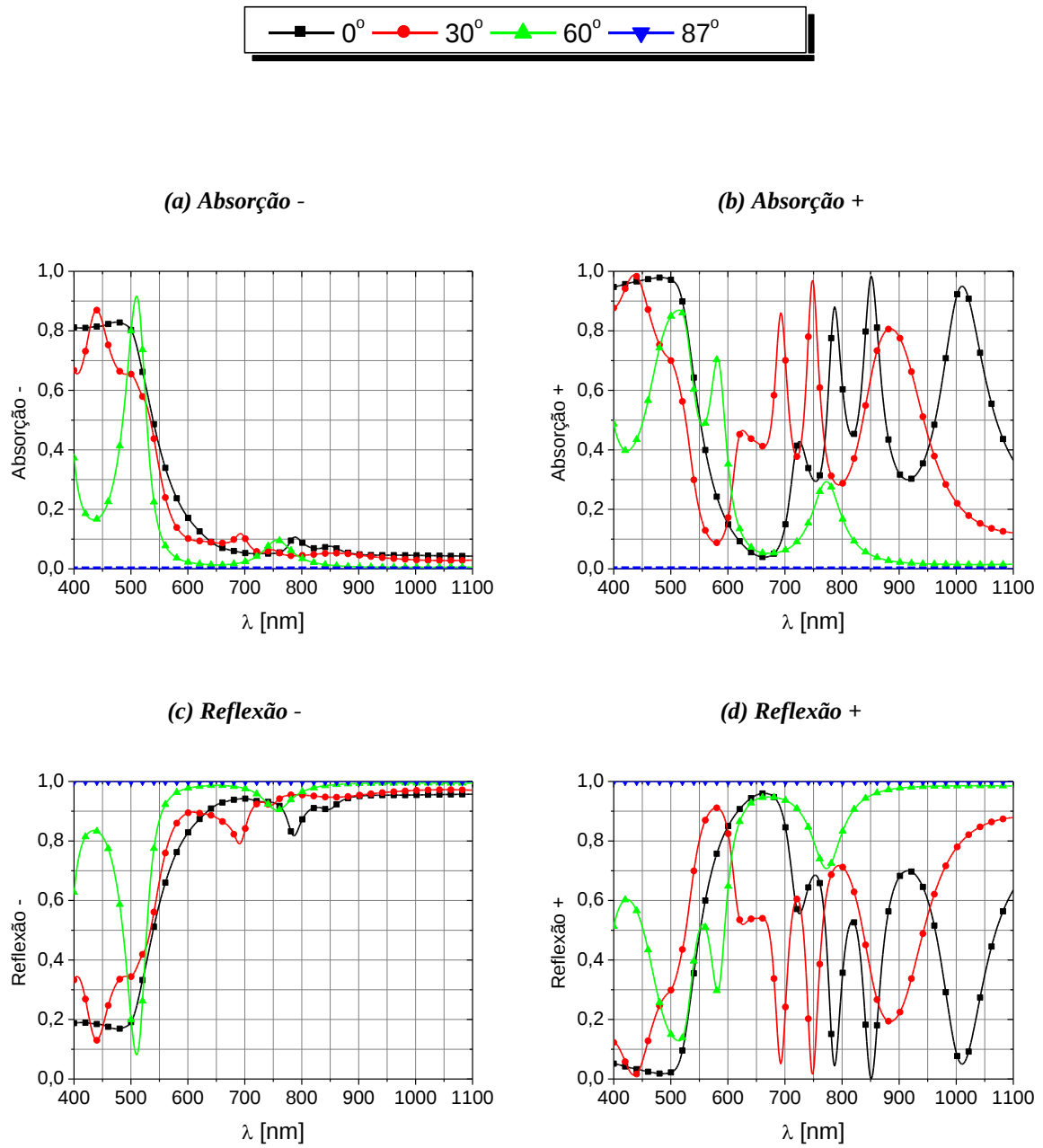


Figura 44: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

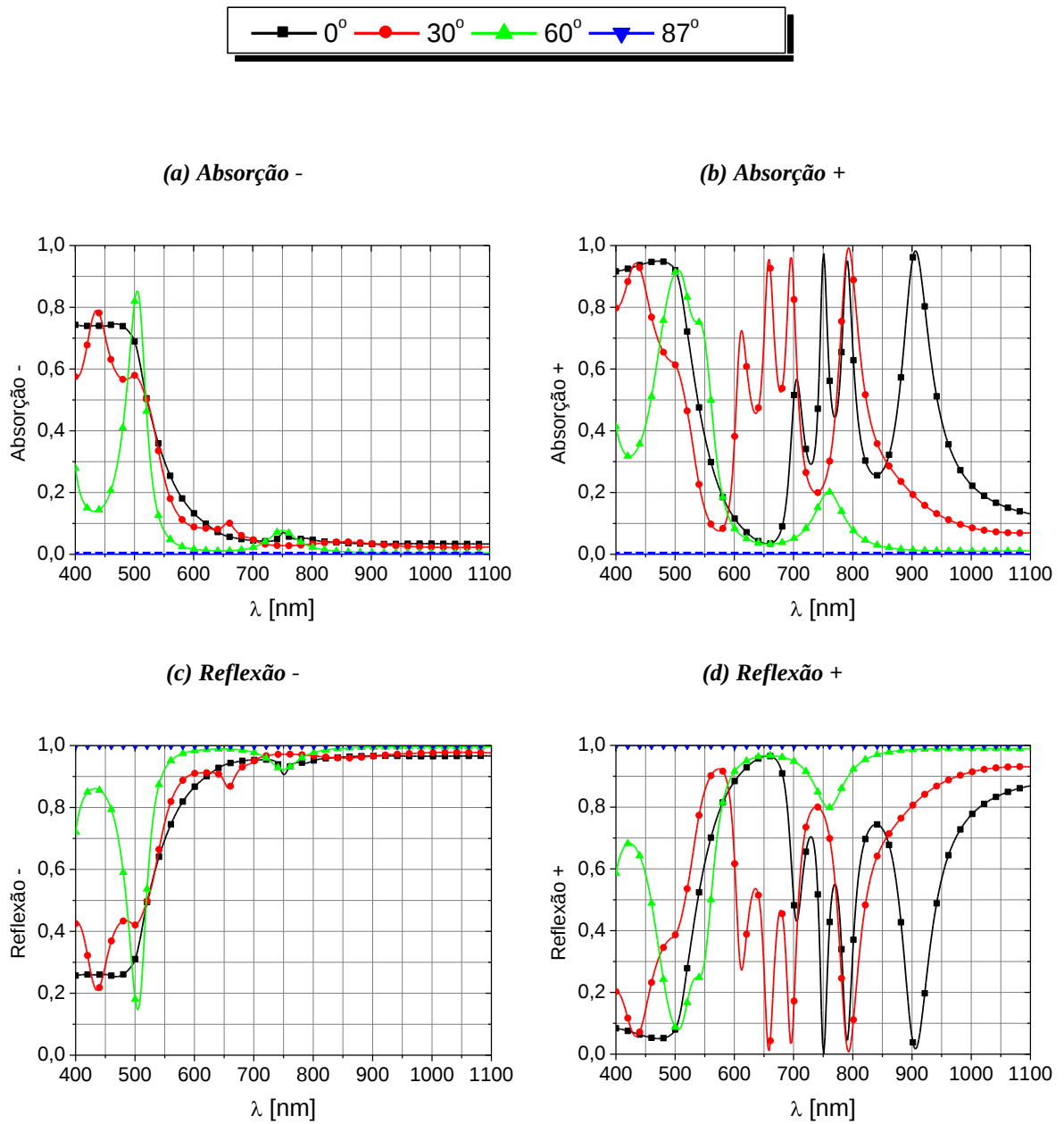


Figura 45: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

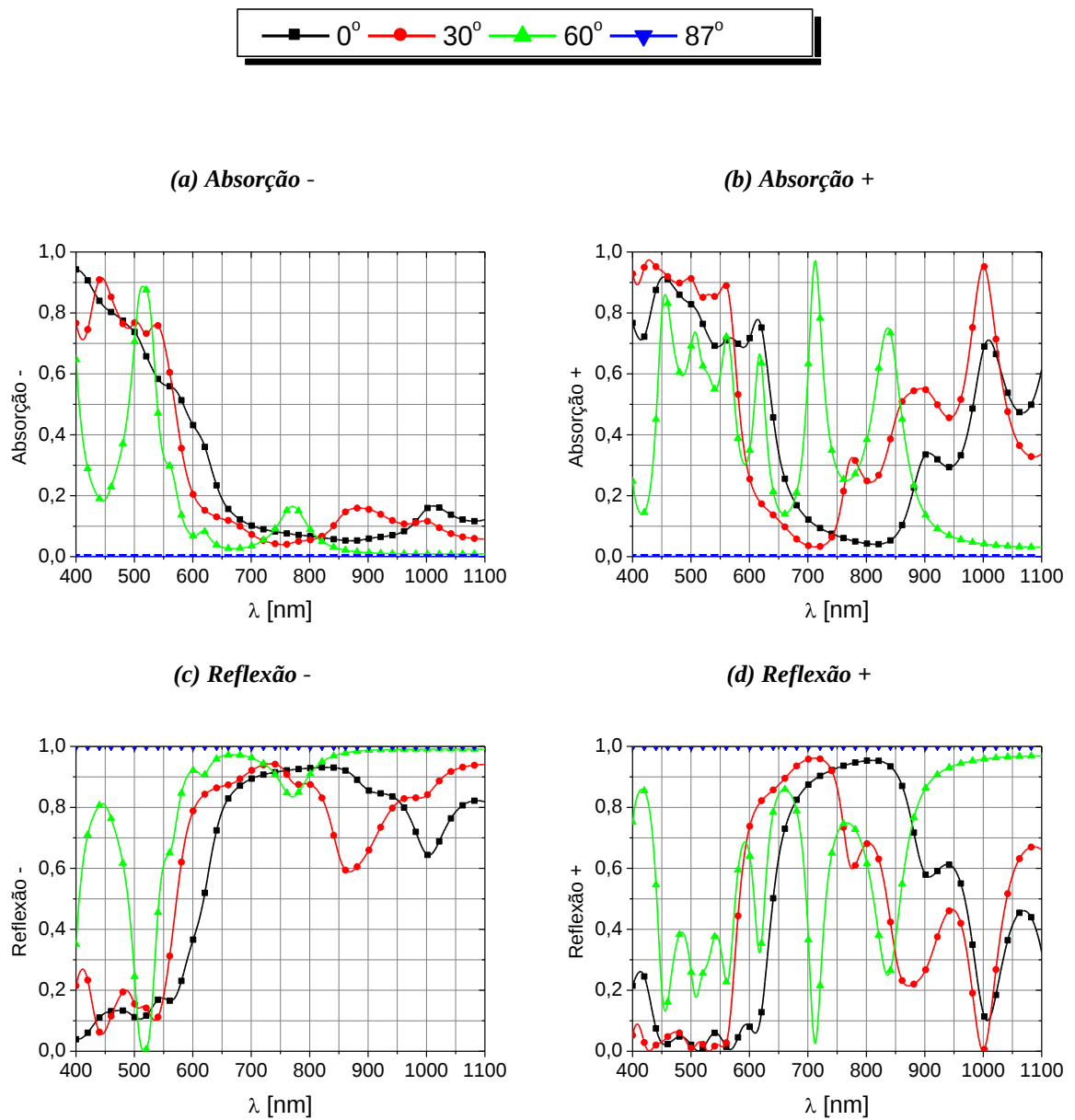


Figura 46: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

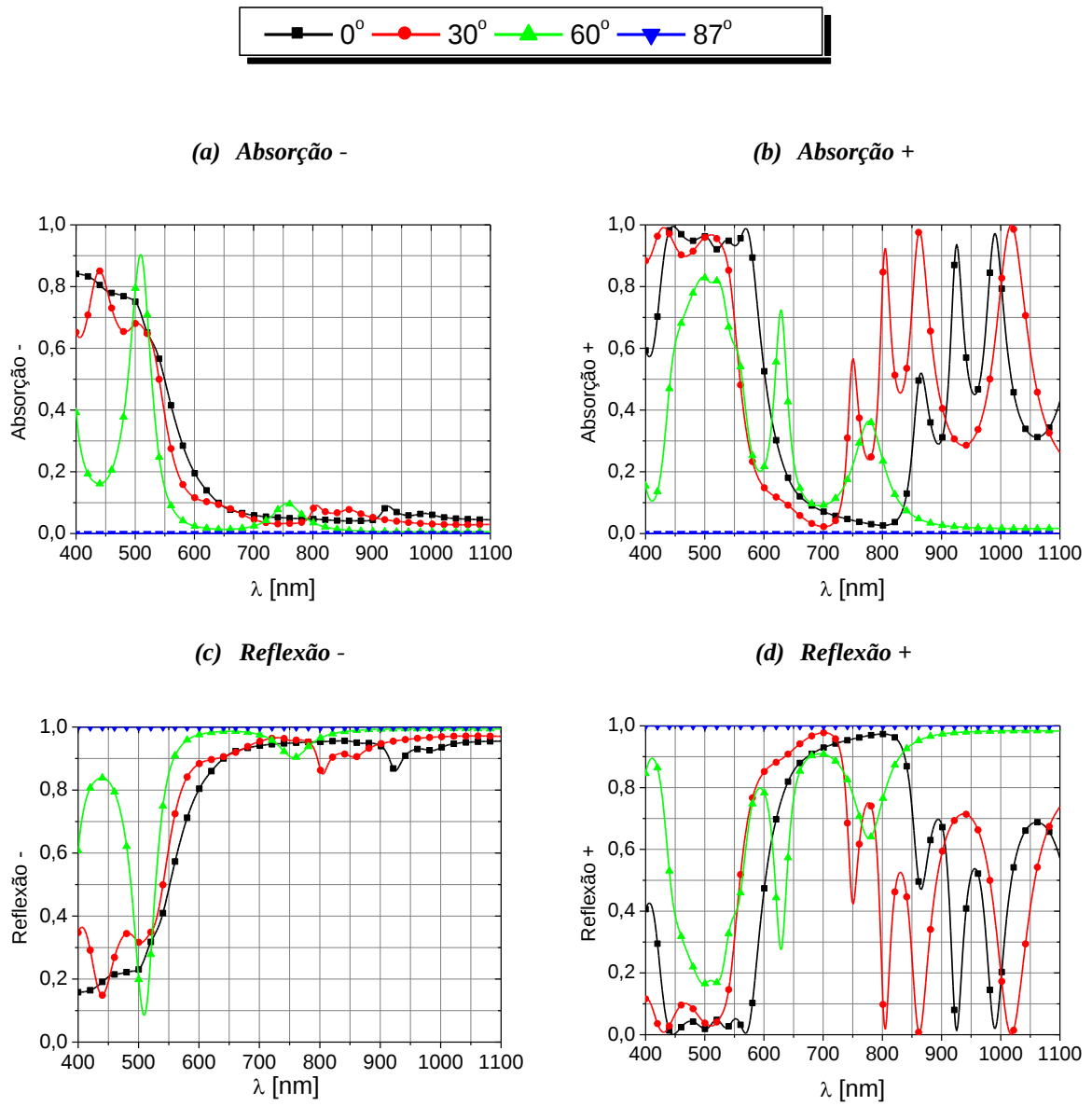


Figura 47: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

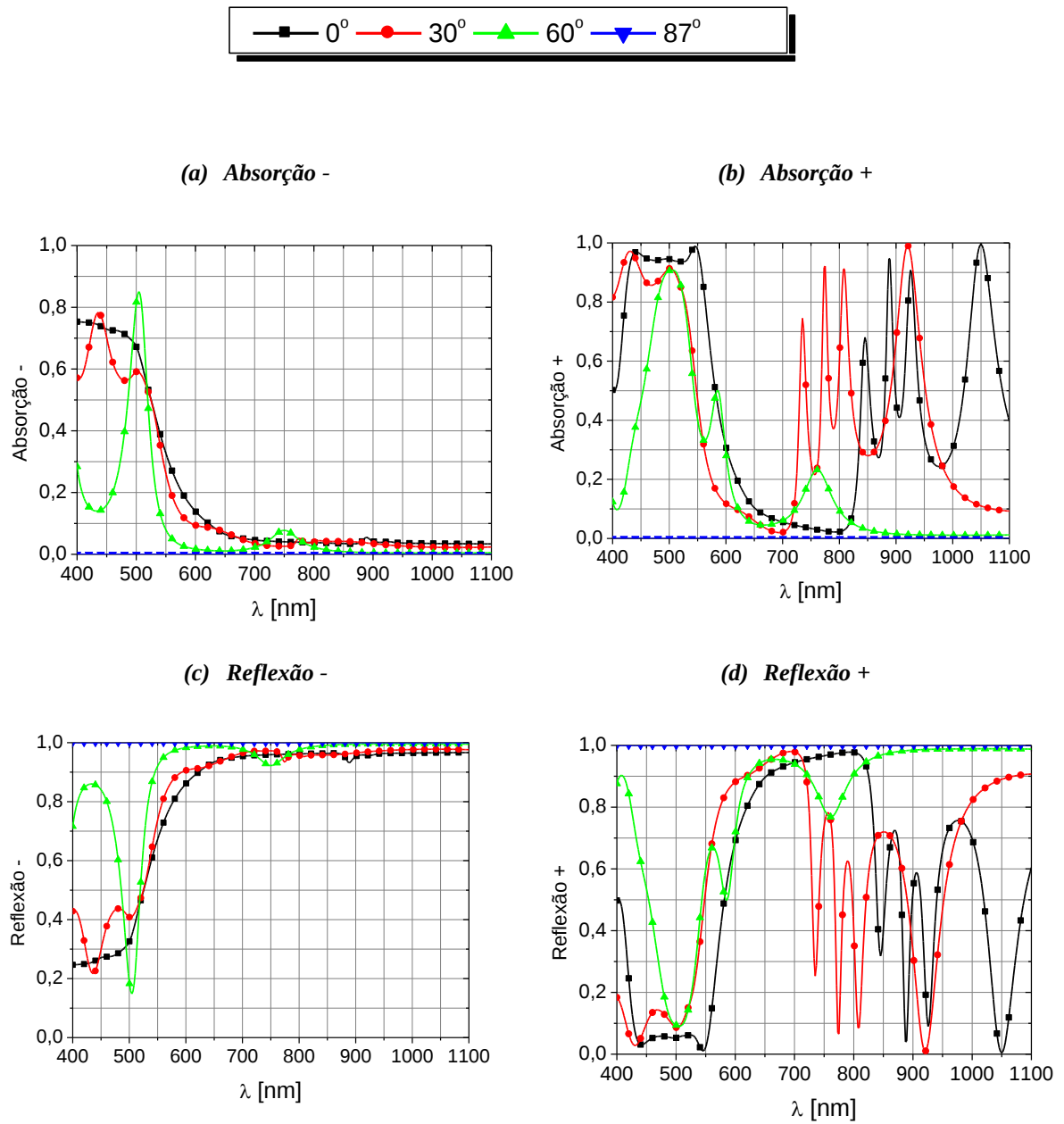


Figura 48: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

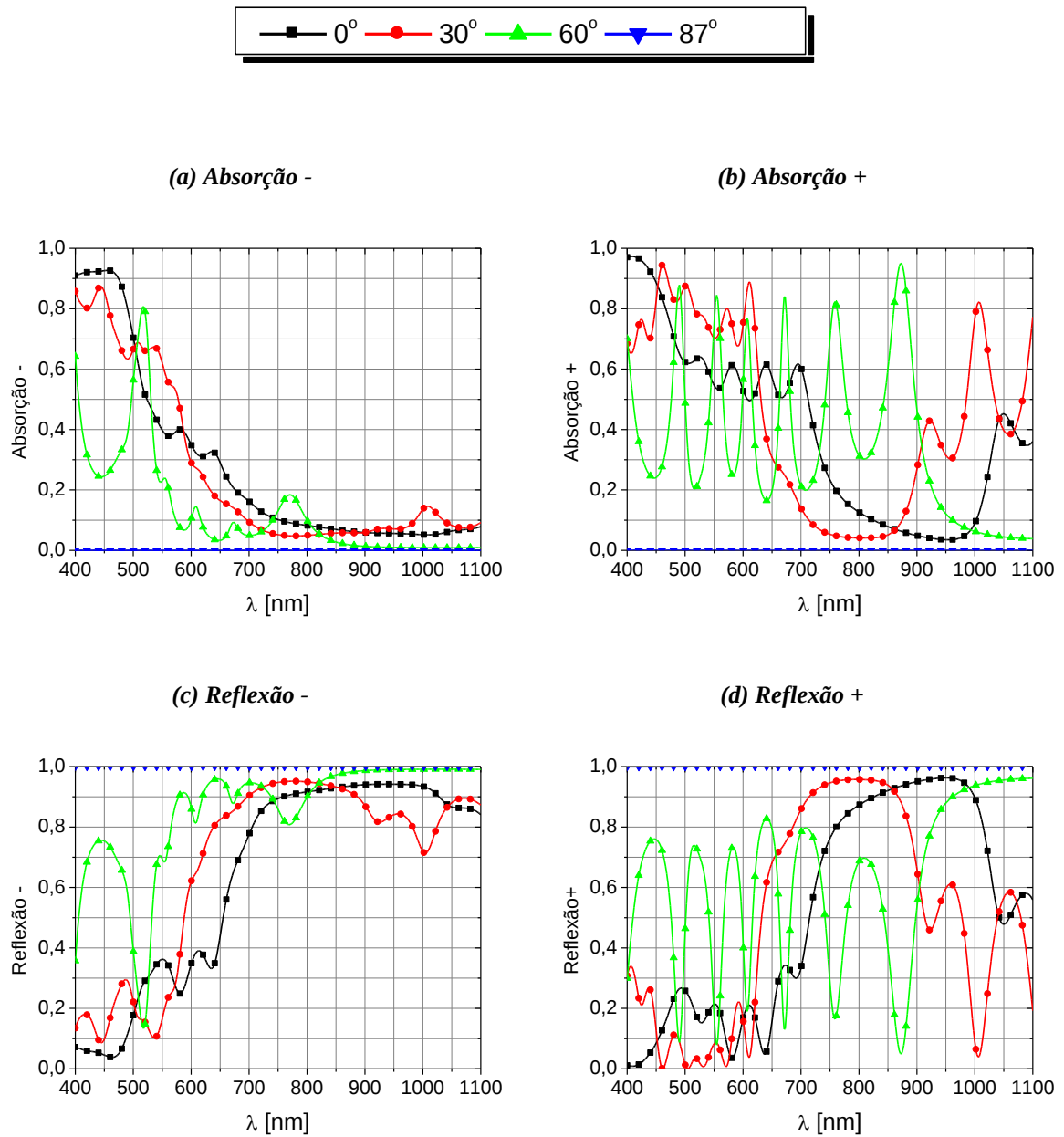


Figura 49: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

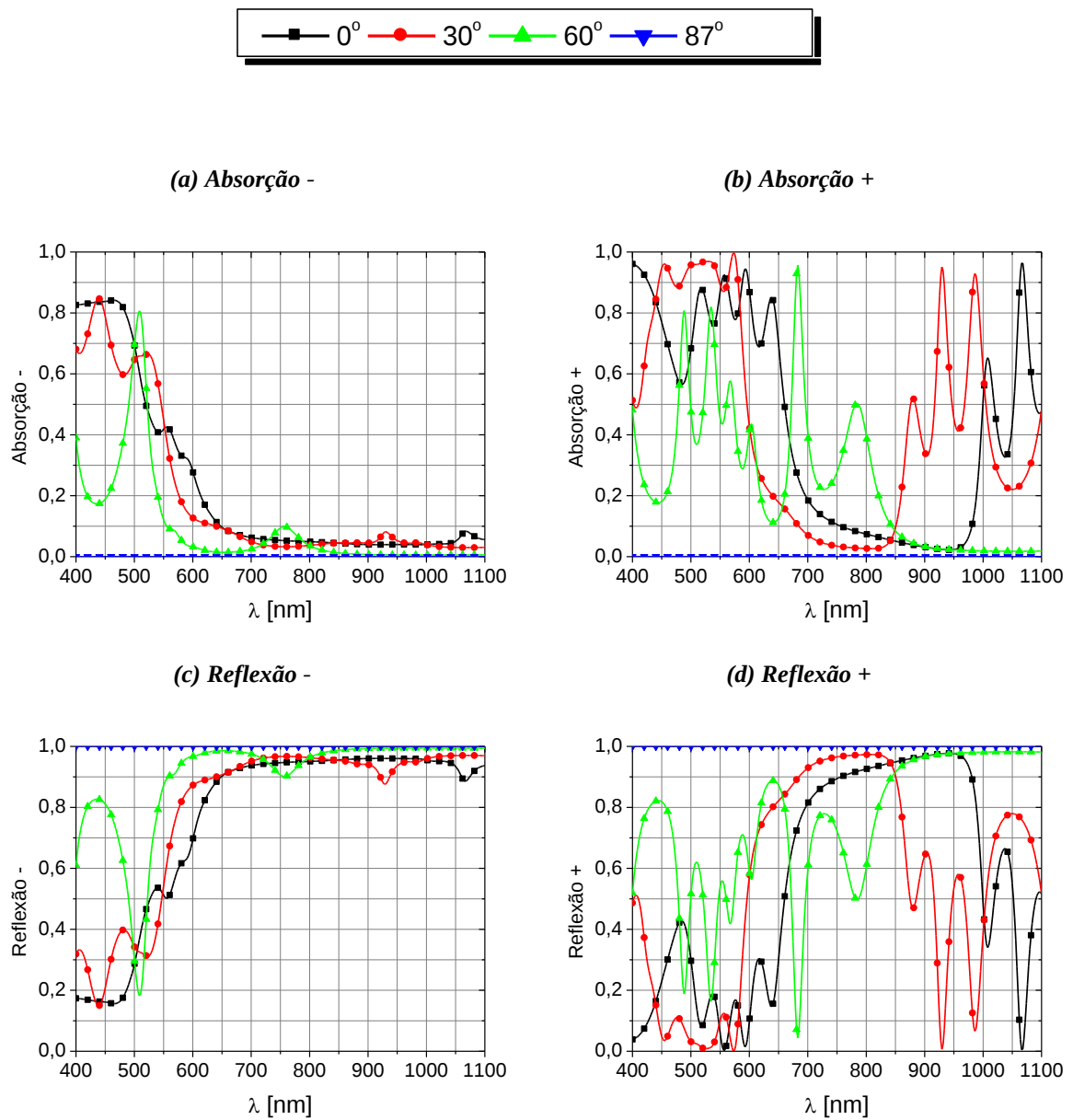


Figura 50: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

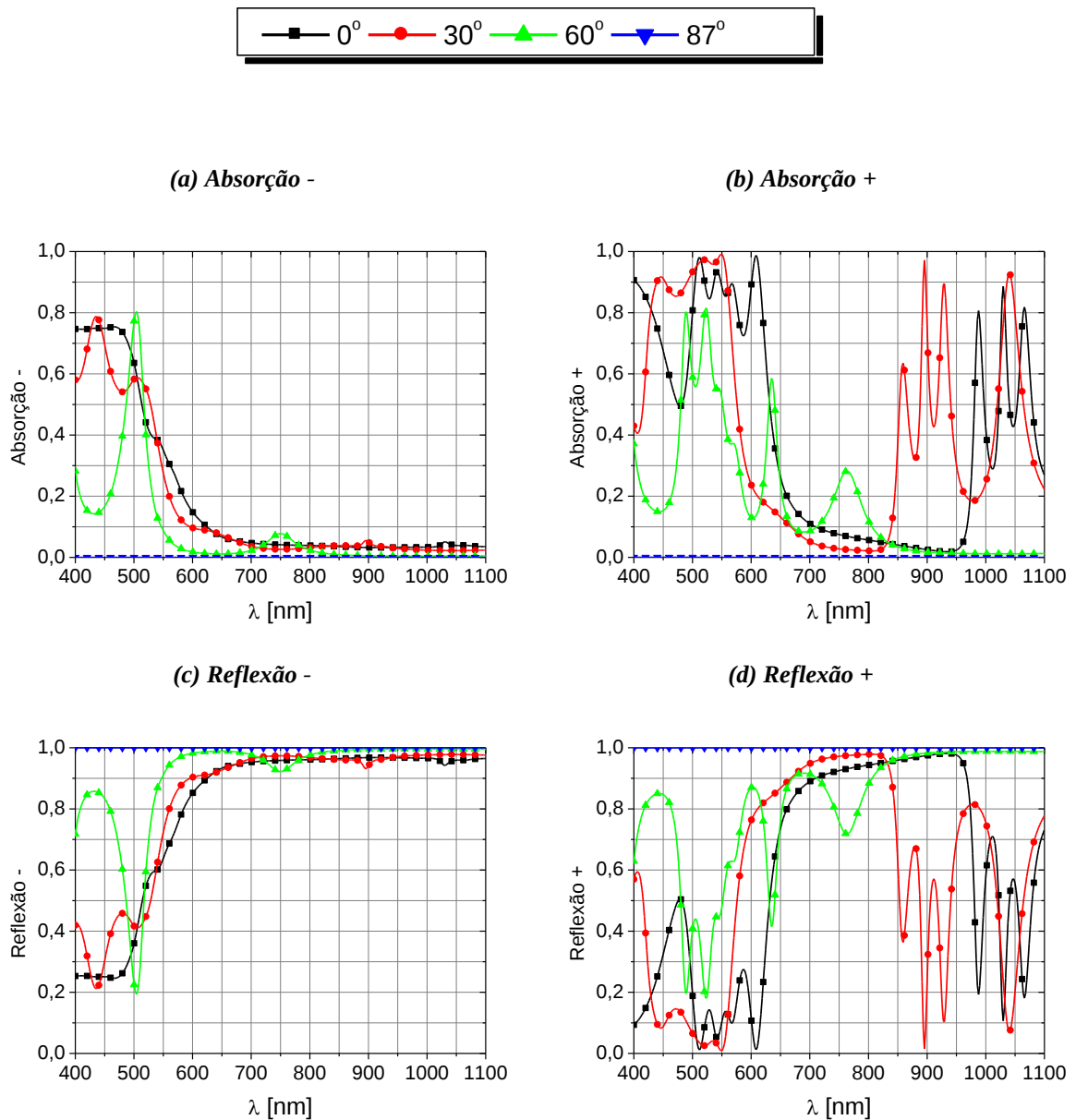


Figura 51: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 43 a 51 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Au-SiO₂). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.25 a 0.75 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência foi variado de 0° a 87° , tornando possível o uso da estrutura como um absorvedor ou refletor seletivo, usando quando necessário um determinado ângulo de incidência na estrutura. A estrutura mantém o comportamento assimétrico, com transmitância irrelevante na maioria dos casos. O comportamento de

absorvedor e refletor é observado por diversos comprimentos de onda, satisfazendo os resultados esperados da simulação.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 43, onde a maior parcela da estrutura é de dielétrico, o desempenho de absorvedor é exposto em alguns comprimentos de onda. A resposta de absorção na Figura 43 (a) apresenta maiores picos de incidência nos comprimentos de onda iniciais da região do visível entre 450 nm e 550 nm para o ângulo de incidência de 0° , 30° e 60° , após isso não foram apresentados resultados relevantes de absorção. Para a propagação para direita na Figura (b) foram observadas maiores oscilações com diversos picos ao longo da propagação, dos 400 nm aos 500 nm onde os ângulos de incidência de 0° e 30° mostraram-se mais eficazes com frações de potência acima de 95 % e se analisado o intervalo de 600 nm a 700 nm o ângulo de 60° também apresenta um pico de absorção acima de 95 %. A assimetria na absorção da estrutura se mostra aparente em torno dos 700 aos 1100 nm, onde na propagação para esquerda a fração de potência não ultrapassa os 20% e na propagação para direita são atingidos picos acima de 80 % em variados comprimentos de onda e variações angular. Em 43 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 aos 550 nm não apresentam resultados muito relevantes onde a fração de potência refletida não chega a 80 %, no entanto, a partir dos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Para a propagação para esquerda o ângulo de 60° atinge a fração de potência acima de 95 % nos intervalos de 600 a 700 nm e 850 nm a 1100 nm, já na propagação para direita similar a da esquerda o intervalo se encontra entre 950 nm e 1100 nm, possibilitando o uso da estrutura como espelho.

Ainda com $L=200$, mas com metade do preenchimento de metal e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 43 (b), 44 (b) possui mais picos de absorção e maiores frações de potência, onde é possível obter absorvedores com frações acima de 95 % nos ângulos de 30° para os 450 nm e 750 nm e na incidência de 0° para o intervalo de 400 a 500 nm e em 850 nm. A absorção para esquerda 44 (a) em contrapartida possui resultados com menores frações quando comparado a 43 (a), mas que não devem ser descartados. A reflexão em ambos os sentidos de propagação mantém resultados similares ao preenchimento anterior, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 95 % a partir dos 900 nm independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita (d) possui entre 600 e 700 nm os maiores picos para as incidências de 0° e 60° com frações acima de 92% e entre 900 nm e 1100 nm valores acima de 98% para os 60° . Na configuração com maior parcela de metal, 15nm de Au e 5 nm de SiO_2 , Figura 45, a propagação para direita obteve picos de absorção em variados

comprimentos de onda. Ao analisar os intervalos de 750 nm - 800 nm e 900 nm - 950 nm, os ângulos de 30° e 0° respectivamente apresentam um comportamento de absorvedor quase perfeito com frações acima de 98 %. O resultado da absorção para a esquerda apresentou comportamento semelhante com as configurações anteriores para essa estrutura, sendo possível notar o comportamento assimétrico, pois neste caso em questão a partir dos 700 nm a absorção não ultrapassa 10 % contrastando com o a propagação para direita. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantêm o comportamento com respostas similares aos apresentados para $L=200$.

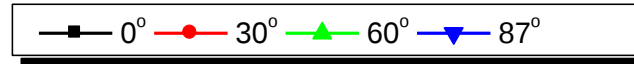
Para $L=250$, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de metal de 0.25 na Figura 46 não demonstraram alterações relevantes quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ em 43. Em 46 (b) os ângulos de 60° e 30° tiveram picos de fração de potência acima de 93% no intervalo de 700 - 750 nm e em 1000 nm respectivamente, ainda analisando a absorção, mas com a propagação para esquerda, as frações de potência não ultrapassaram 92 % na faixa do visível e 20% na faixa do infravermelho. Para a reflexão em ambos os sentidos de propagação, 46 (c) e (d) os ângulos de 0° , 30° e 60° trouxeram pontos com frações de potência acima de 95 %, como no ângulo de 30° em 700 nm na reflexão para direita e o intervalo de 900 nm a 1100 nm na reflexão para esquerda. Para a incidência de 60° no preenchimento de 0.5 ainda em $L=250$, Figura 47, as respostas de propagação de absorção e reflexão mesmo similares aos de $L=200$ mostram leves aumentos de frações de potência, com absorção em 47 (b) acima de 99% nos ângulos de 0° e 30° e reflexão em 47 (d) acima de 95 % entre 600 nm e 1100 nm para também os ângulos de 0° , 30° , e 60° . O mesmo ocorre para $L=250$ preenchimento de 0.75, Figura 48, resultados semelhantes comparados a $L=200$ (Figura 45), mas com um leve aumento de fração de potência.

Para $L=300$, das imagens 49 a 51, em geral as simulações não resultaram em um aumento das respostas em comparação a $L=250$, ocorreram mudanças nos picos com ângulos e comprimentos de onda diferentes, a assimetria continuou aparente na estrutura quando alterado o sentido de propagação o que permite que o material seja variado a depender da necessidade de utilização como comprimento de onda necessário e o ângulo incidido na estrutura.

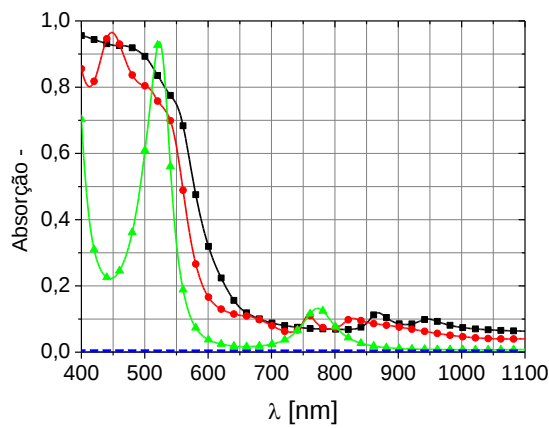
- Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂, separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 30 nm (tabela 3). Modo de incidência TM, variação angular de 0° a 87° .

Tabela 3: Fator de preenchimento de 0.25 a 0.75 de um total de 30 nm.

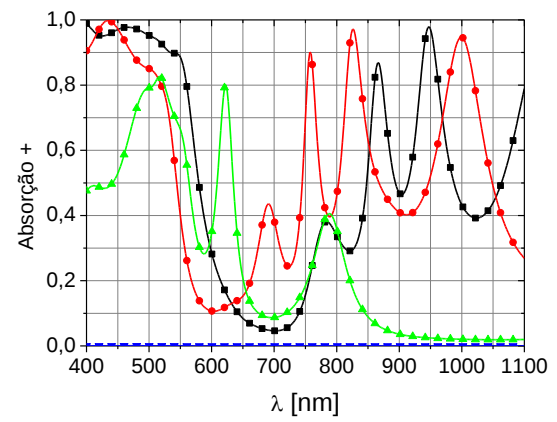
PREENCHIMENTO	PARCELA METAL (nm)	PARCELA DIELÉTRICO (nm)
0.25	7.5	12.5
0.50	15	15
0.75	12.5	7.5



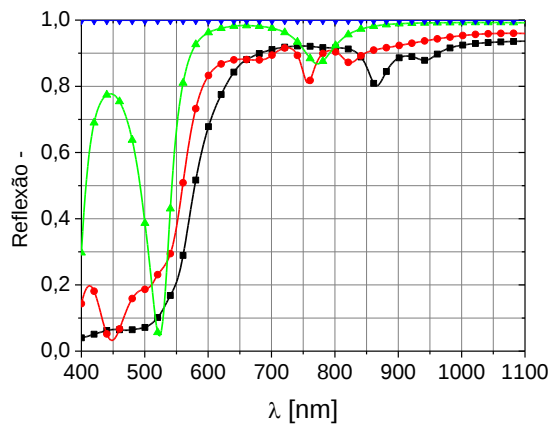
(a) Absorção -



(b) Absorção +



(c) Reflexão -



(d) Reflexão +

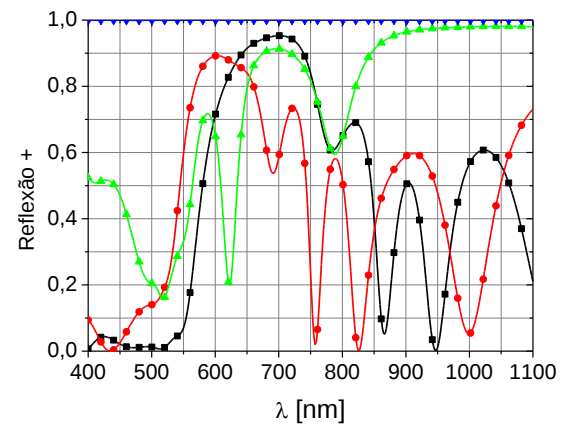


Figura 52: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

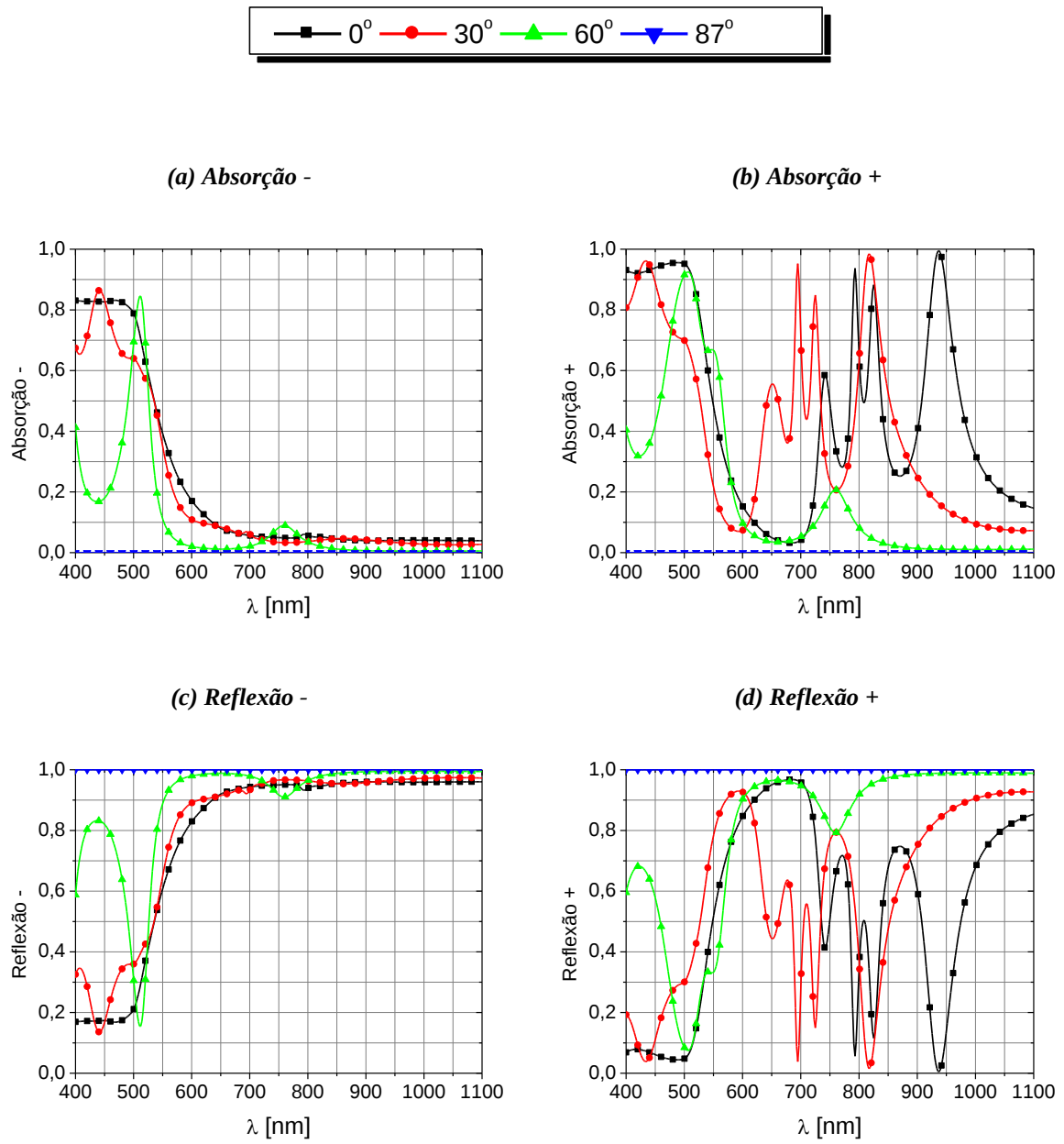


Figura 53: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

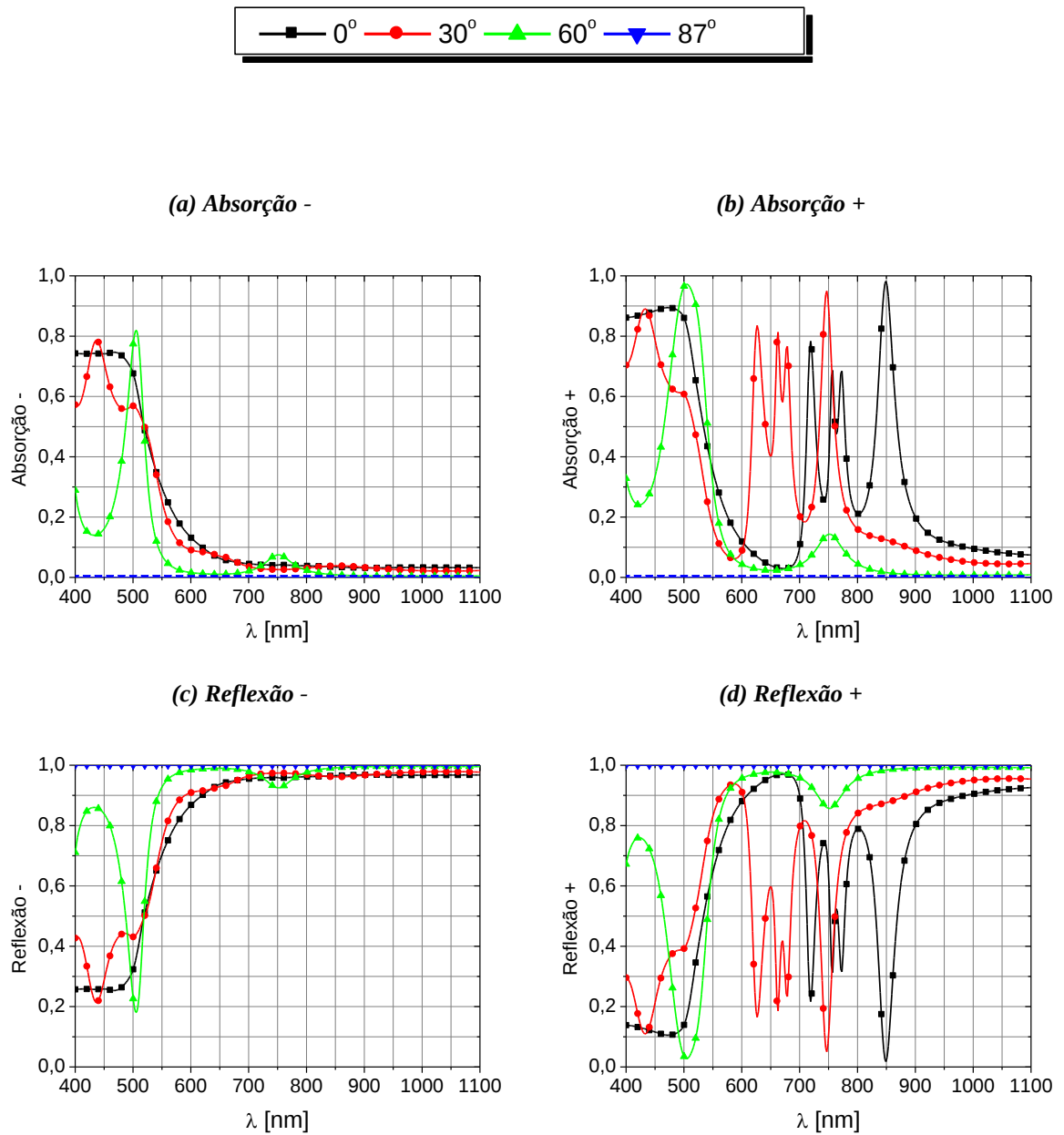


Figura 54: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

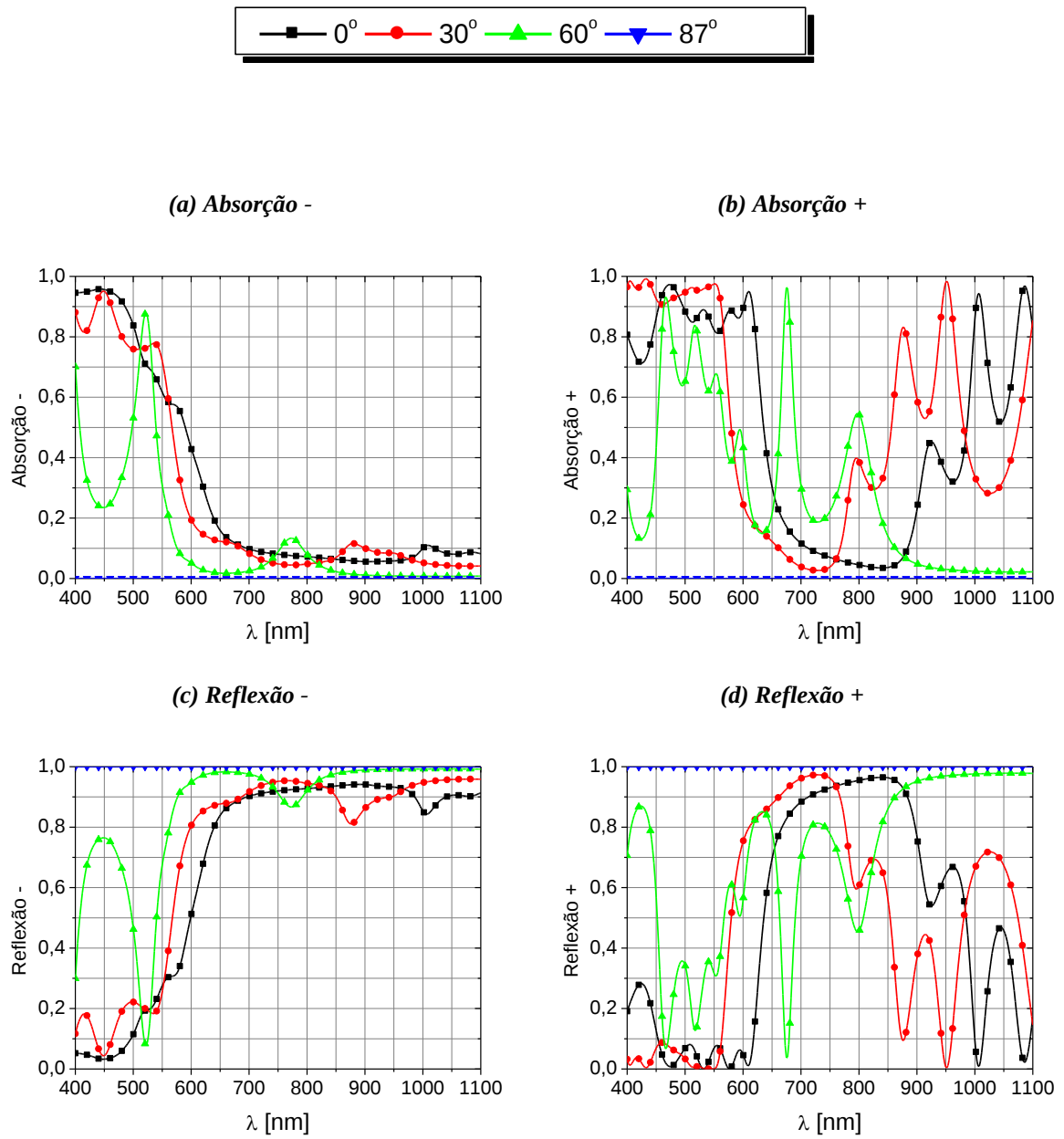


Figura 55: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

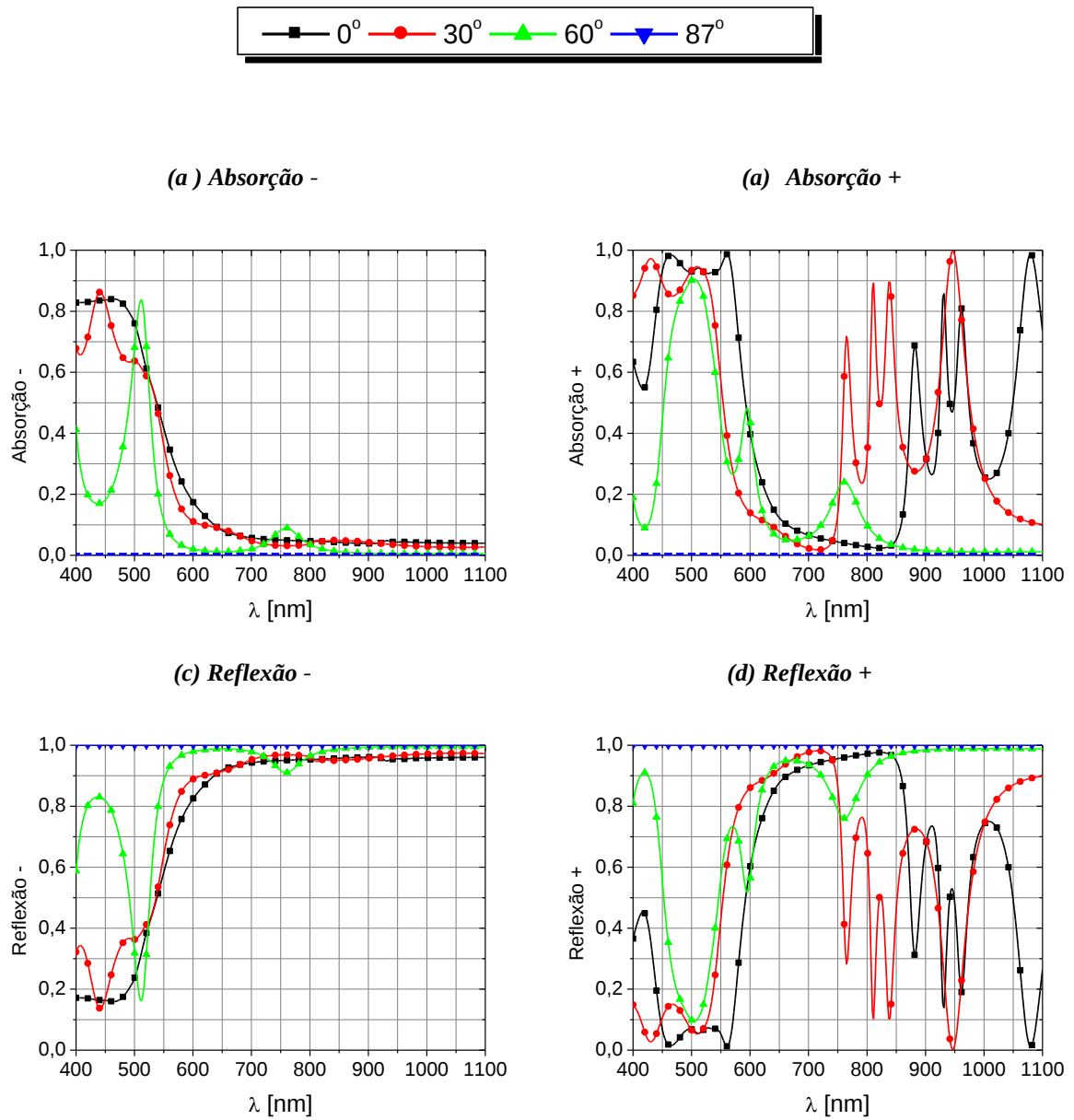


Figura 56: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d = 30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

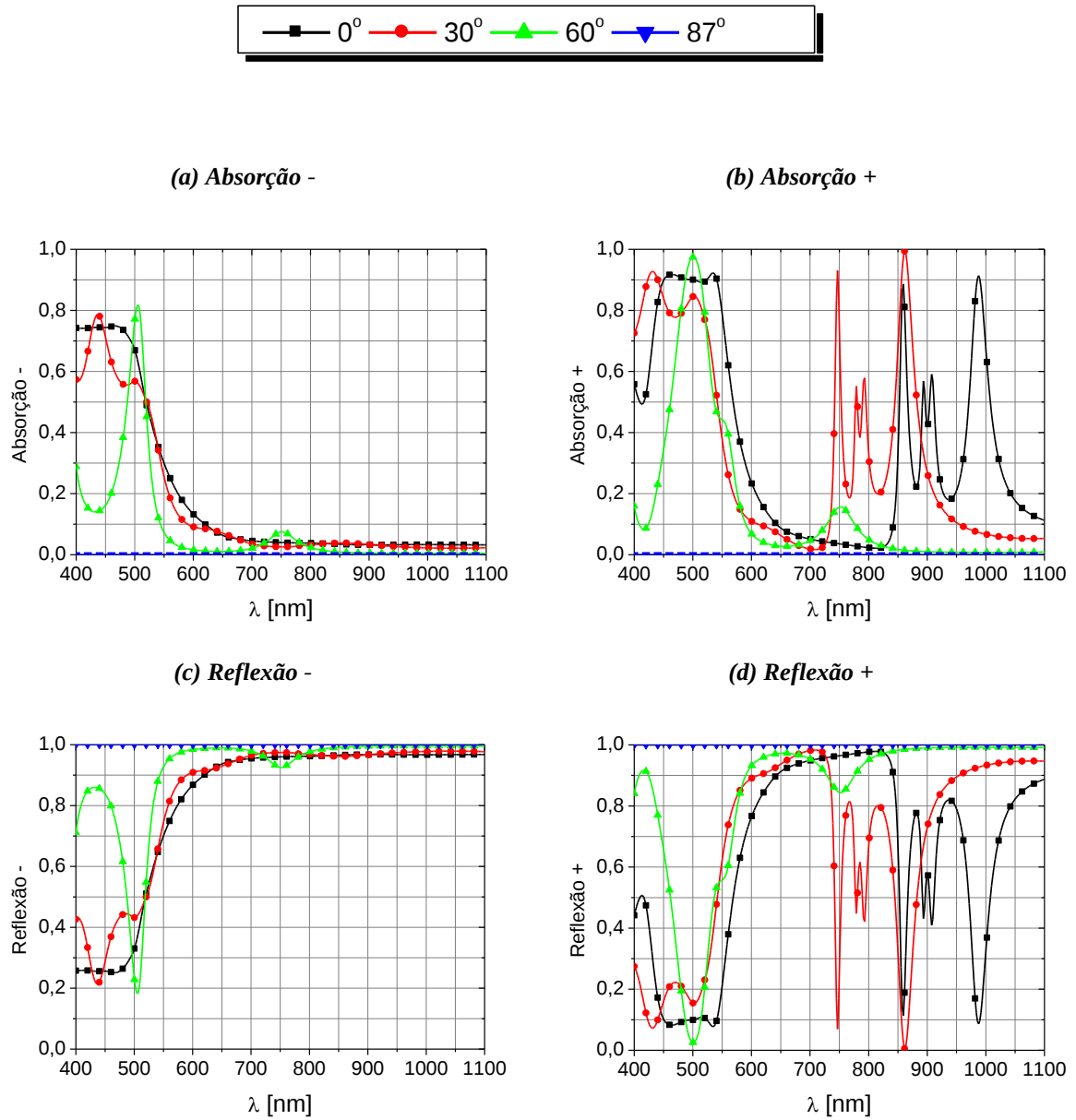


Figura 57: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

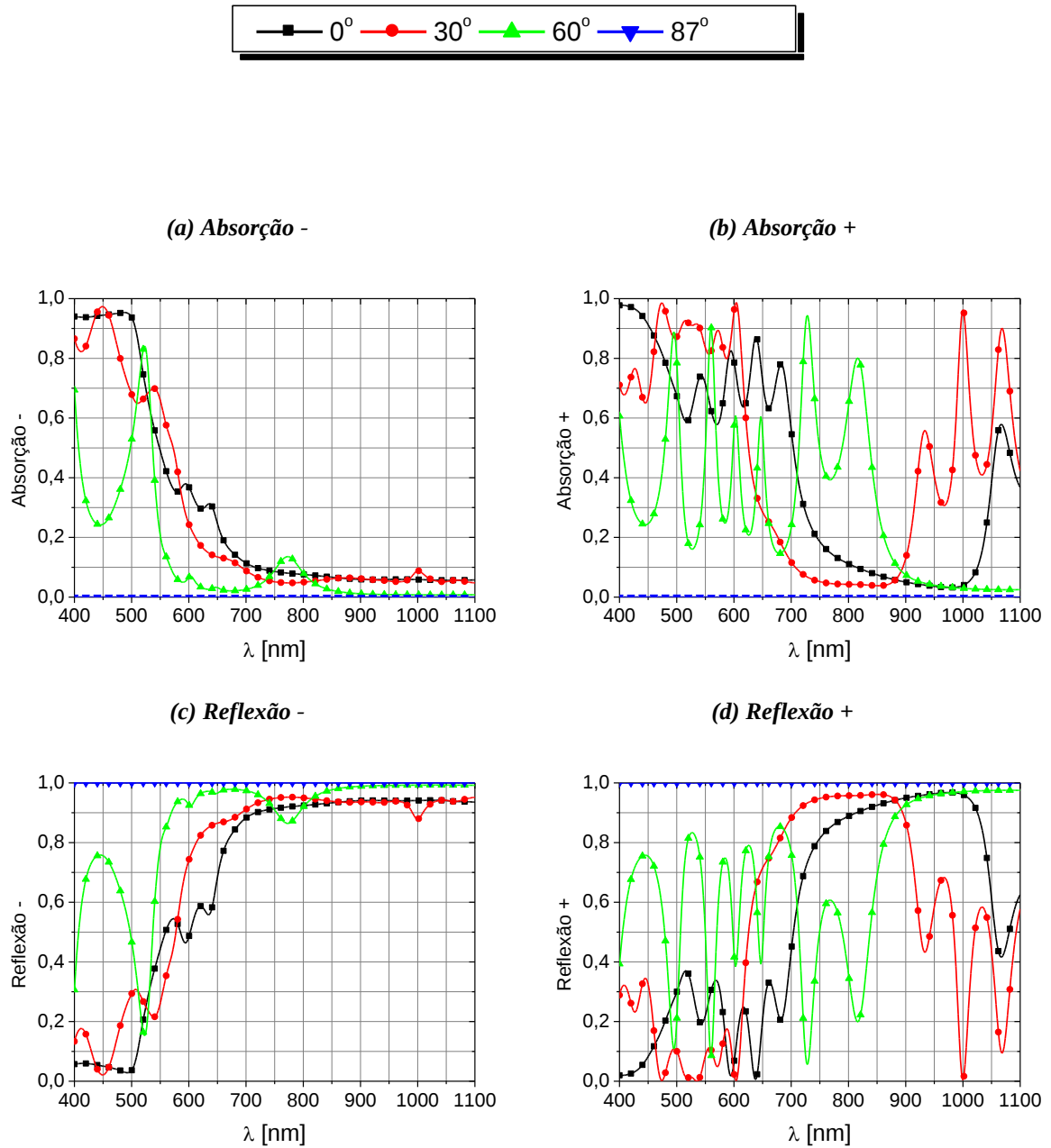


Figura 58: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

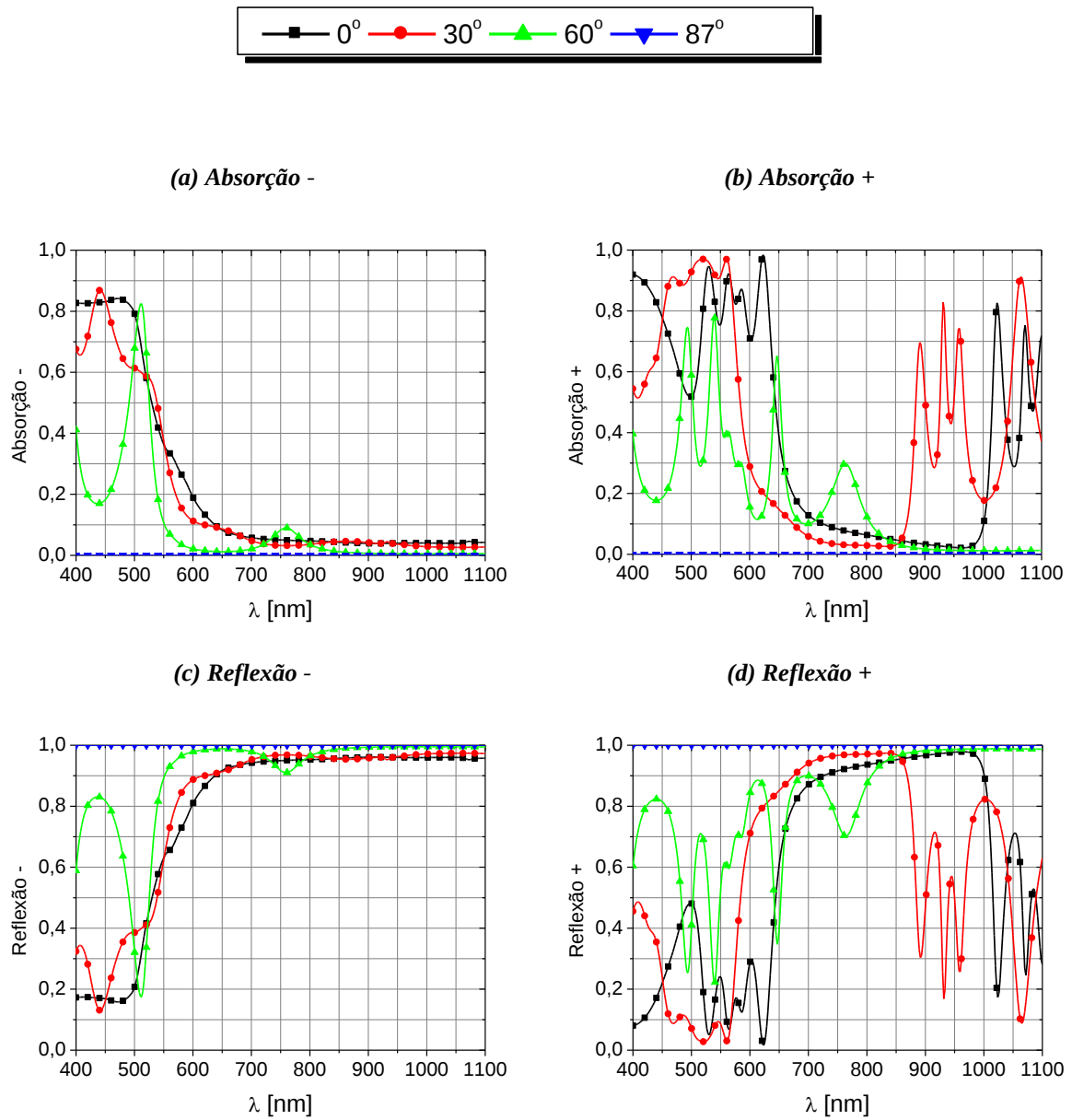


Figura 59: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

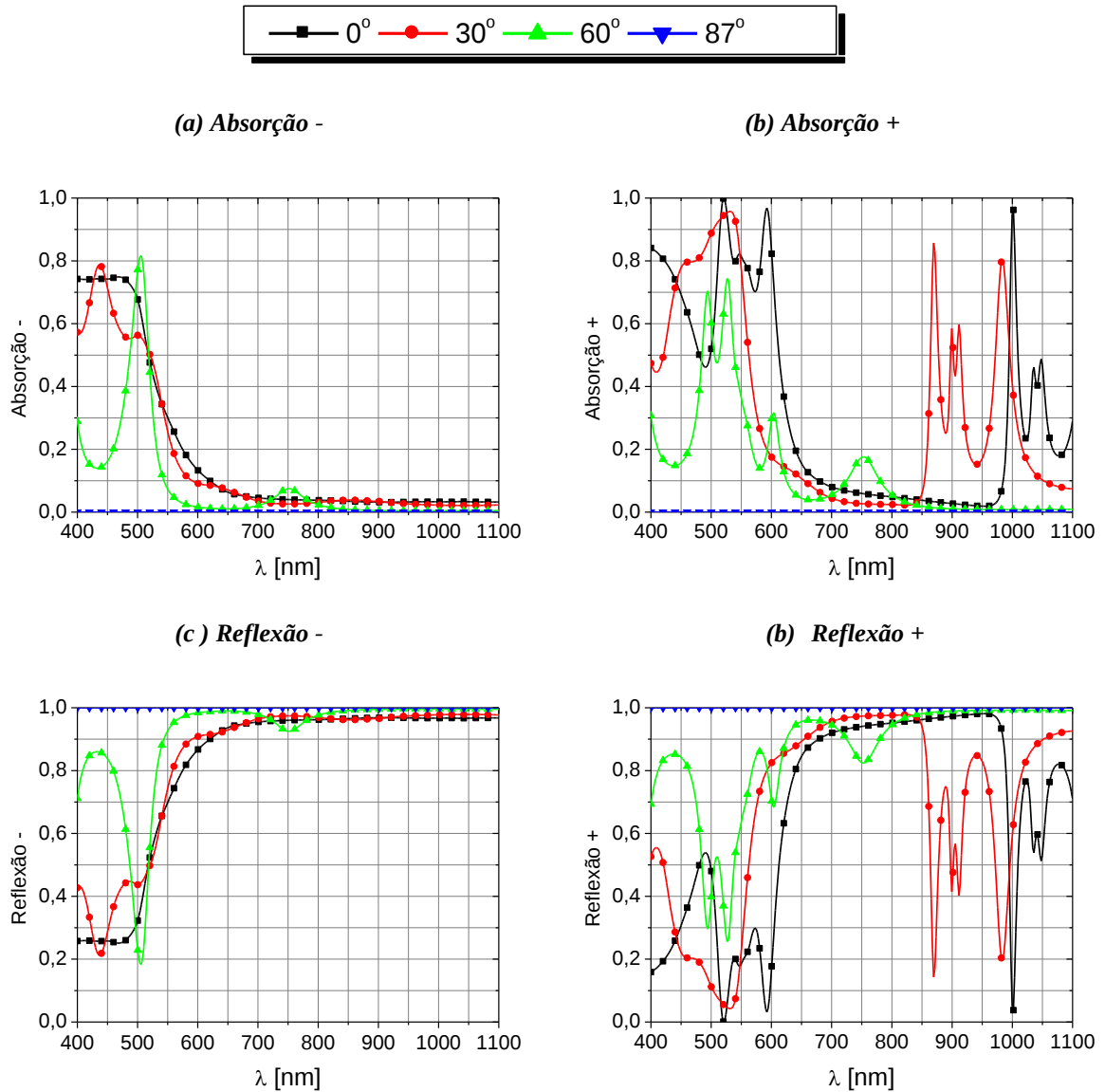


Figura 60: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au- SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.

As Figuras 52 a 60 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Au-SiO₂). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.25 a 0.75, mas agora em uma espessura de 30 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência continuou sendo variado de 0° a 87°, mantendo possível o uso da estrutura como um absorvedor ou refletor seletivo, usando quando necessário um determinado ângulo de incidência na estrutura. A estrutura mantém o comportamento assimétrico, com transmitância irrelevante na maioria dos casos. O comportamento de absorvedor e refletor é observado por diversos comprimentos de onda, satisfazendo os resultados esperados da simulação.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 52, onde a maior parcela da estrutura é de dielétrico é exposto o desempenho de absorvedor em variados comprimentos de onda. A resposta de absorção na Figura 52 (a) apresenta maiores picos de incidência nos comprimentos de onda iniciais da região do visível acima de 90% entre 400 e 550 nm para todos os ângulos de incidência e fração abaixo de 20 % na faixa do infravermelho, similar à resposta para parcela total de 20 nm na Figura 43. Para a propagação para direita na Figura 52 (b) foram apresentadas maiores oscilações com diversos picos ao longo da propagação, em que os intervalos de 400 a 500 nm e 850 a 1000 nm apresentaram para os ângulos de incidência de 0° e 30° maiores eficiências com frações de potência até 98 %. A assimetria na absorção da estrutura continua se apresentando em torno dos 700 aos 1100 nm, onde na propagação para esquerda a fração de potência não ultrapassa os 17% e na propagação para direita são atingidos picos com absorvedores quase perfeitos em variados comprimentos de onda e variações angular. Em 52 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 aos 500 nm não apresentam resultados muito relevantes, a fração de potência refletida não chega a 80 %, já a partir dos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Para a propagação para esquerda todos os ângulos atingem a frações de potência acima de 90 % a partir dos 1000 nm e a propagação para direita se analisada em 700 nm nota-se que no ângulo de 0° a reflexão está acima de 93% e entre 900 e 1100 nm reflexão está acima de 97% para 60° .

Com metade do preenchimento de metal na estrutura do metamaterial e metade de dielétrico é observado que o comportamento assimétrico se mantém para os ângulos de 0° e 30° . A absorção para esquerda 53 (a) possui resultados com menores frações de potência, já 53 (b) mantém oscilações com picos acima de 98% entre 800 nm e 950 nm para 30° e 0° . A estrutura em ambos os sentidos de propagação mantém resultados de refletor, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 93 % a partir dos 800 nm independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita (d) entre 650 e 700 nm apresenta os maiores picos para as incidências de 0° e 60° com frações acima de 95%. Na configuração com maior parcela de metal (Figura 54), 22.5 nm de Au e 7.5 nm de SiO_2 , a propagação para direita obteve menores frações de absorção em comparação ao preenchimento anterior (53 (b)), onde os ângulos de 0° , 30° e 60° obtiveram alguns picos principalmente em 500 nm, 750 nm e 850 nm sendo absorvedores com frações de potência acima de 93%. O resultado da absorção para a esquerda apresentou comportamento semelhante com as configurações anteriores para essa estrutura, sendo possível notar o comportamento assimétrico, pois neste caso em questão a partir dos 700 nm a absorção não chega a 10 % contrastando com a propagação para direita

com picos de até 97 %. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantêm o comportamento com respostas similares aos apresentados para 53 (c) e (d), reflexão para esquerda acima de 94 % para todos os ângulos incididos a partir de 800 nm e reflexão para direita no intervalo de 650 e 700 nm acima de 95% para 0° e 60°.

Para $L=250$, aumentando a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de metal de 0.25 na Figura 55, demonstrou um aumento na absorção quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ em 52. Em 55 (a) os ângulos de 0° e 30° tiveram picos de fração de potência acima de 97% nos 450 nm. Em (b), percebe-se que a estrutura mantém a assimetria na faixa do infravermelho com picos alternados ao longo do comprimento de onda com absorções acima de 98 % como em 550 e 950 nm para a incidência de 30°. Para a reflexão em ambos os sentidos de propagação, 55 (c) e (d), os ângulos de 0°, 30 e 60° trouxeram pontos com frações de potência acima de 90 %, demonstrando que a estrutura pode ser utilizada como espelho em vários comprimentos de onda e ângulos de incidência.

No preenchimento de 0.5 ainda em $L=250$, Figura 56, as respostas de propagação de absorção e reflexão mesmo similares aos de $L=200$ mostram leves aumentos de frações de potência. A absorção em 56 (b) apresenta absorvedores quase perfeitos com absorção acima de 99% nos ângulos de 0° e 30°, já a reflexão em 56 (d) apresenta frações acima de 95 % entre 750 e 850 nm para a incidência de 0°, e acima de 98% em 30° entre 700 nm e 800 nm, demonstrando que essa mesma estrutura pode ser utilizada como espelho a depender do comprimento de onda, ângulo incidido e sentido de propagação. O preenchimento de 0.75 para $L=250$, Figura 57, apresenta respostas semelhantes comparados a $L=200$ (Figura 54), no entanto com um leve aumento de fração de potência.

Para $L=300$, das imagens 58 a 60, quando comparado a $L=250$ (Figuras 55 à 57), não notam-se muitas disparidades dos resultados, entretanto as variações nos picos e a depender do ângulo de incidência e comprimento de onda firma a ideia de poder ajustar a estrutura à necessidade de aplicação, ainda assim a assimetria permite que uma mesma estrutura apresente respostas diferentes de absorção e reflexão ampliando as aplicações do hiper cristal.

4.4.1.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO_2 -Au

Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO_2 -Au separadas pelo dielétrico SiO_2 , com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. O par de dielétrico metal variou de 0.25 a

0.75 com um total de 20 nm. O modo de incidência é o TM com variação angular de 0° a 87° .

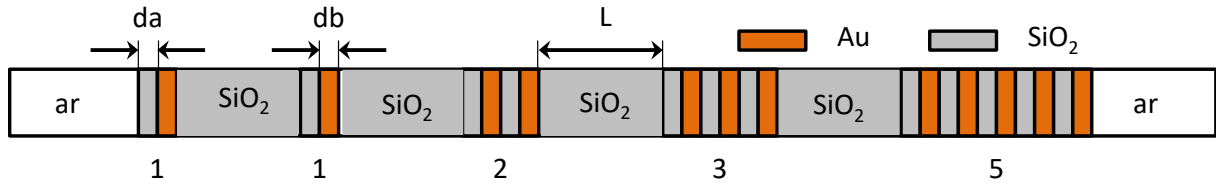


Figura 61: Hiper cristal multicamadas alternadas de SiO_2 -Au

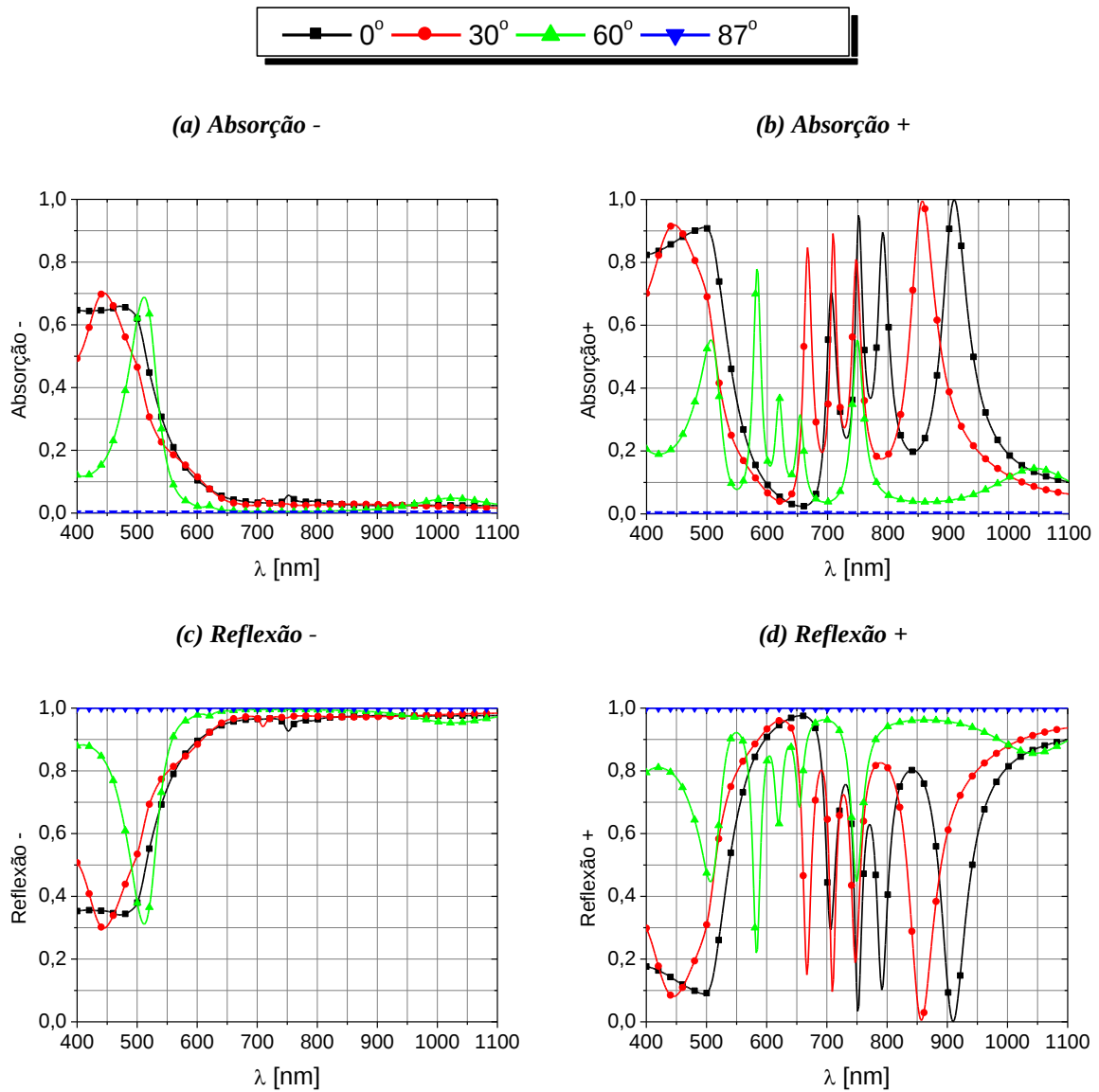


Figura 62: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

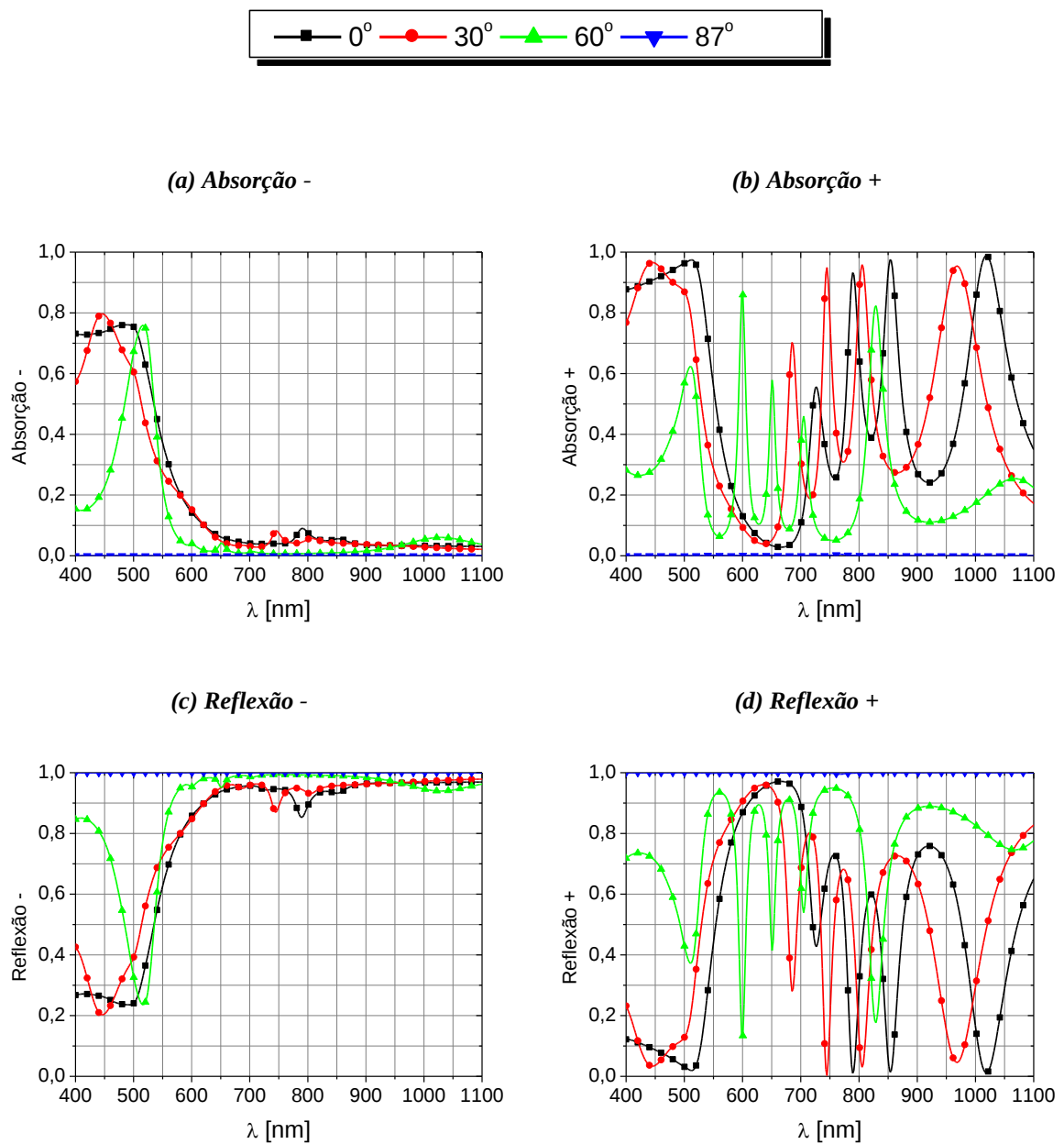


Figura 63: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

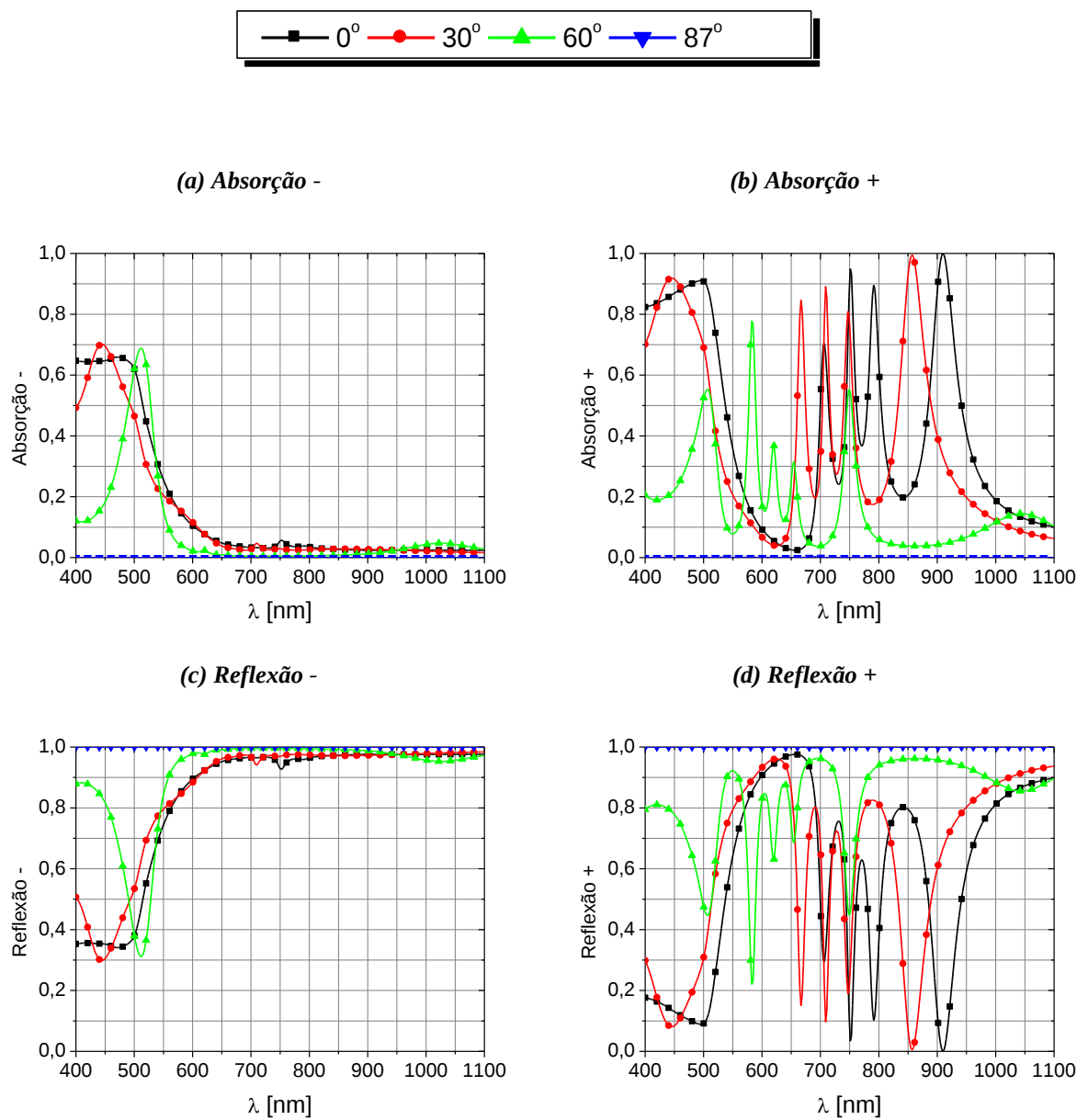


Figura 64: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

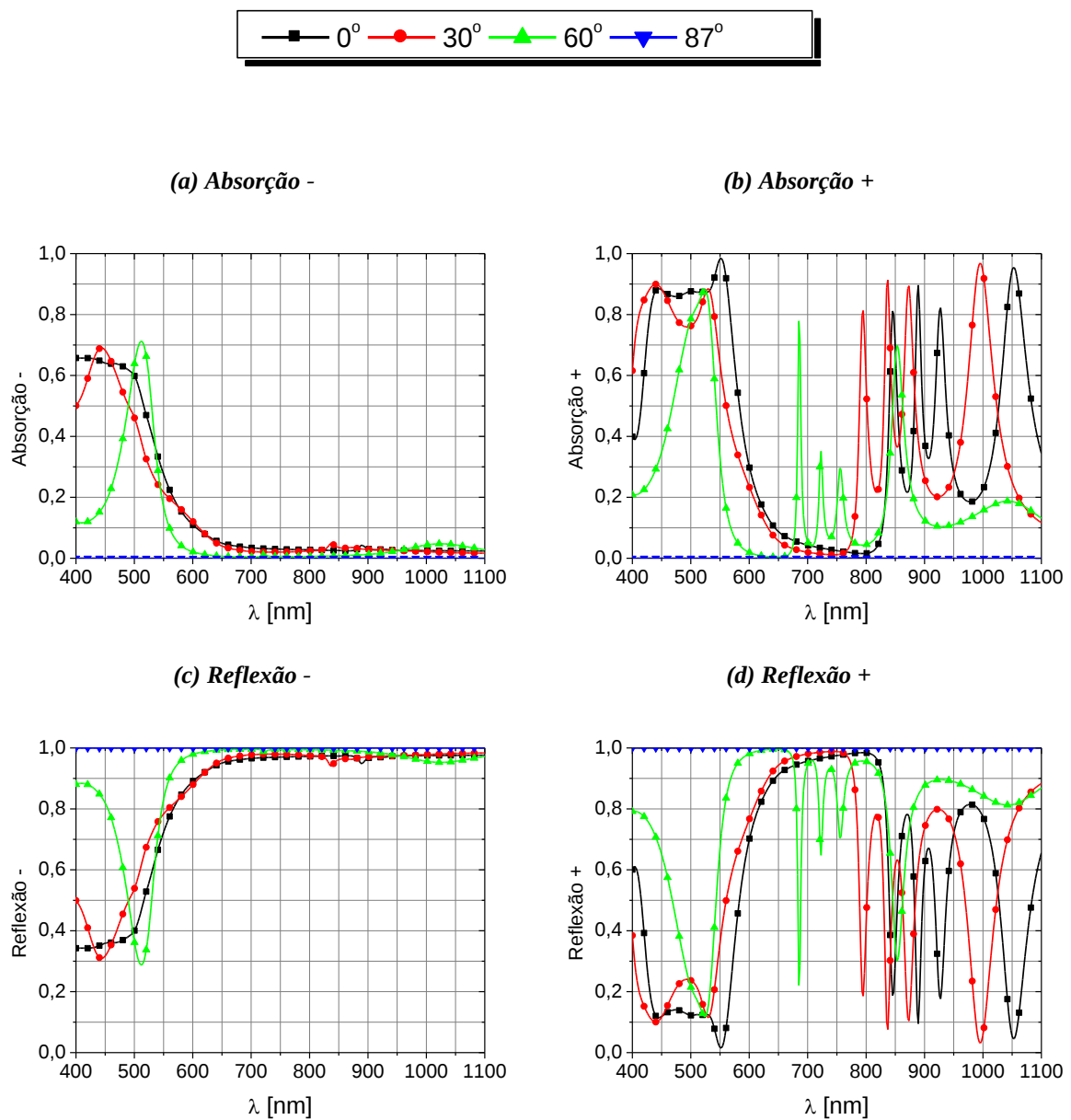


Figura 65: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico- metal de 0,25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

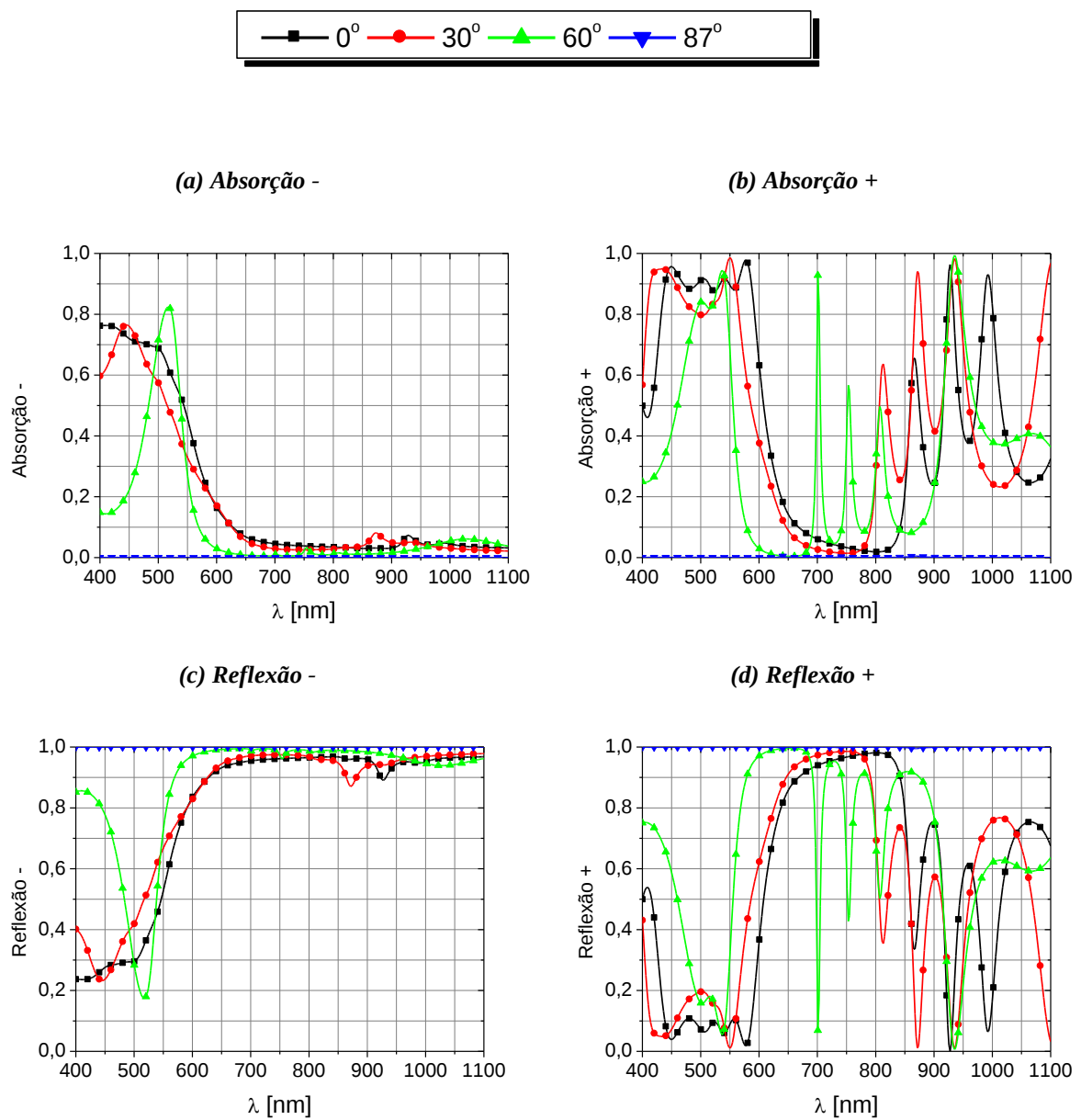


Figura 66: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

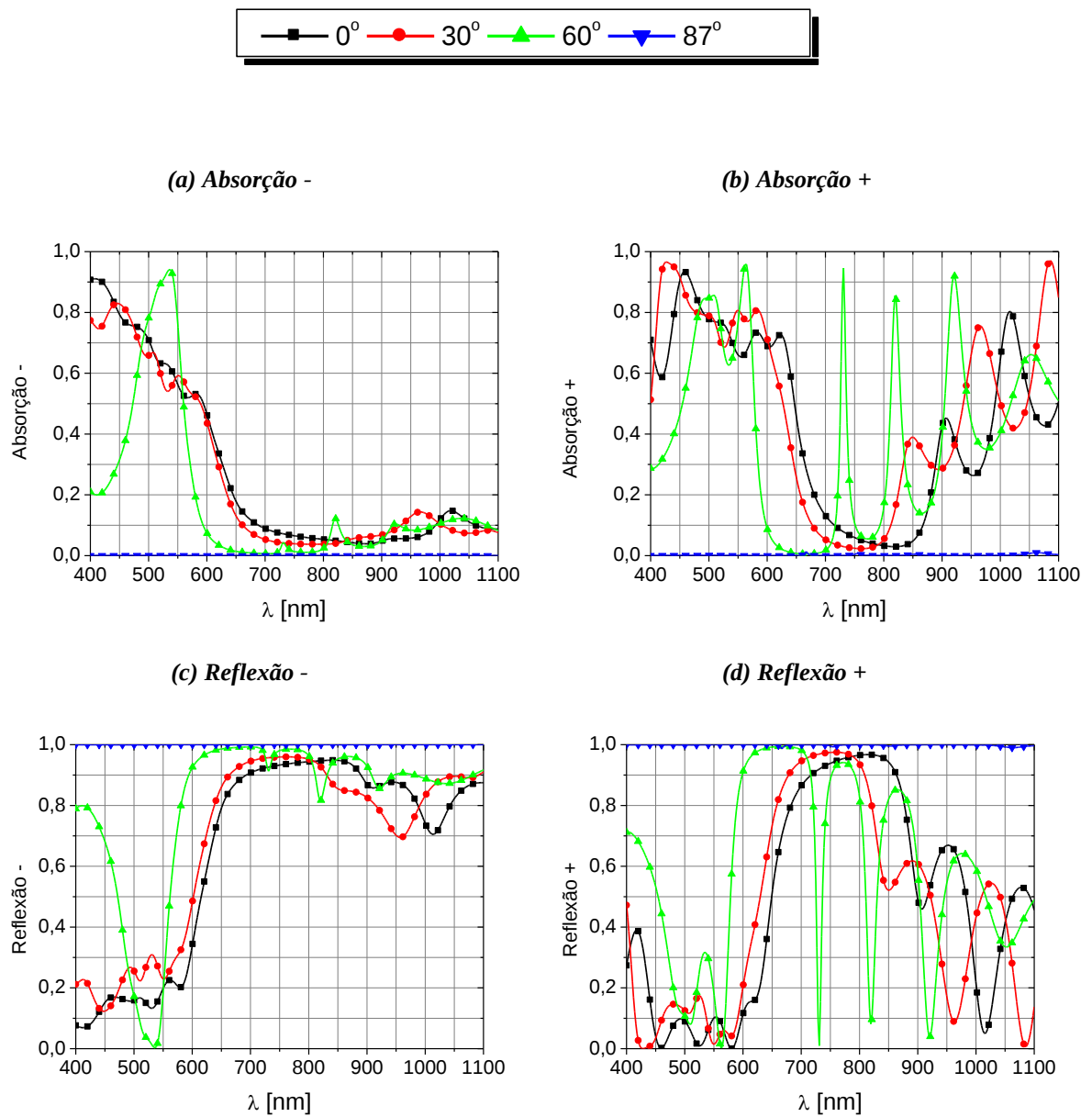


Figura 67: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

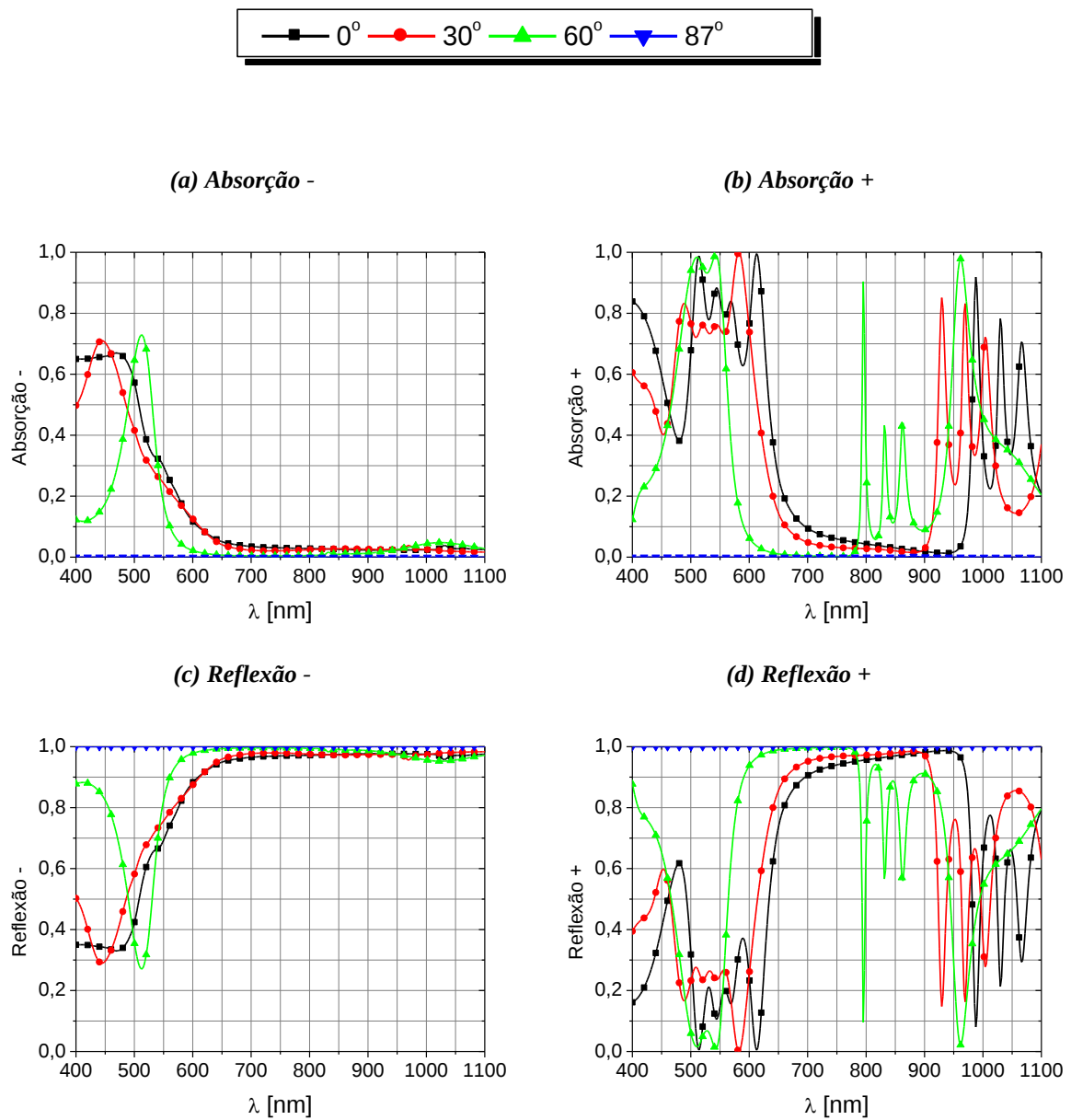


Figura 68: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

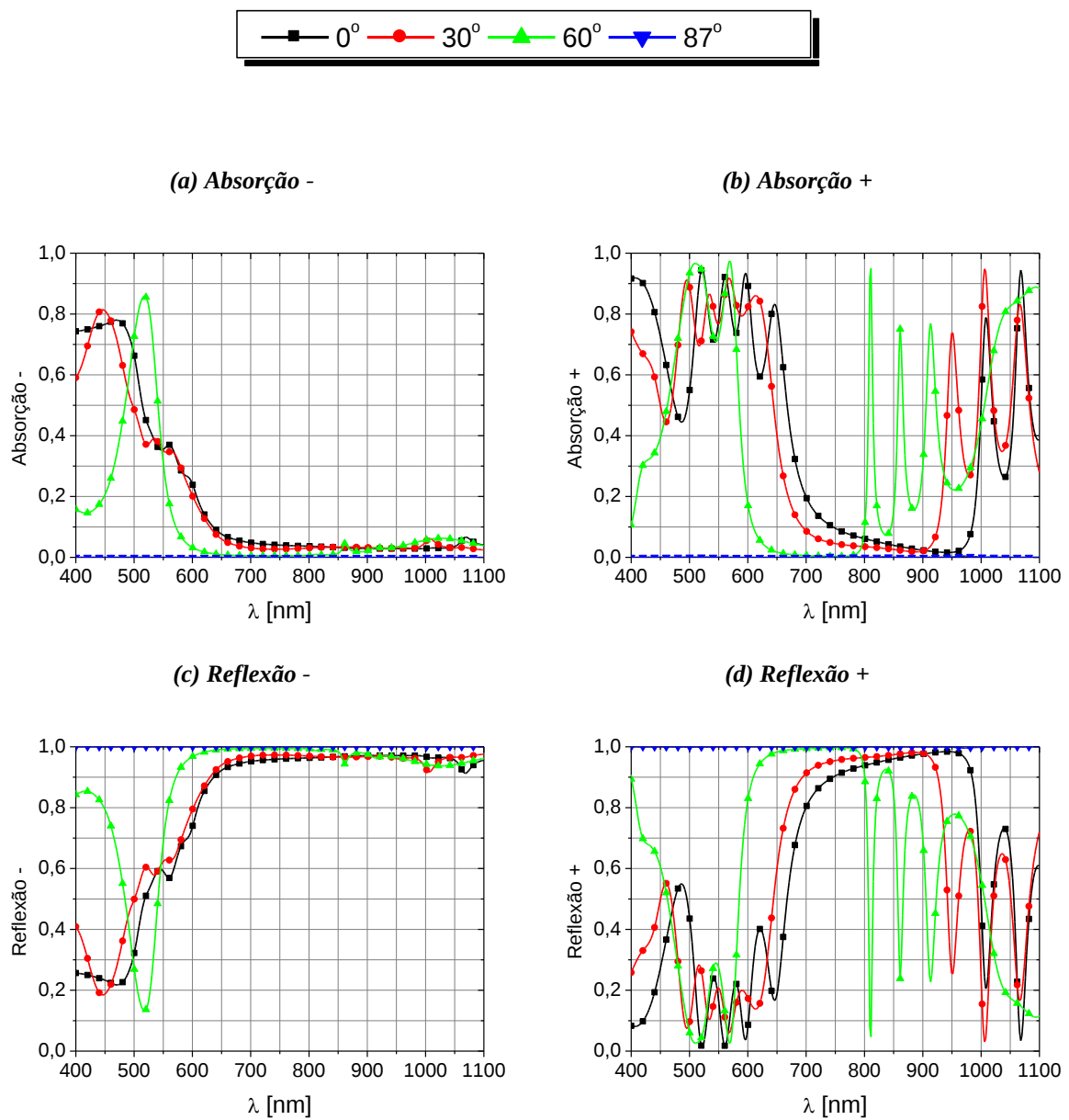


Figura 69: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

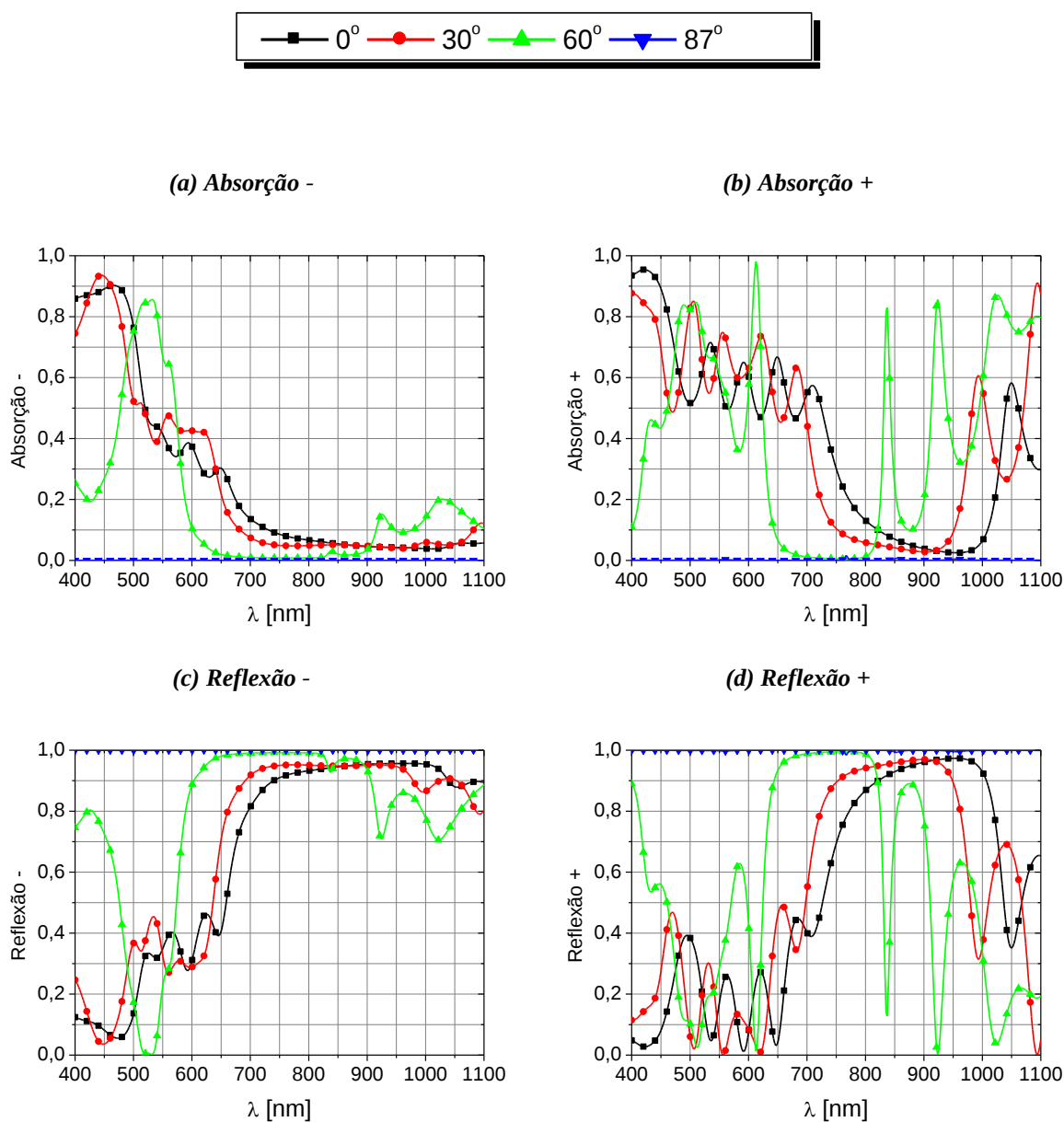


Figura 70: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°

As Figuras 62 a 70 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de dielétrico- metal (SiO_2 - Au). A fração de preenchimento do dielétrico - metal variou de 0.25 a 0.75 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 200

a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência foi variado de 0° a 87°, mantendo o possível uso da estrutura como absorvedor ou refletor seletivo.

Para os resultados de L=200 apresentados na Figura 62, onde a maior parcela da estrutura é de metal, o desempenho de absorvedor quase perfeito é observado em alguns comprimentos de onda. A resposta de absorção com propagação para esquerda não apresentou resultados relevantes, entre 400 e 600 nm a fração de potência não ultrapassou 70 % e foi reduzida para menos de 10 % nos comprimentos de onda posteriores. No entanto, a propagação para direita 62 (b) apresentou diversas oscilações ao longo do comprimento de onda analisado, onde os ângulos de 0° e 30 ° atingiram frações de potência acima de 98 % entre 850 e 950 nm. A assimetria na absorção pode ser observada por diversos pontos como os que demonstram absorções acima de 98 % e abaixo de 10 % a depender do sentido de propagação e ângulo incidido. Em 62 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 aos 550 nm não apresentam resultados acima de 81 % e a partir dos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Na propagação para esquerda todos os ângulos apresentam um comportamento acima de 93 % no intervalo de 800 nm a 1100 nm, já a propagação para direita obteve oscilações a depender do ângulo de incidência e comprimento de onda analisado, se fixado o intervalo de 600 a 650nm para os ângulos de 0° e 30 ° e os 700 nm para 60° é factível que a estrutura possa ser utilizada como espelho.

Ainda com L=200, mas com metade do preenchimento de metal e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 62 (b), 63 (b) possui maiores oscilações de pico de absorção, onde é possível obter absorvedores quase perfeitos em variados comprimentos de onda e ângulos de incidência, com valores acima de 98% na região do visível e no infravermelho. Na região do visível no intervalo de 400 e 500 nm, os ângulos de 0° e 30 ° chegam a 97% de absorção de luz na estrutura, na região do infravermelho foram analisados vários picos com um absorvedor quase perfeito entre 1000nm e 1050 nm para incidência de 0°. A absorção para esquerda 63 (a) mantém resultados semelhantes a 62 (a) com sua absorção máxima abaixo de 80% nos comprimentos de ondas da região do visível e abaixo de 10% na região do infravermelho. A reflexão nos dois sentidos de propagação mantém resultados similares ao preenchimento anterior, porém com valores um pouco abaixo em ambos os sentidos de propagação, na reflexão para esquerda, no intervalo de 900 nm a 1100 nm a reflexão está acima de 92 % independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita (d) possui novamente entre 600 e 700 nm os maiores picos para as incidências de 0° e 30° com frações acima de 95%. Na configuração com menor parcela de metal, 15nm de SiO₂ e 5 nm de

Au, Figura 64, a propagação para direita obteve no intervalo de 850 a 950 nm para os ângulos de 0° e 30° um comportamento de absorvedor quase perfeito, já a absorção para esquerda teve uma redução na fração de potência no intervalo de 400 a 550 nm.

Para $L=250$, aumentado a separação entre os intervalos de metamaterial, as respostas de propagação com fração de dielétrico de 0.25 na Figura 65, não demonstraram alterações relevantes quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ na Figura 62. Em 65 (a) a absorção não ultrapassou 70% até os 500 nm, onde a fração de potência começou a reduzir para menos de 10 % até os 1100 nm. A absorção com propagação para direita obteve picos acima de 96 % em 550 nm e no intervalo de 950 nm e 1050 nm para os ângulos de 0° e 30° frações acima de 94%. A propagação para esquerda em 65 (c) mostrou que a partir dos 650 nm a estrutura pode ser considerada um refletor quase perfeito para qualquer um dos ângulos de incidência verificado, com frações de potência acima de 95 %. A reflexão para direita, no entanto, possui uma variação nos ângulos podendo ser utilizada como refletor em alguns pontos específicos, no intervalo dos 600 aos 700nm o ângulo de 60° apresentam as melhores respostas de reflexão, já dos 700 aos 750 nm os ângulos de 0° e 30° possuem as maiores frações de potência.

O comportamento ocorre semelhante para $L=250$ com preenchimentos de 0.5 e 0.75, Figura 66 e 67 respectivamente, a absorção com propagação para a direita possui diversos picos em ambos os casos como em 66 (b), onde na faixa de 500 a 600 nm para os ângulos de 0° e 30° são obtidas absorções acima de 96 %. A absorção com propagação para a esquerda tem a melhor resposta em 67 (a), em que consegue alcançar a fração de 90 % no início da faixa do visível. A reflexão para direita em 66 (d) e 67 (d) apresentam comportamentos semelhantes com oscilações ao longo do comprimento de onda, em ambos os casos dos 700 aos 800 nm, os ângulos de 0° e 30° possuem fração de potência acima de 96%. A reflexão para esquerda em 66 (c) teve resultados mais constantes acima de 90 % no intervalo de 650 a 1100 nm em comparação ao apresentado em 67 (c).

Para $L=300$, das imagens 68 a 70, a estrutura manteve os mesmos comportamentos, mudanças nos picos com ângulos e comprimentos de onda diferentes e assimetria nos resultados, mantendo a possibilidade do uso em diversas aplicações que necessitem de absorção e reflexão em determinados casos.

- Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO_2 -Au, separadas pelo dielétrico SiO_2 , com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram

de 0.25 a 0.75 com um total de 30 nm. Modo de incidência TM, variação angular de 0° a 87° .

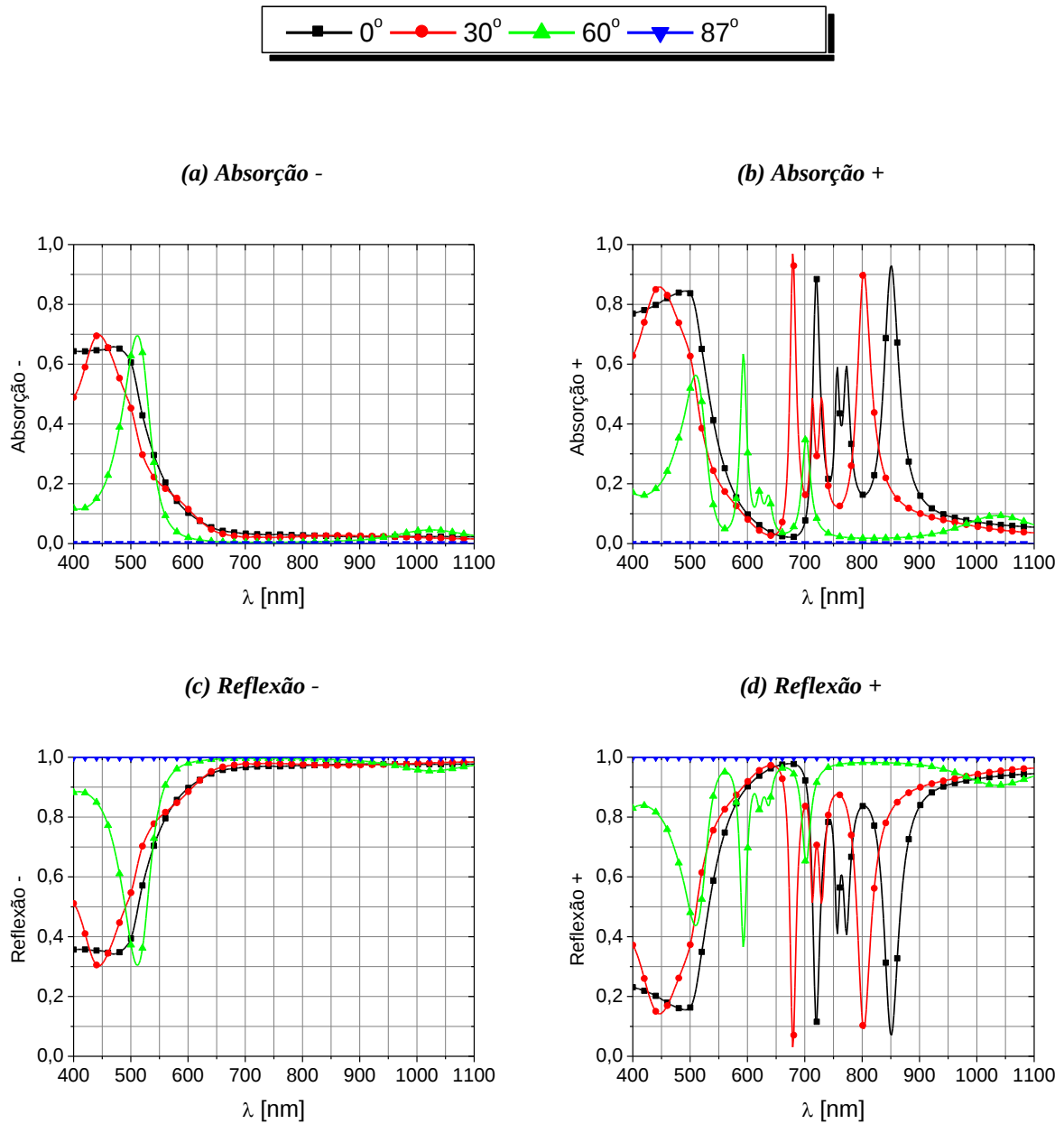


Figura 71: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

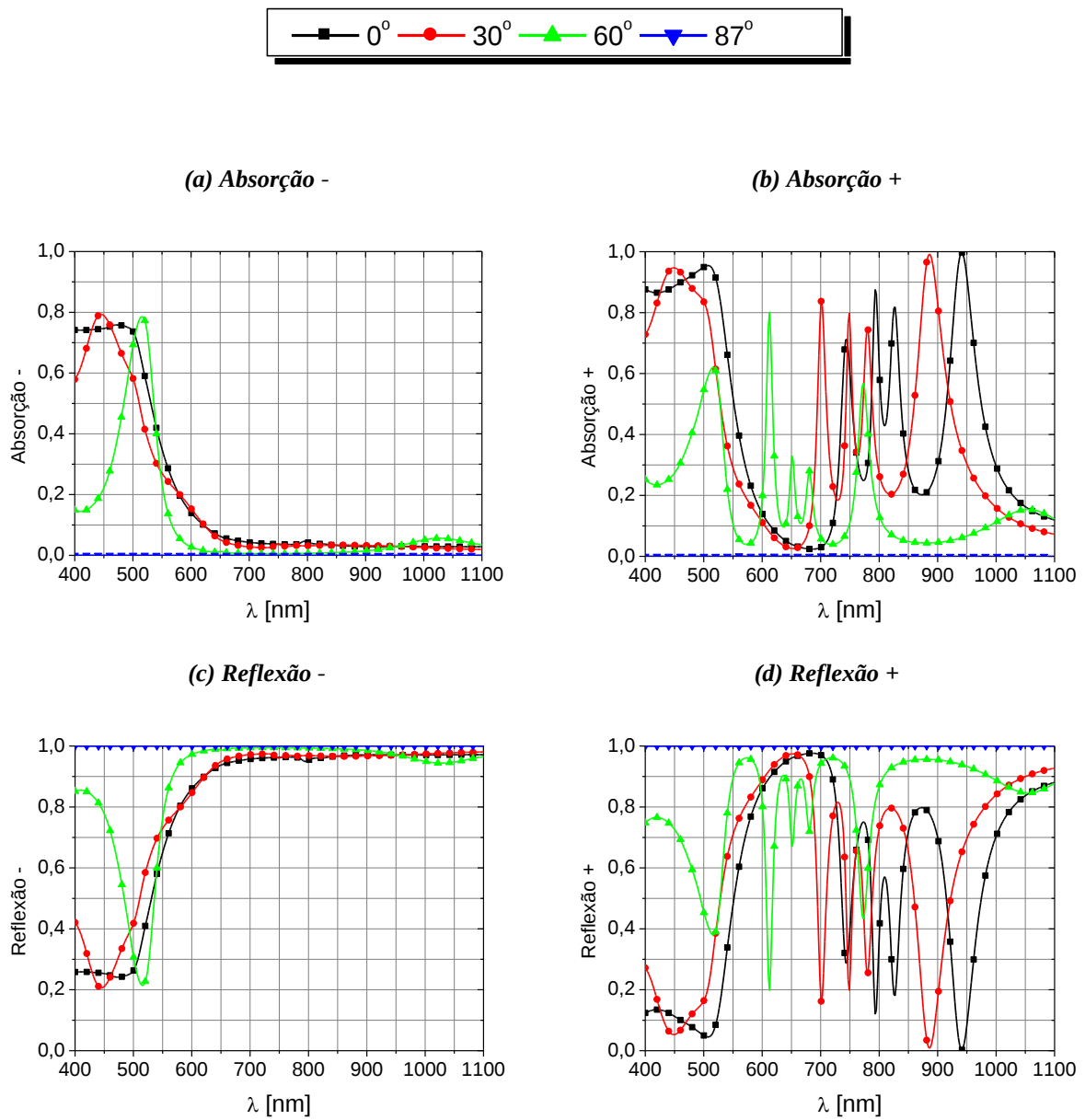


Figura 72: Propagação no metamaterial de Fibonacci de Fibonacci SiO_2 . Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

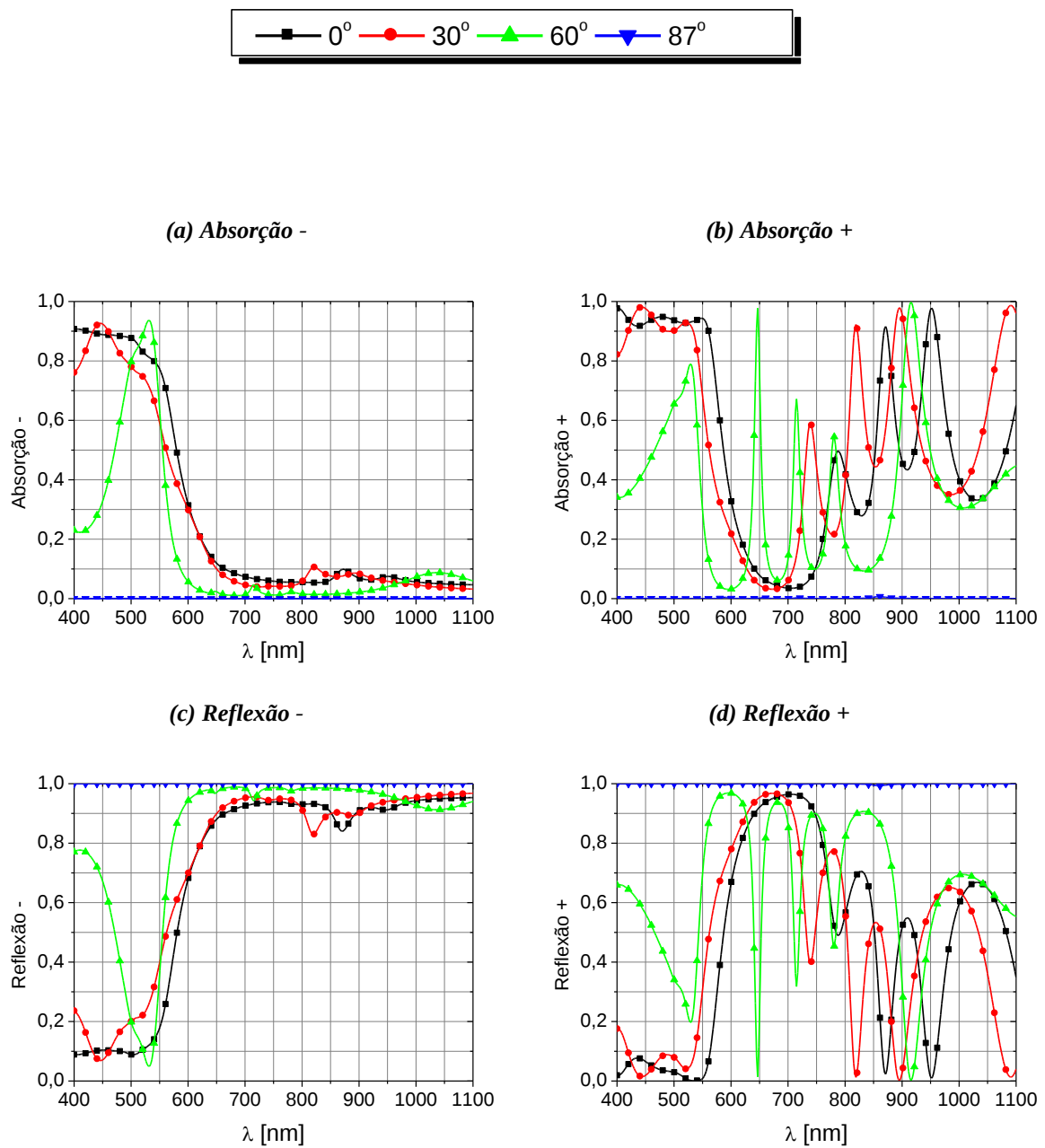


Figura 73: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

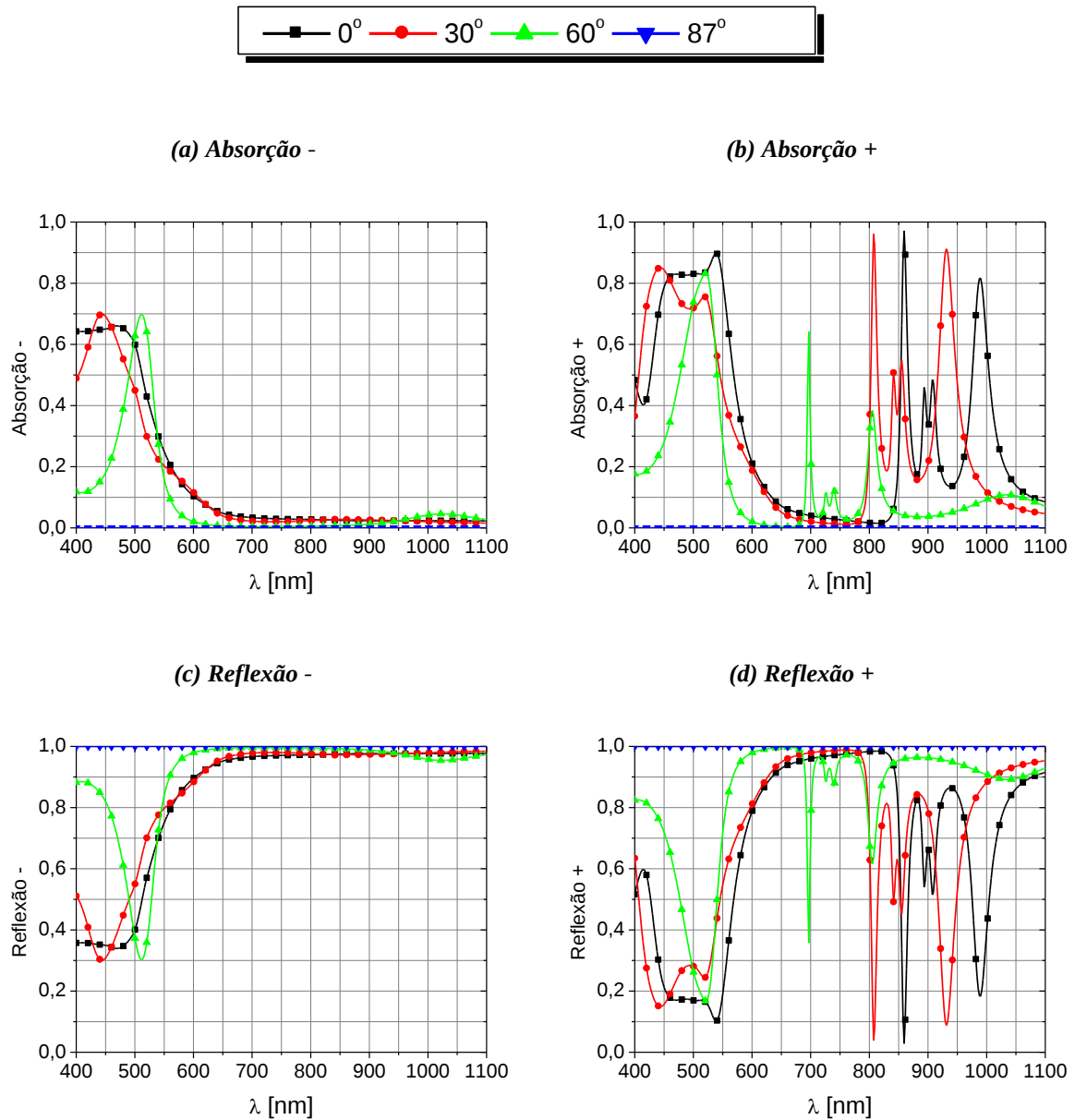


Figura 74: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

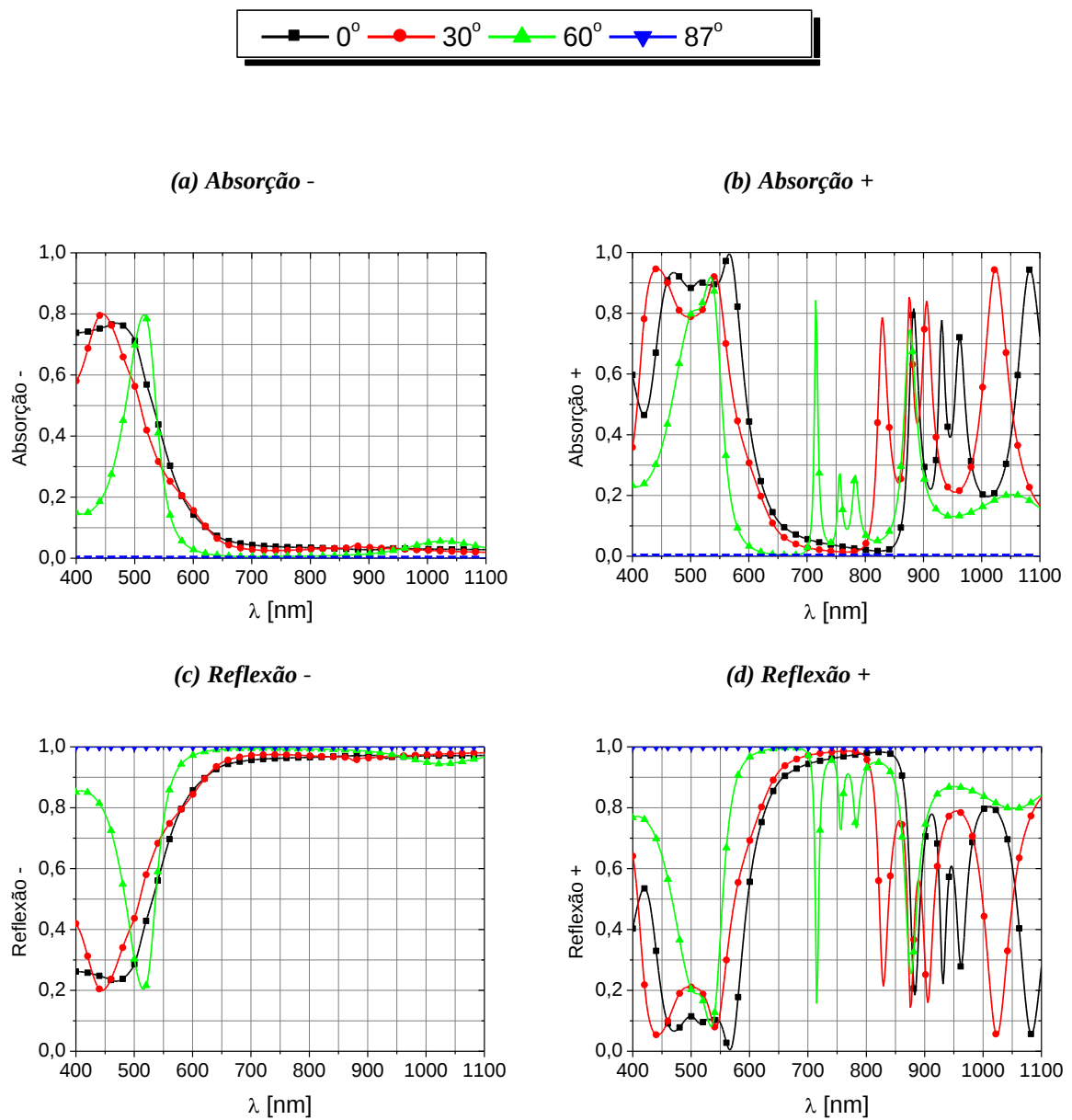


Figura 75: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

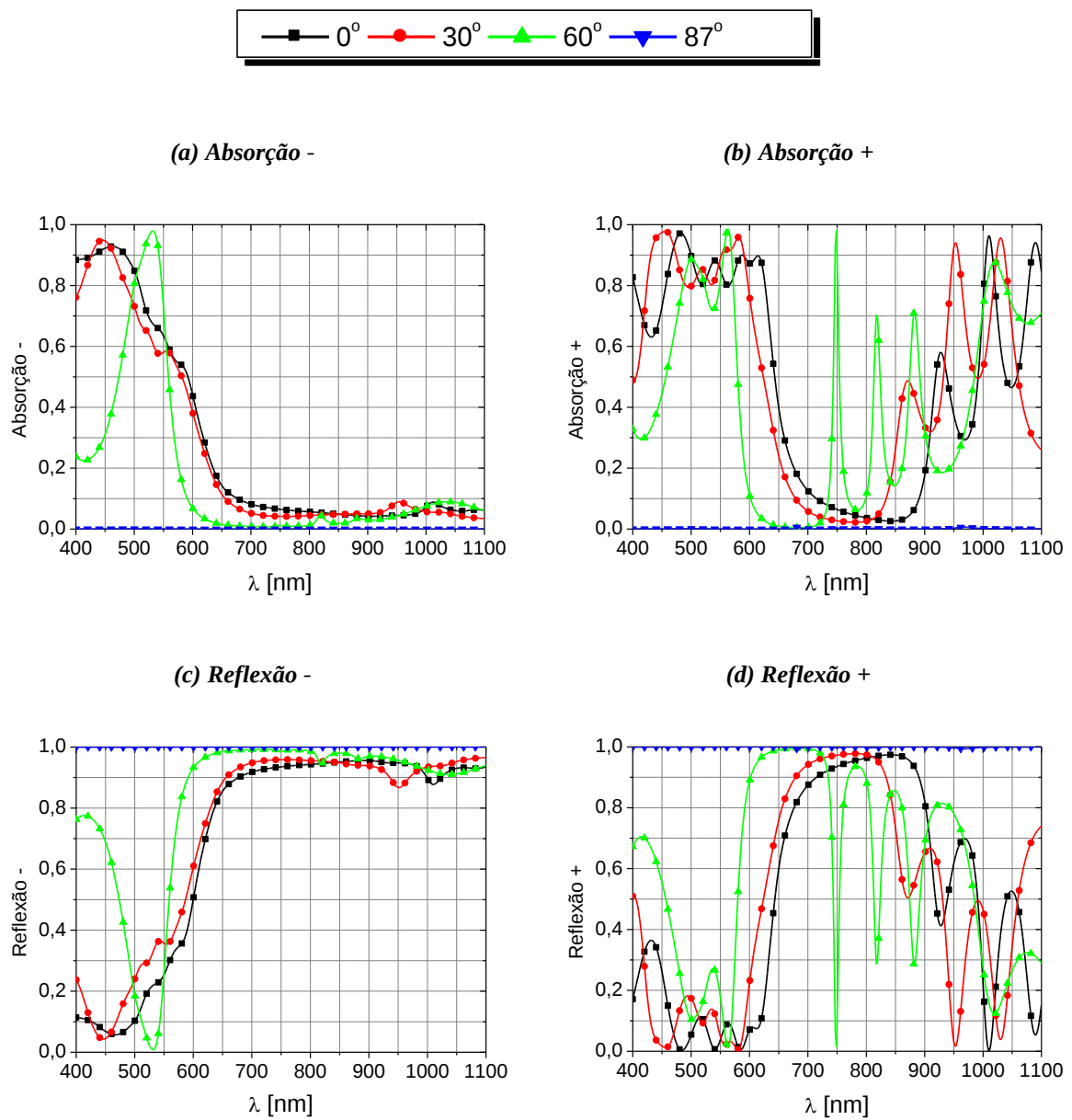


Figura 76: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

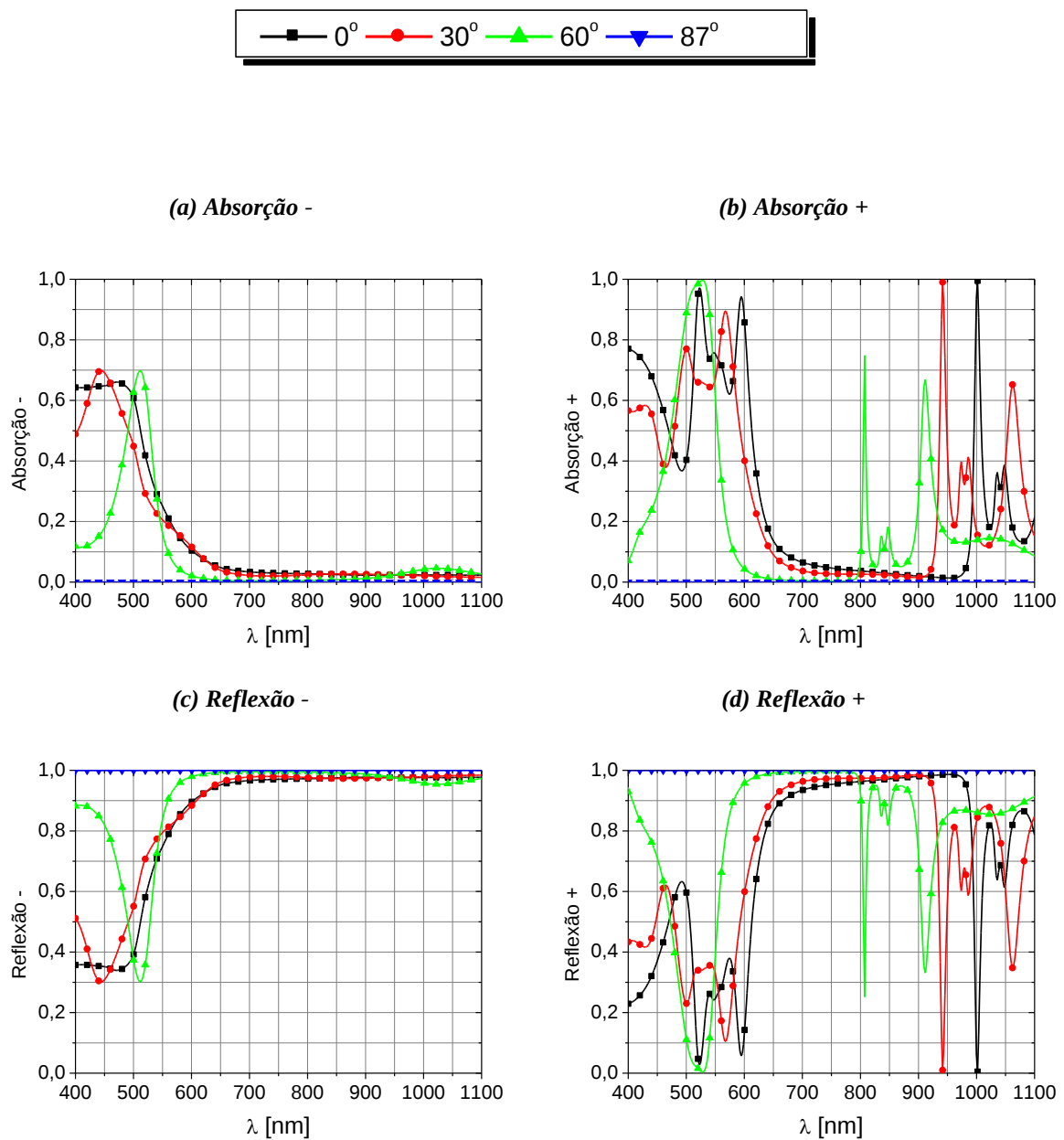


Figura 77: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0,25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

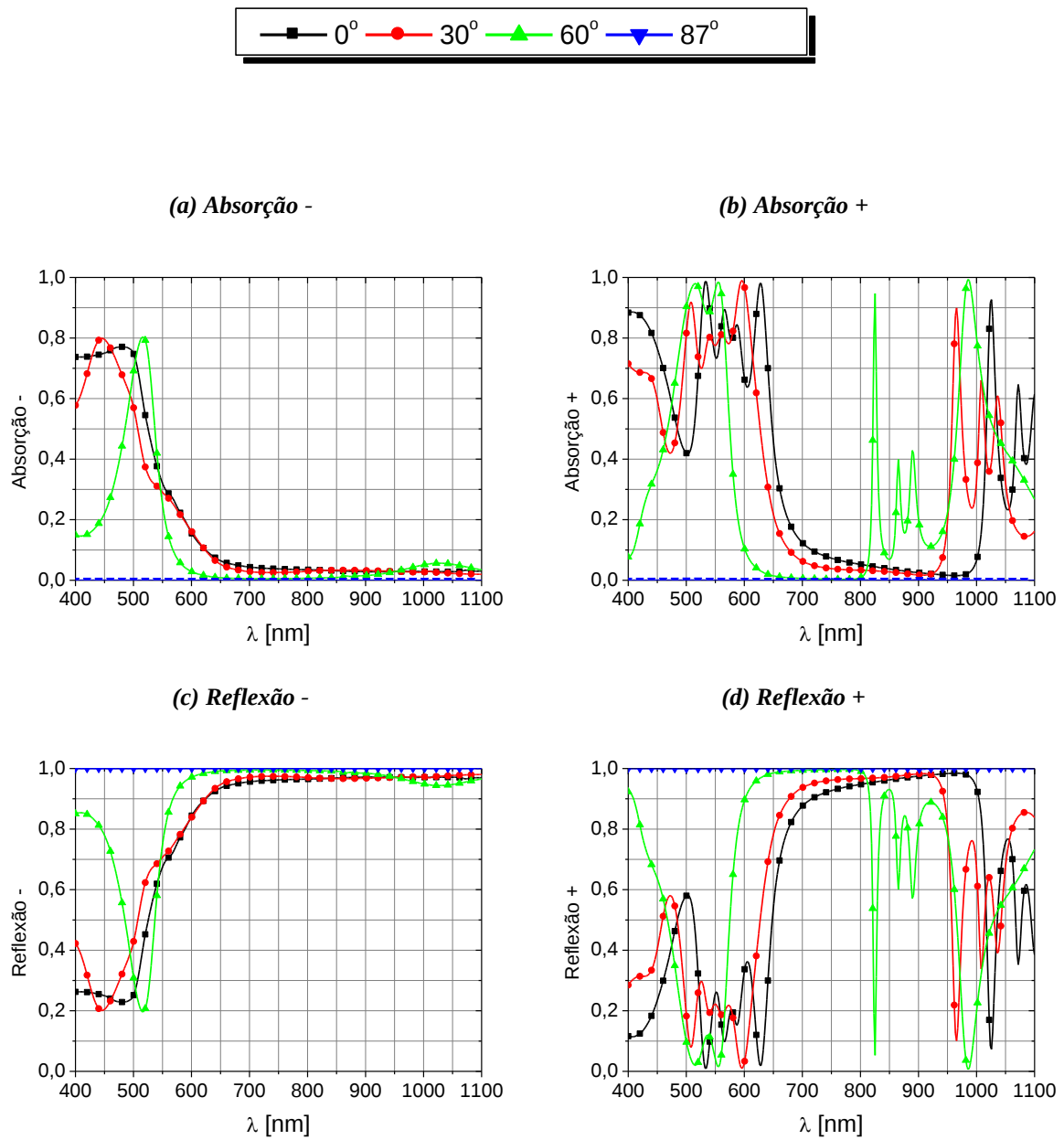


Figura 78: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

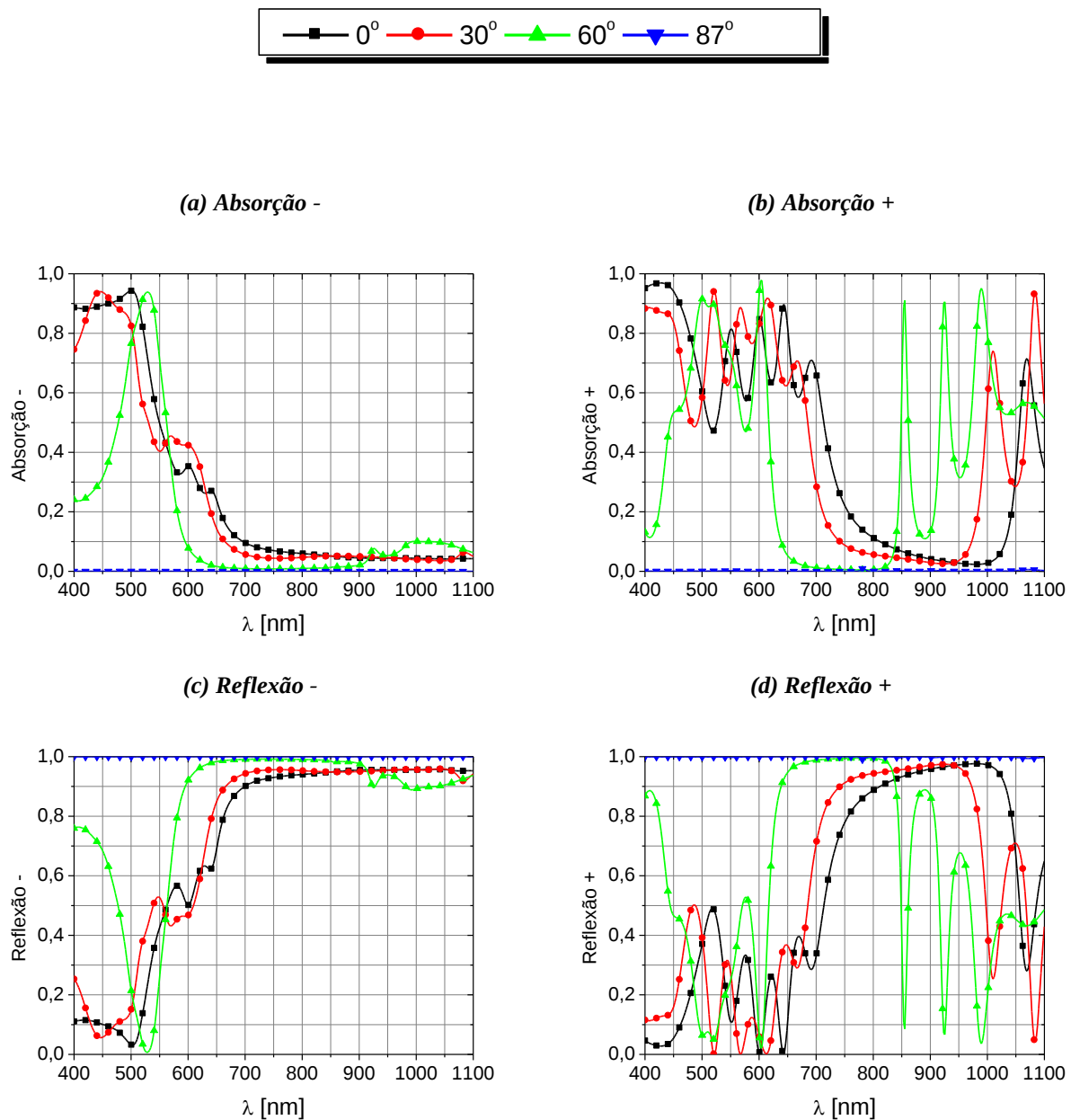


Figura 79: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 71 a 79 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de dielétrico - metal (SiO_2 -Au). A fração de preenchimento do dielétrico-metal variou de 0.25 a 0.75, mas agora em uma espessura de 30 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO_2 . O ângulo de incidência continuou sendo variado de 0° a 87° . A estrutura mantém o comportamento assimétrico, com transmitância

irrelevante na maioria dos casos. Os comportamentos de absorvedores e refletos continuam a ser obtidos satisfazendo os resultados esperados da simulação.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 71, com a parcela de 0.25 de dielétrico e 0.75 de metal, a estrutura apresenta respostas consideráveis de absorção e reflexão na faixa do visível e no infravermelho. A resposta de absorção na Figura 71 (a) não apresenta resultados relevantes com absorção abaixo de 70 % na região do visível e abaixo de 10 % no IR. Para a propagação para direita na Figura 71 (b) foram apresentadas maiores oscilações, mas nenhum pico com fração de potência acima de 93 % na estrutura. A assimetria na absorção se apresenta em torno dos 700 aos 900 nm, onde na propagação para esquerda a fração de potência não ultrapassa os 10% e na propagação para direita são atingidos picos em variados comprimentos de onda e variações angular. Em 71 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos próximo aos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Para a propagação para esquerda todos os ângulos atingem a frações de potência acima de 95 % a partir dos 700 nm, variando até os 1100 nm, o que permite uma alta reflexão independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita entre 750 e 900 nm possui fração de potência acima de 97% para a incidência de 60° , tornando possível o uso do material como espelho.

Com metade do preenchimento de metal na estrutura do metamaterial e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 71 (b), 72 (b) possui maiores picos de absorção, onde um absorvedor quase perfeito é obtido entre 850nm e 950 nm para os ângulos de 0° e 30° com valores acima de 98% na região do infravermelho. A reflexão em ambos os sentidos de propagação mantém resultados similares ao preenchimento anterior, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 90 % a partir dos 650 nm independente do ângulo incidido na estrutura e propagação para direita (d) com os maiores picos para as incidências de 0° , 30° e 60° no intervalo de 550 a 750 nm.

Na configuração com maior parcela de dielétrico (Figura 73), 22.5 nm de SiO_2 e 7.5 nm de Au, a propagação para direita obteve manteve altas frações de potências com o intervalo de 850 nm a 950 com absorção acima de 97% para os ângulos de 0° , 30° e 60° . A propagação para a esquerda em 73 (a) teve aumento de fração de potência, alcançando frações acima de 90 % até os 550 nm. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantém o comportamento com respostas similares aos apresentados para $L=200$, no entanto em 73 (c) as frações de potência são menores e não se mantém constante como em 72 (c).

Para $L=250$, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de metal de 0.25 na Figura 74 não demonstraram alterações relevantes

quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ apresentado na Figura 71. Em 74 (b) os ângulos de 0° e 30° tiveram picos com fração de potência acima de 94%, ainda em (b) percebe-se que a estrutura mantém a assimetria na faixa do infravermelho com picos alternados ao longo do comprimento de onda com absorções acima de 90 %. Para a reflexão em ambos os sentidos de propagação, 74 (c) e (d) os ângulos de 0° , 30° e 60° trouxeram pontos com frações de potência acima de 98 %. Em 74 (c), a fração de potência independente do ângulo de incidência é maior que 94% no intervalo de 650 nm a 1100 nm, já em 74 (d) se analisarmos a faixa de 650 a 750 nm nota-se que todos os ângulos atingem mais que 98 % de reflexão na estrutura. No preenchimento de 0.5 ainda em $L=250$, Figura 75, as respostas de propagação de absorção e reflexão são similares aos de $L=200$ (Figura 74), as frações de potência de absorção em 75 (b) estão acima de 90% nos ângulos de 0° e 30° entre 400 nm e 600 nm e reflexão em 75 (d) acima de 95 % entre 600nm e 850 nm nos ângulos de 0° e 30° , e 60° . Em $L=250$ preenchimento de 0.75, Figura 76, ocorre resultados semelhantes comparados a $L=200$ (Figura 73).

Para $L=300$, das imagens 77 a 79, quando comparado a $L=250$ não se notam muitas disparidades dos resultados, obtendo alguns pontos com absorção ou reflexão quase perfeita.

4.4.2 Modo de Incidência TE

4.4.2.1 Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂

Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂, separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 20 nm. O modo de incidência utilizado é o TE com variação angular de 0° a 87° .

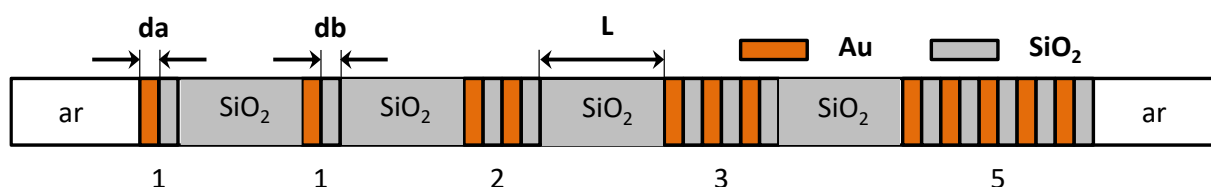


Figura 80: Hipercristal multicamadas alternadas de Au- SiO₂.

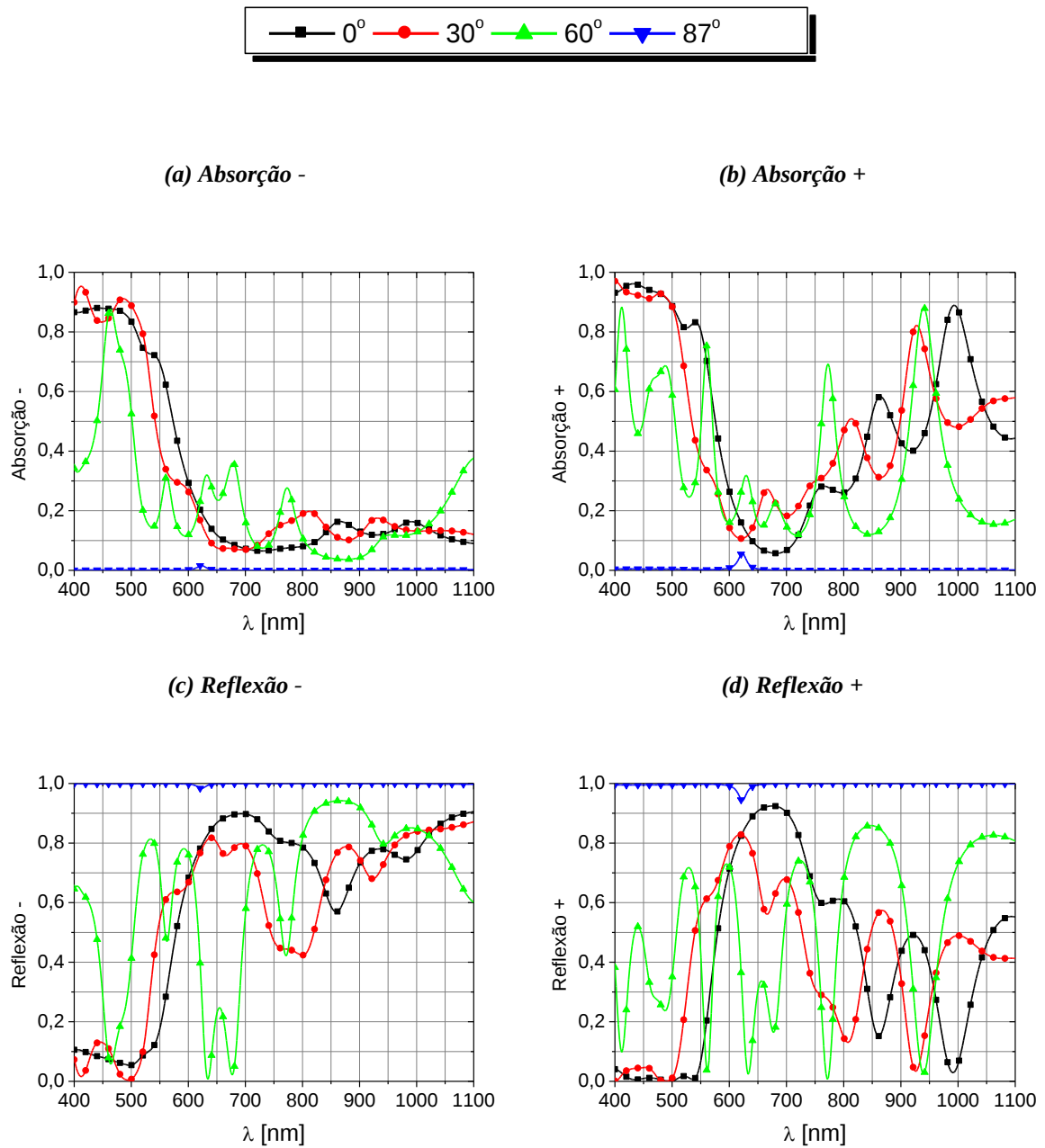


Figura 81: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

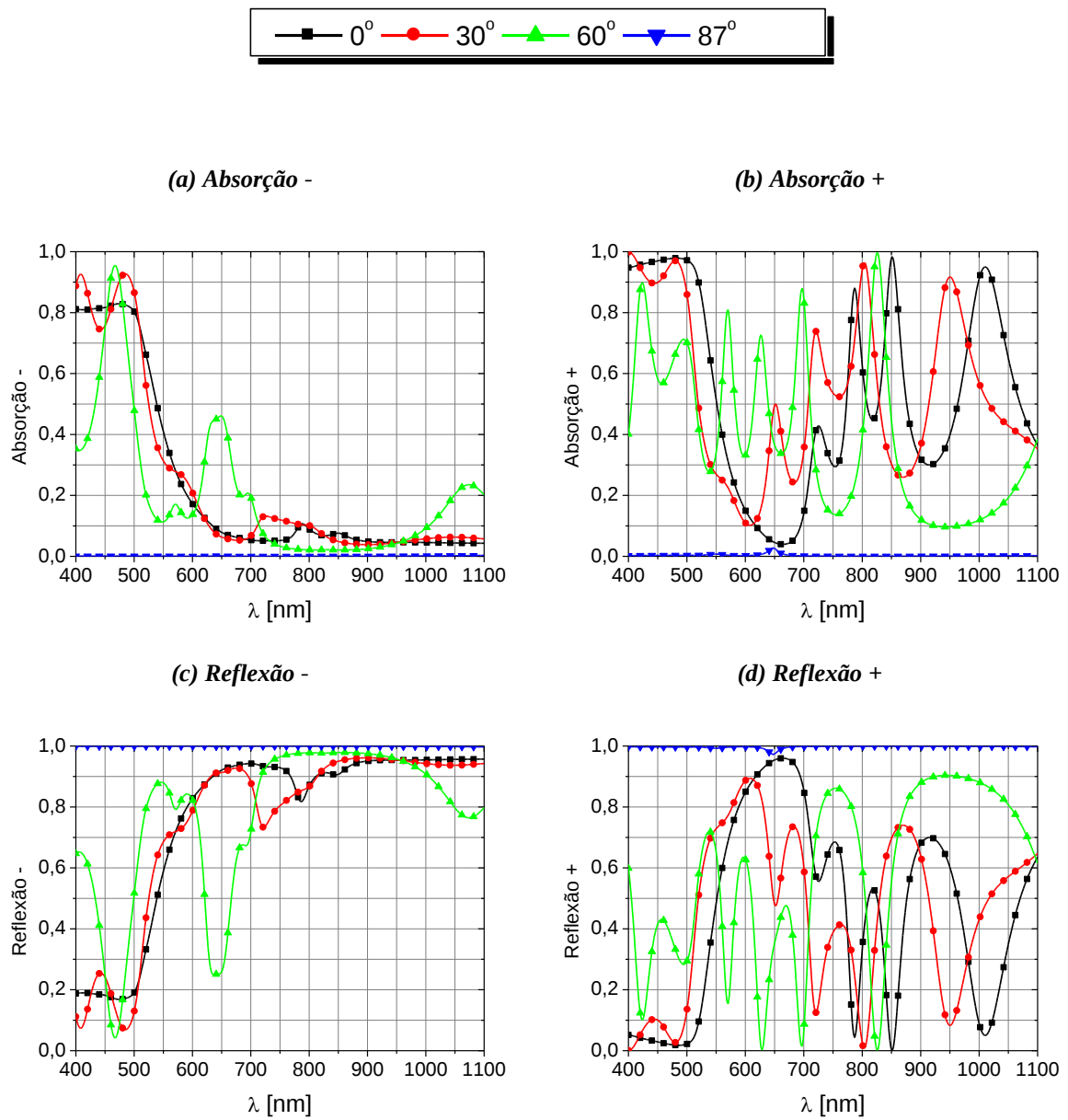


Figura 82: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

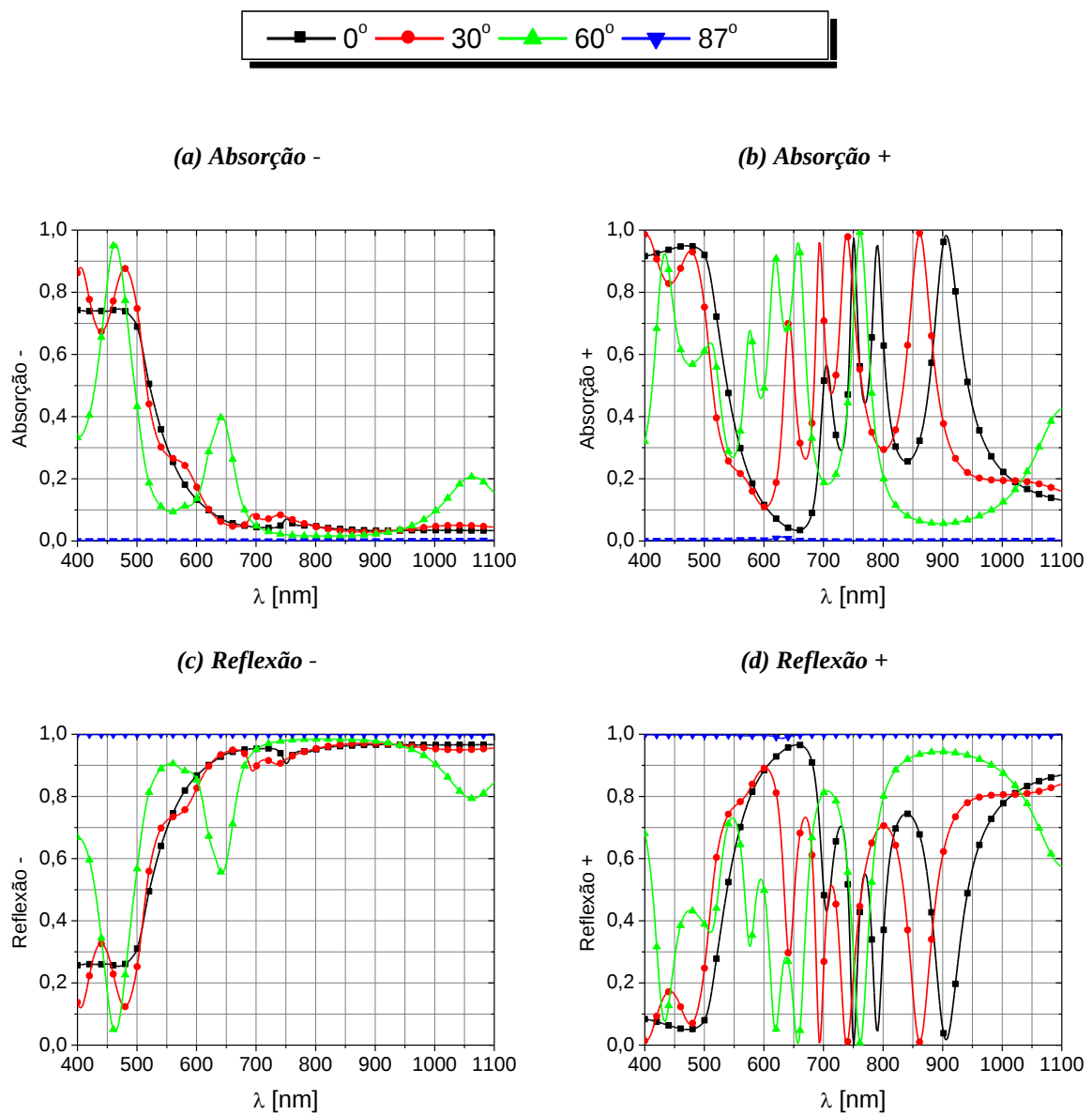


Figura 83: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

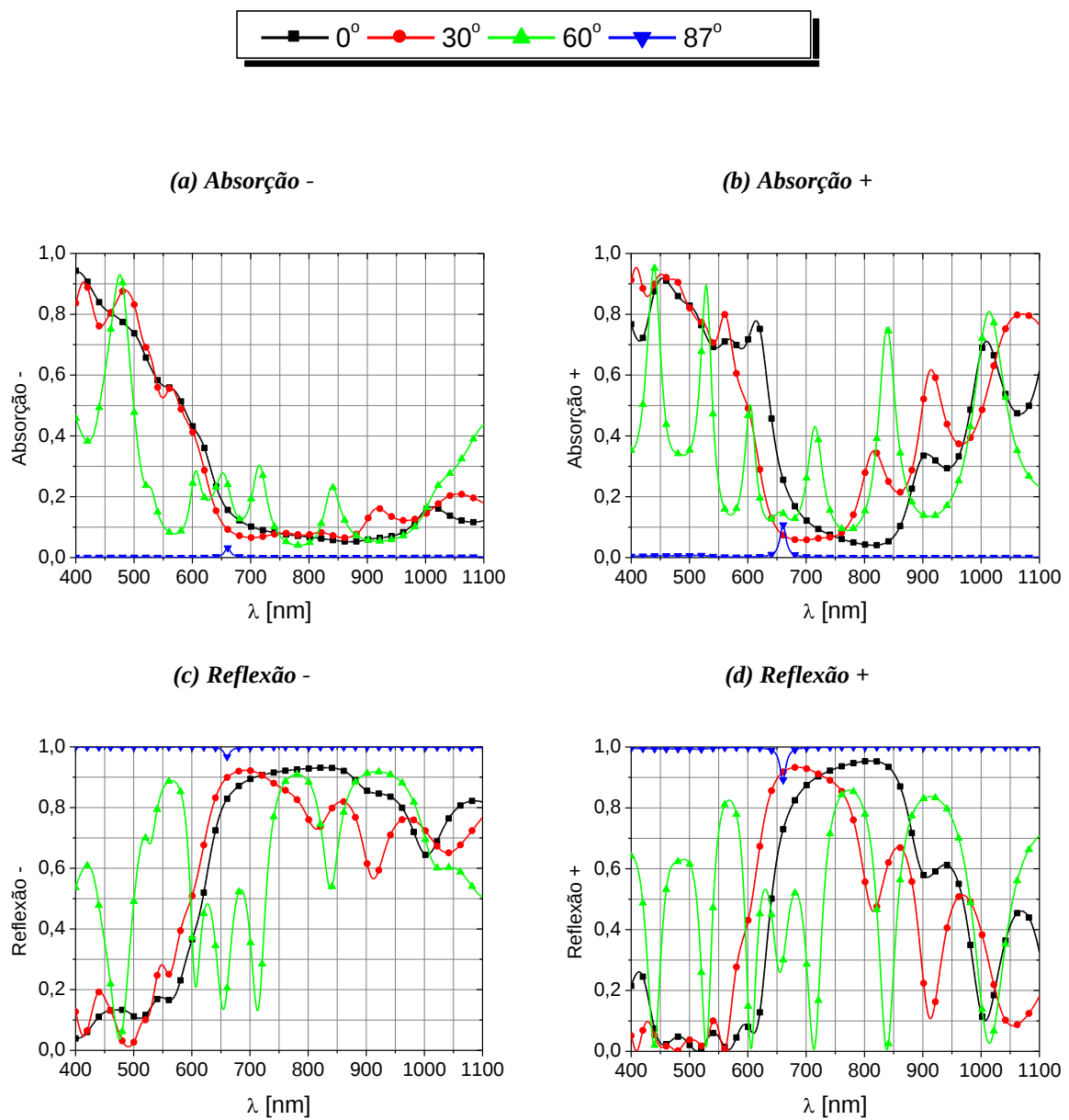


Figura 84: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

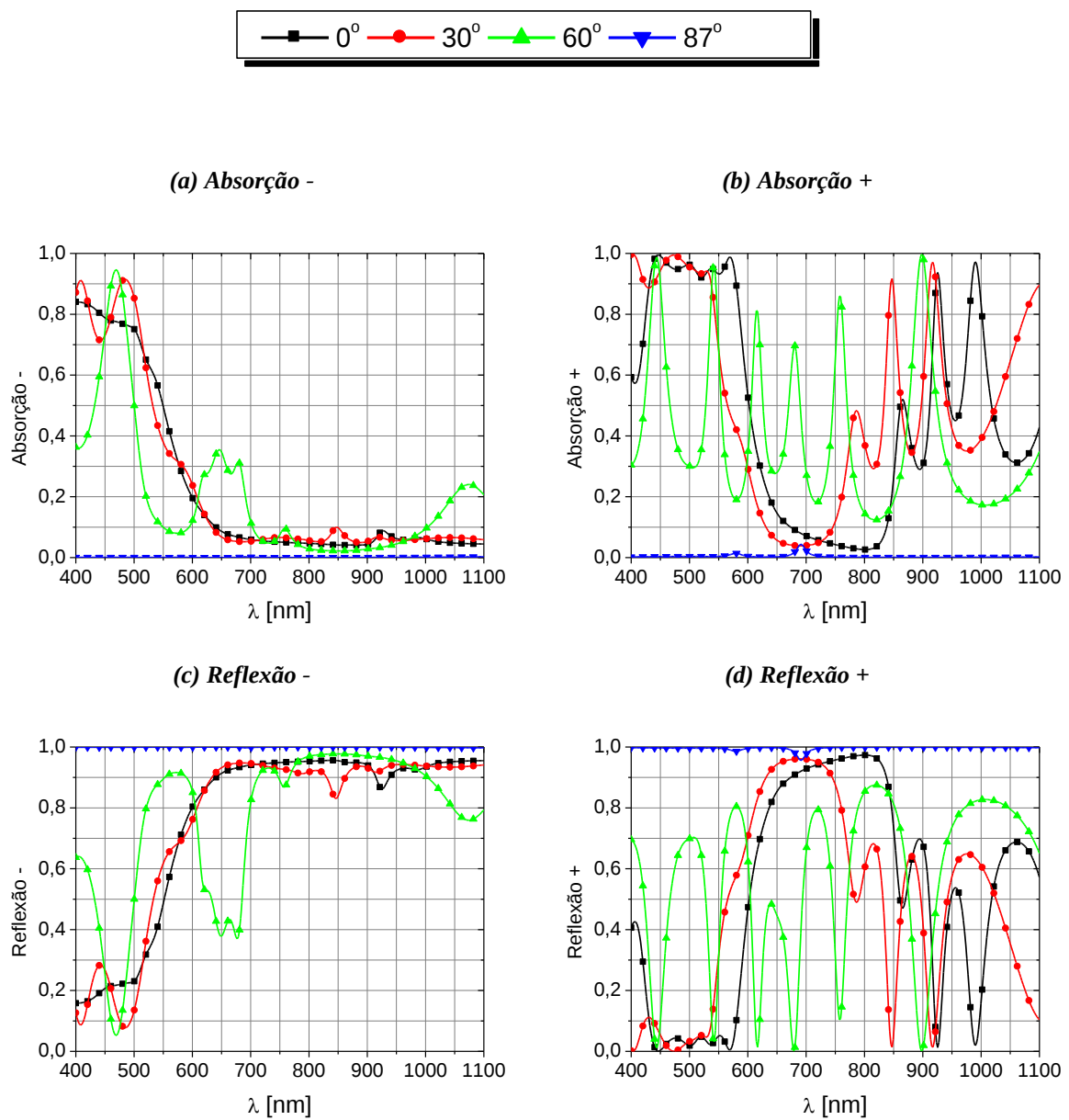


Figura 85: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

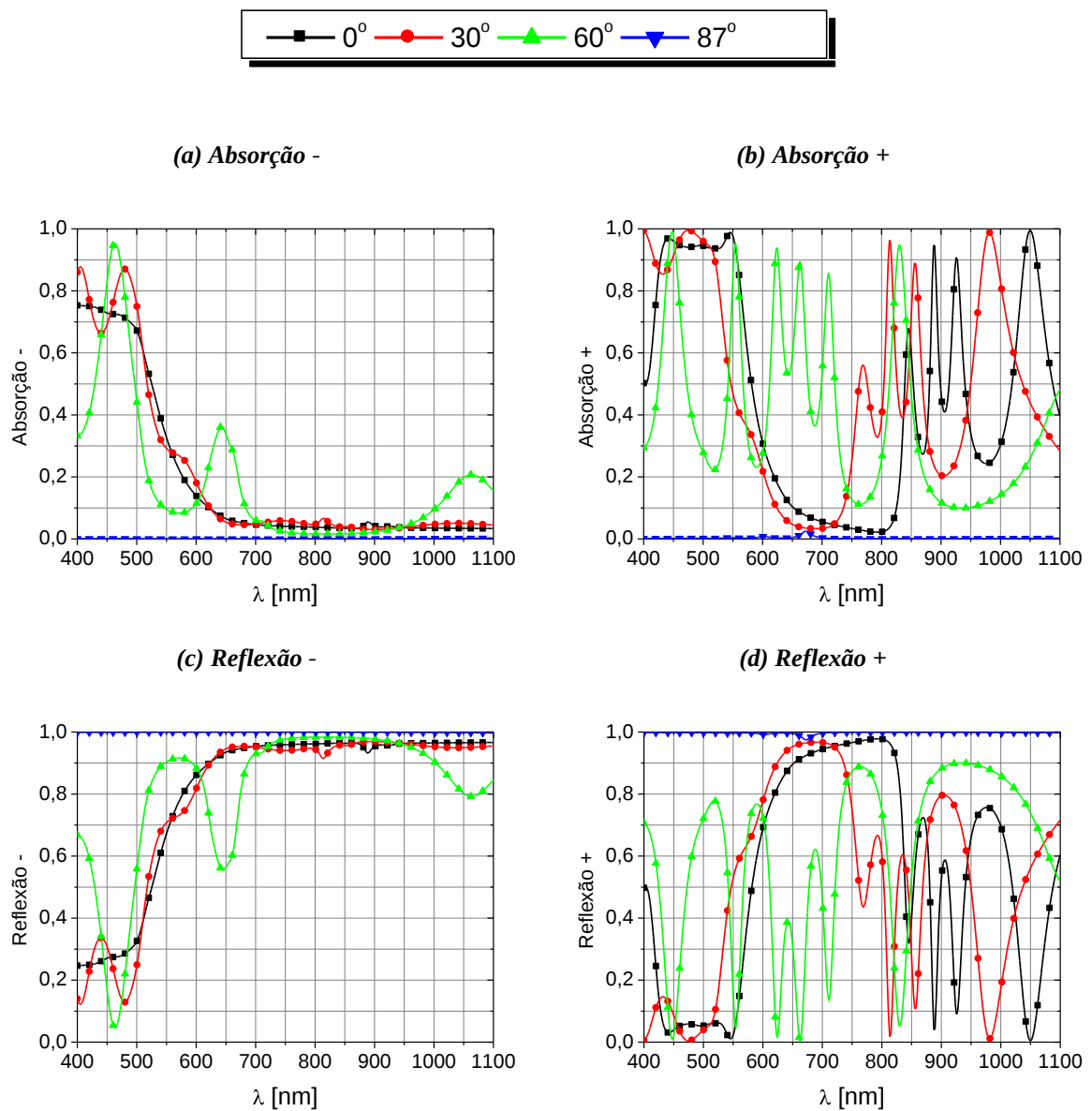


Figura 86: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.

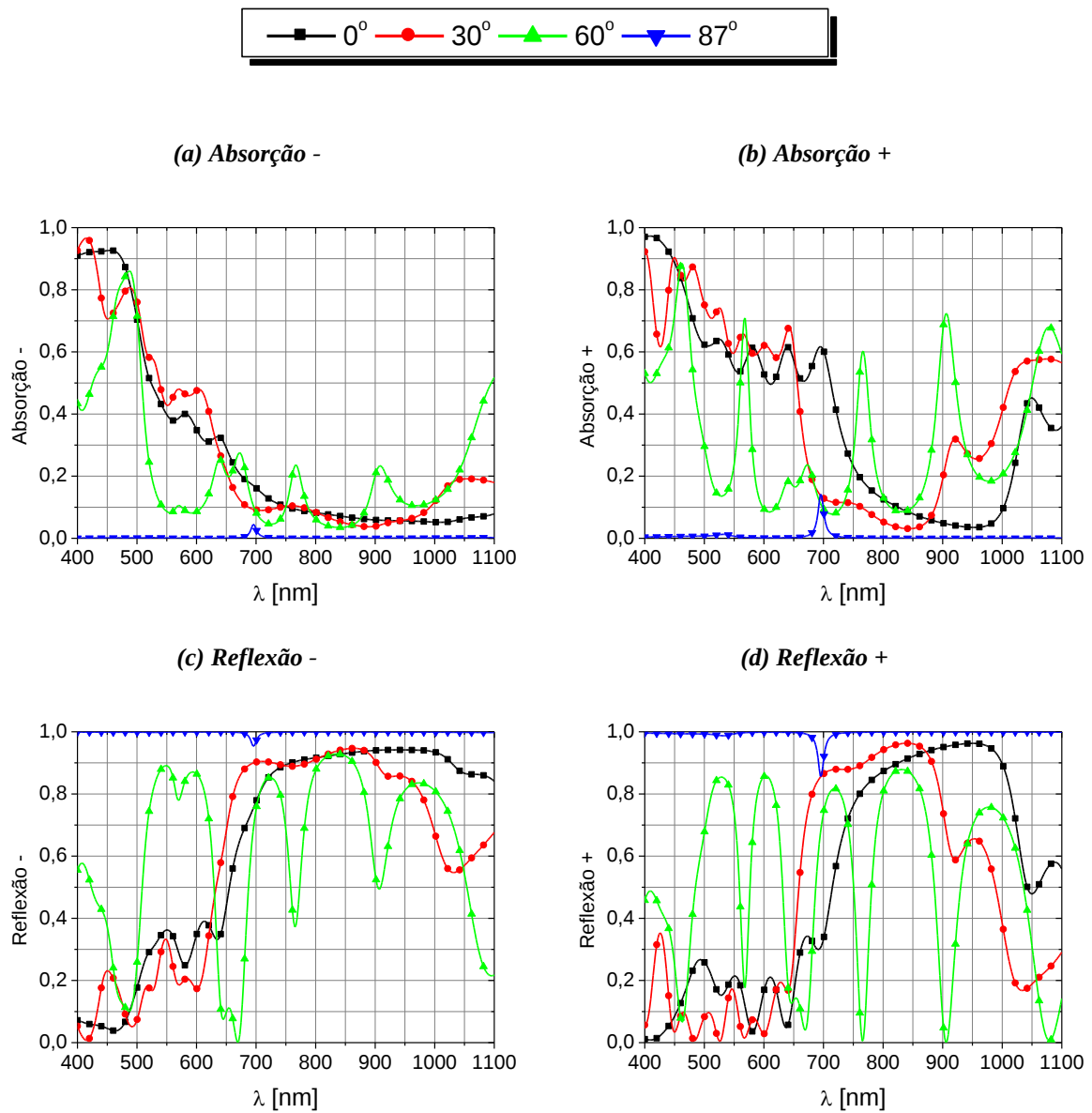


Figura 87: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

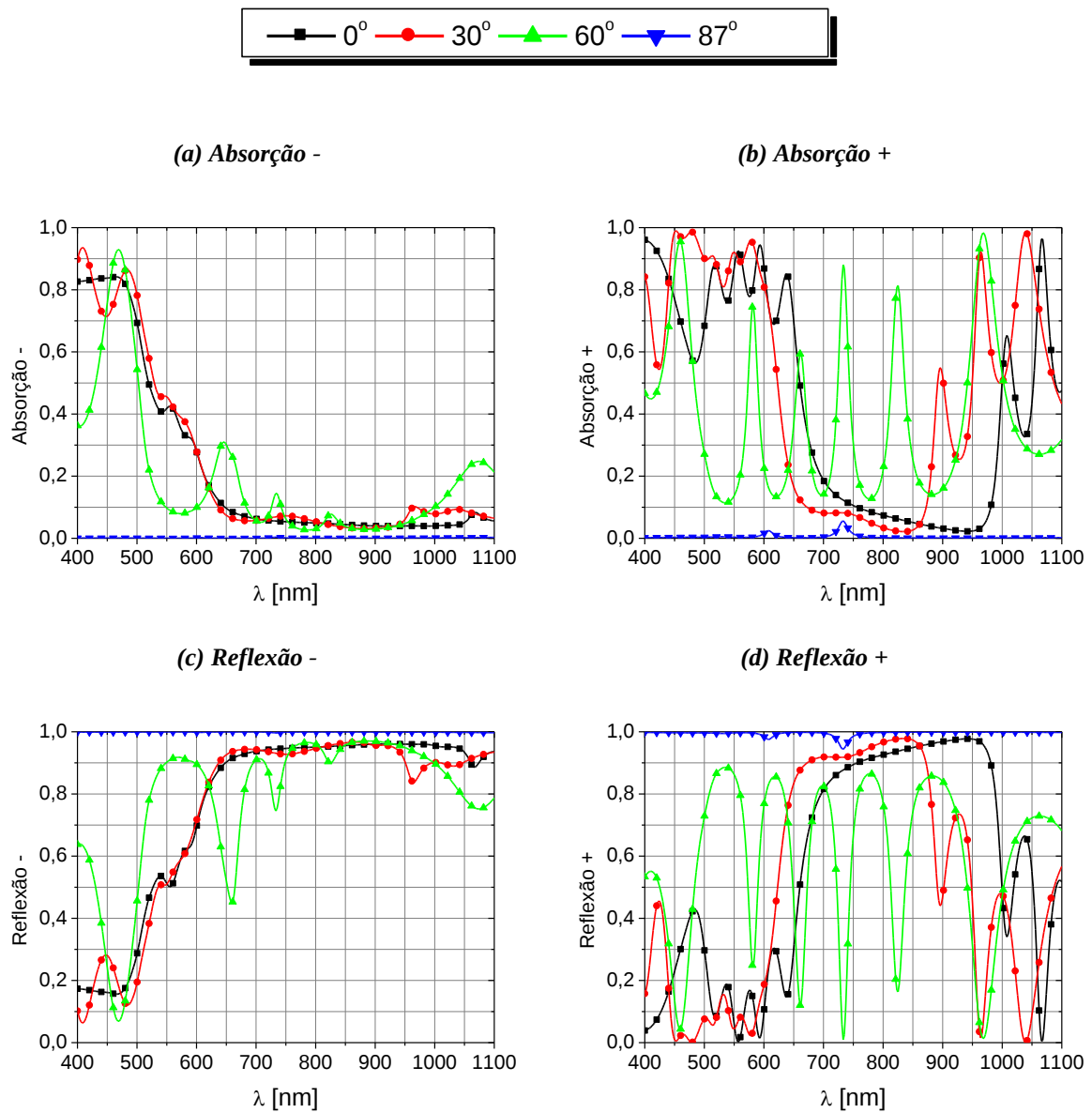


Figura 88: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

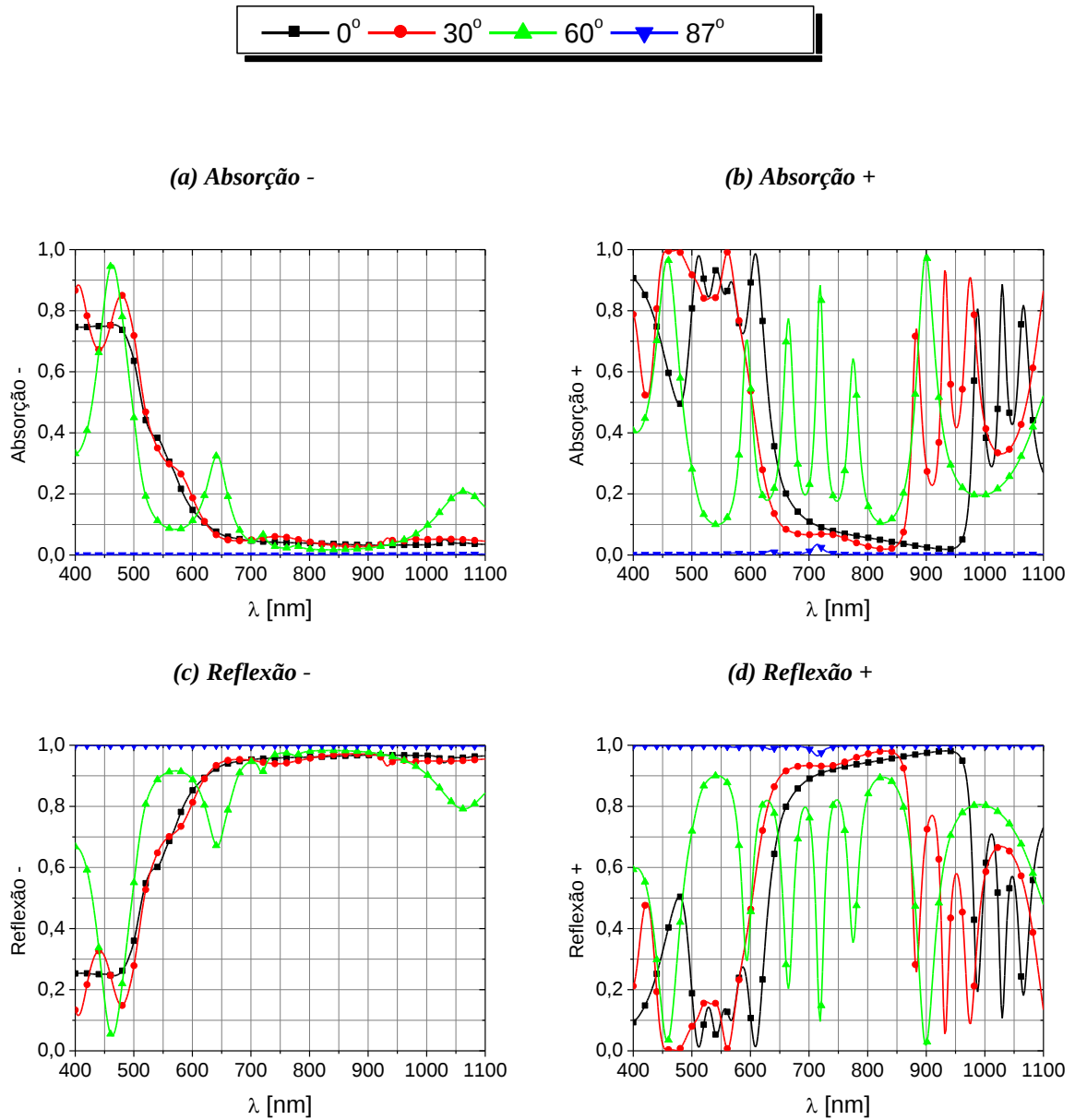


Figura 89: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento do dielétrico de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 81 a 89 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hipercristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Au-SiO₂). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.25 a 0.75 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência foi variado de 0° a 87° no modo TE, demonstrando o possível uso da estrutura como um absorvedor ou refletor seletivo em ambos os modos de propagação, usando quando necessário um determinado ângulo de incidência na

estrutura. A estrutura mantém o comportamento assimétrico, com transmitância irrelevante na maioria dos casos. O comportamento de absorvedor e refletor é observado por diversos comprimentos de onda, satisfazendo os resultados esperados da simulação. Neste tópico não será avaliado o ângulo de 0° pelo fato de suas respostas não variarem com a mudança do modo de propagação.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 81, estrutura com maior percentual de dielétrico, o desempenho de absorvedor é exposto em alguns comprimentos de onda. As respostas de absorção nas Figuras 81 (a) e (b) possuem percentuais de potência mais altos no início da faixa do visível, com frações acima de 90 % para 30° , já na região do infravermelho a absorção para a esquerda não apresenta respostas acima de 25 % e na propagação para direita o ângulo de 60° não ultrapassa 90 %. A assimetria na absorção da estrutura se mostra aparente em torno dos 700 aos 1100 nm, neste caso, se o comportamento do ângulo de 30° for analisado em ambos os sentidos é notado que entre 900 nm e 950 nm enquanto a absorção para direita atinge 80 %, a absorção para esquerda não ultrapassa 20 % de fração de potência. Em 81 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 nm aos 550 nm não apresentam resultados muito relevantes onde a fração de potência refletida não chega a 70 %, em contrapartida, a partir dos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Para a propagação para esquerda o ângulo de 60° atinge a fração de potência acima de 92 % nos intervalos de 700 nm a 950 nm, já na propagação para direita no intervalo de 850 a 950 nm a fração fica acima de 80 % para o mesmo ângulo incidido.

Ainda com $L=200$, mas com metade do preenchimento de metal e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 81 (b), 82 (b) possui mais picos de absorção e maiores frações de potência, onde é possível obter absorvedores com frações acima de 97 % no ângulo de 30° para o intervalo de 400 nm a 450 nm e no ângulo de 60° para o intervalo de 800 nm e 850 nm. A reflexão em ambos os sentidos de propagação mantém resultados similares ao preenchimento anterior, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 92 % a partir dos 900 nm quando o ângulo de 30° for incidido na estrutura. A propagação para direita (d) não apresentou frações de potência acima de 90 % para os ângulos de 30° e 60° . Na configuração com maior parcela de metal, Figura 83, 15 nm de Au e 5nm de SiO_2 , a propagação para direita obteve maiores picos de absorção em variados comprimentos de onda, ao analisar o intervalo de 750 nm a 850 nm, os ângulos de 30° e 60° respectivamente apresentam comportamento de absorvedor quase perfeito com frações acima de 98 %. O resultado da absorção para a esquerda apresentou comportamento semelhante com as configurações

anteriores para essa estrutura, sendo possível notar o comportamento assimétrico, pois neste caso em questão a partir dos 700 nm a absorção não ultrapassa 40 % contrastando com o a propagação para direita. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantém o comportamento com respostas similares aos apresentados para $L=200$.

Para $L=250$, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de metal de 0.25 apresentados na Figura 84, não demonstraram alterações relevantes quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ na Figura 81. Em 84 (a) e (b) para ambos os sentidos de propagação, a absorção só ultrapassou 90% no início da faixa do visível, já em 84 (c) e (d) o ângulo de 30° trouxe pontos com frações de potência acima de 90 % entre 650 e 700 nm. No preenchimento de 0.5, ainda em $L=250$ na Figura 85, as respostas de propagação de absorção e reflexão mesmo similares aos de $L=200$ mostram leves aumentos de frações de potência, com absorção em 85 (b) acima de 99% nos ângulos de 30° e 60° e reflexão em 85 (d) acima de 98 % entre 600 nm e 800 nm para o ângulo de 30° . O mesmo ocorre para $L=250$ preenchimento de 0.75, Figura 86, resultados semelhantes comparados a $L=200$ (Figura 83), apresentando assimetria na estrutura na absorção e reflexão e picos com fração de potência acima de 97%.

Para $L=300$, das imagens 87 a 89, em geral as simulações não resultaram em um aumento das respostas em comparação a $L=250$, ocorreram mudanças nos picos com ângulos e comprimentos de onda diferentes, as respostas mostram que a maior parcela de metal influencia nas melhores respostas da estrutura, a assimetria continuou aparente na estrutura quando alterado o sentido de propagação o que permite que o material seja variado a depender da necessidade de utilização como comprimento de onda necessário e o ângulo incidido na estrutura.

- Estrutura composta por metal-dielétrico, Au-SiO₂, separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 30 nm. Modo de incidência TE, variação angular de 0° a 87° .

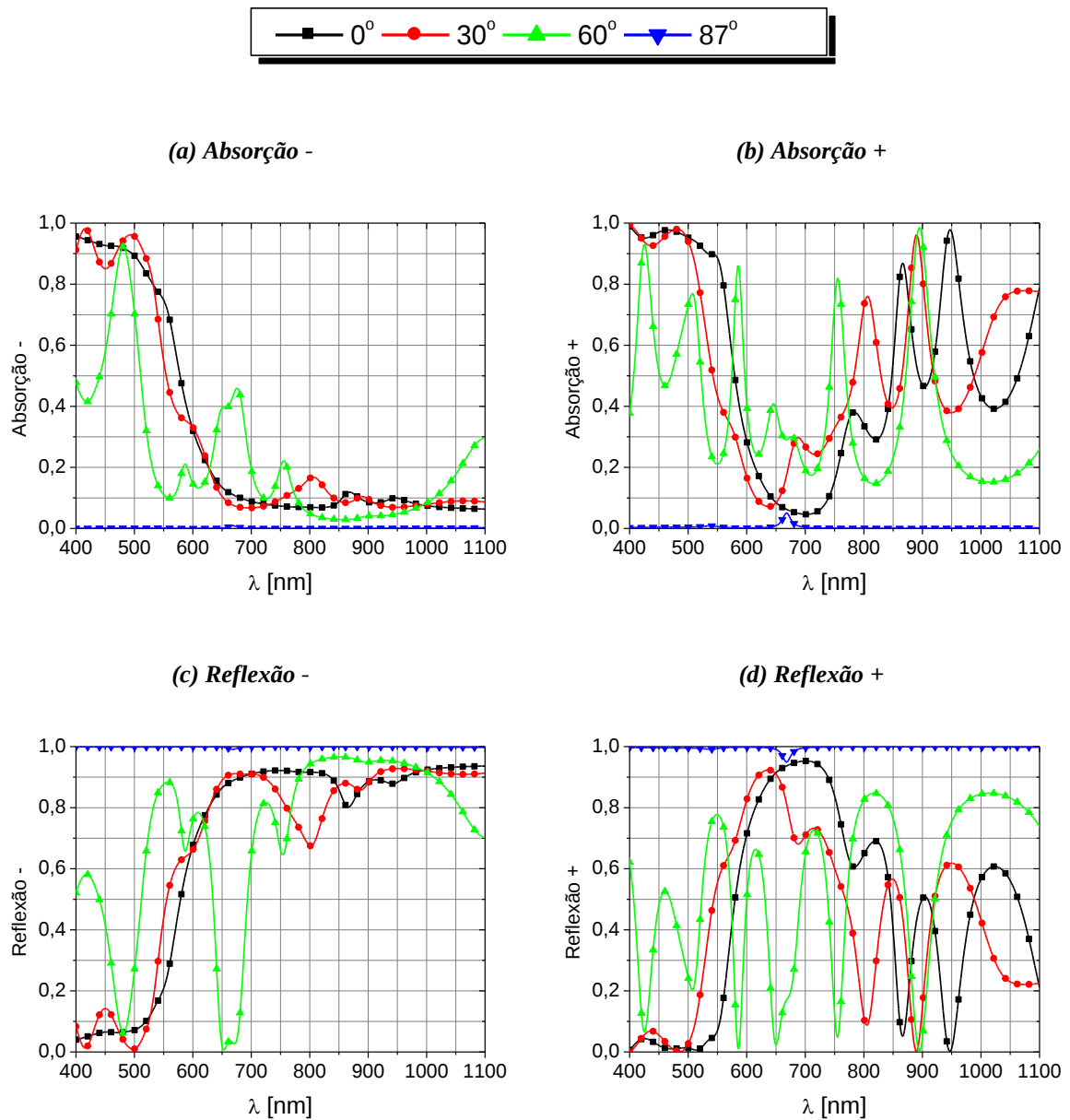


Figura 90: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

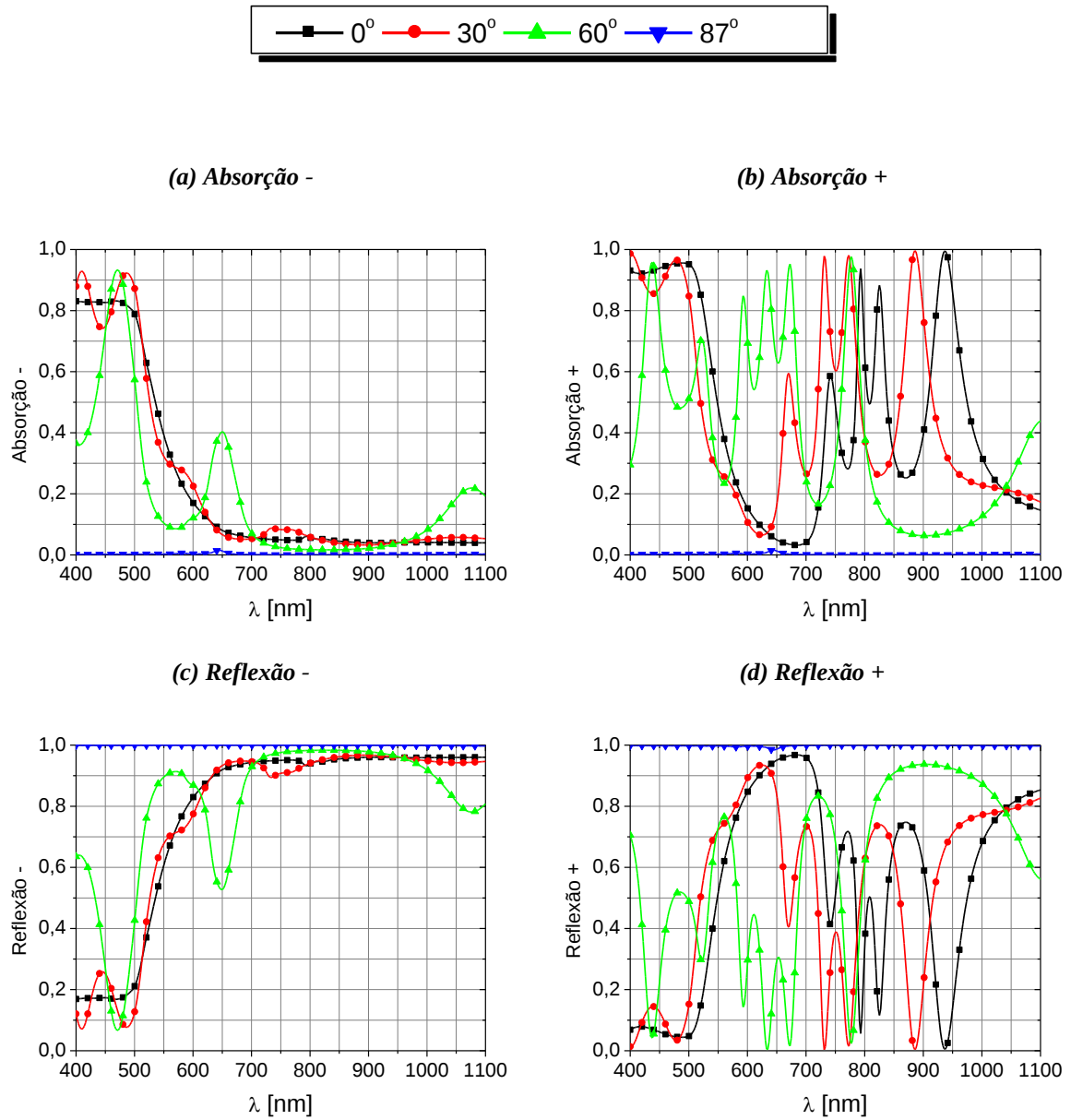


Figura 91: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

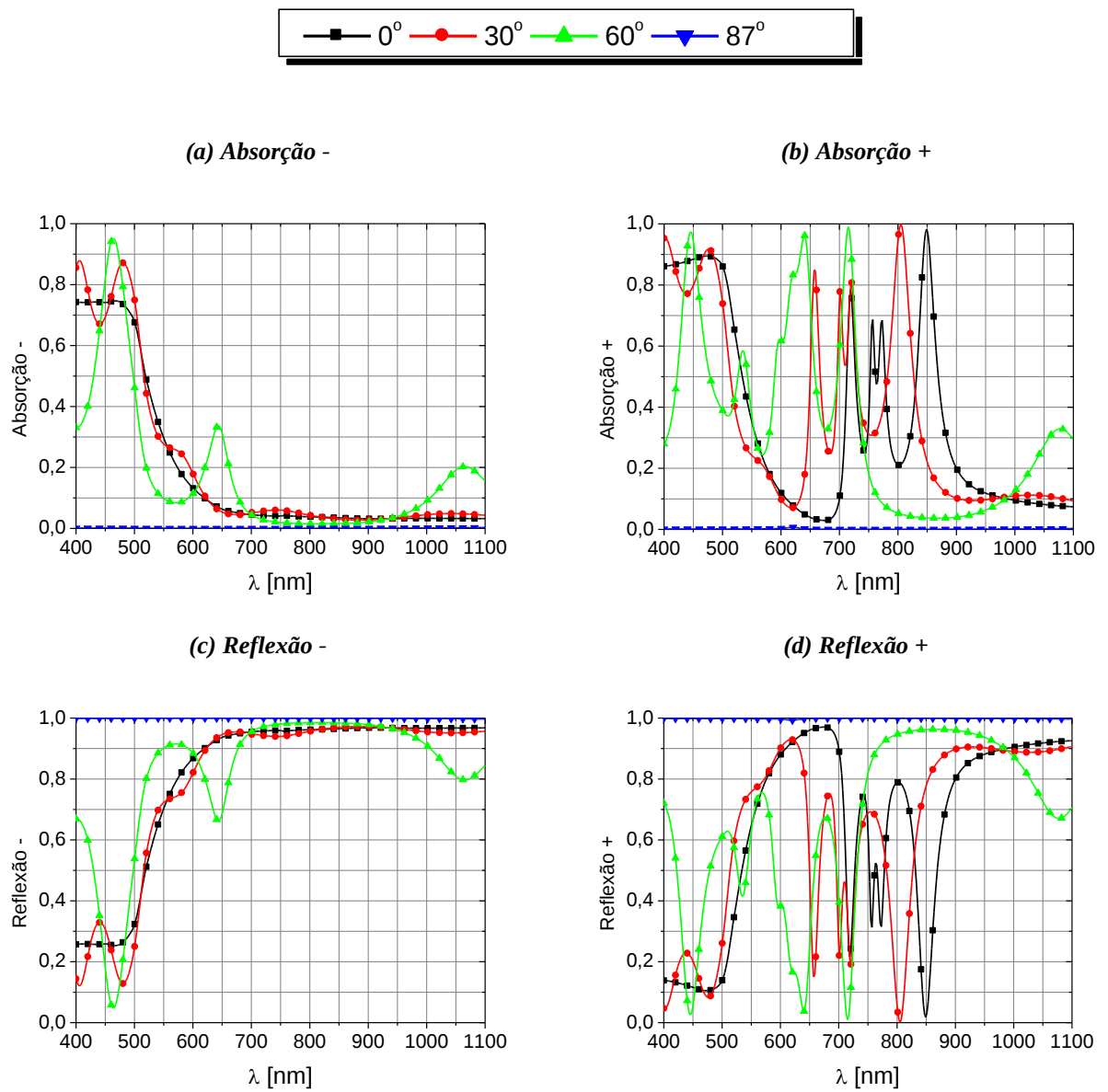


Figura 92: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 200$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

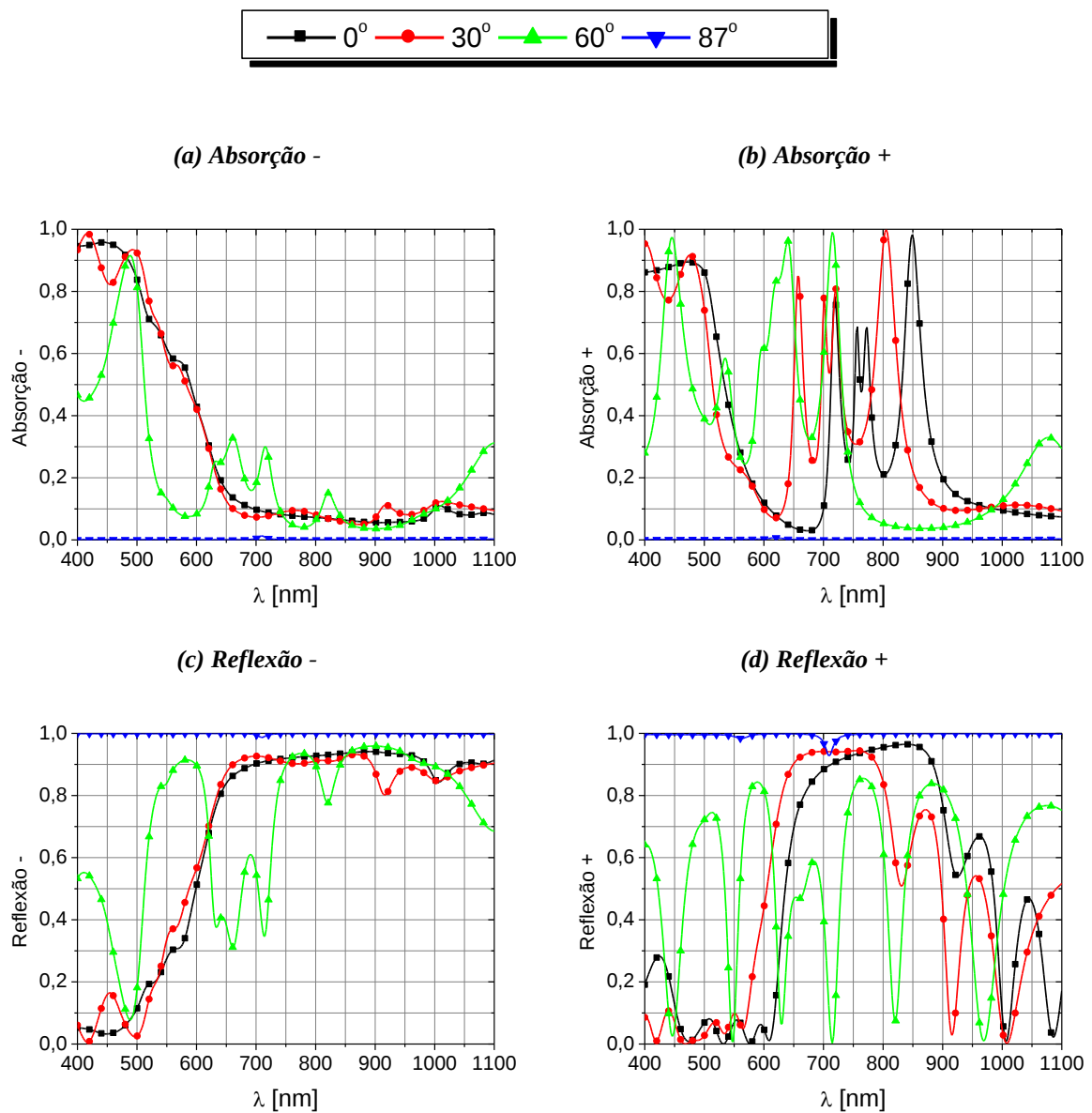


Figura 93: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

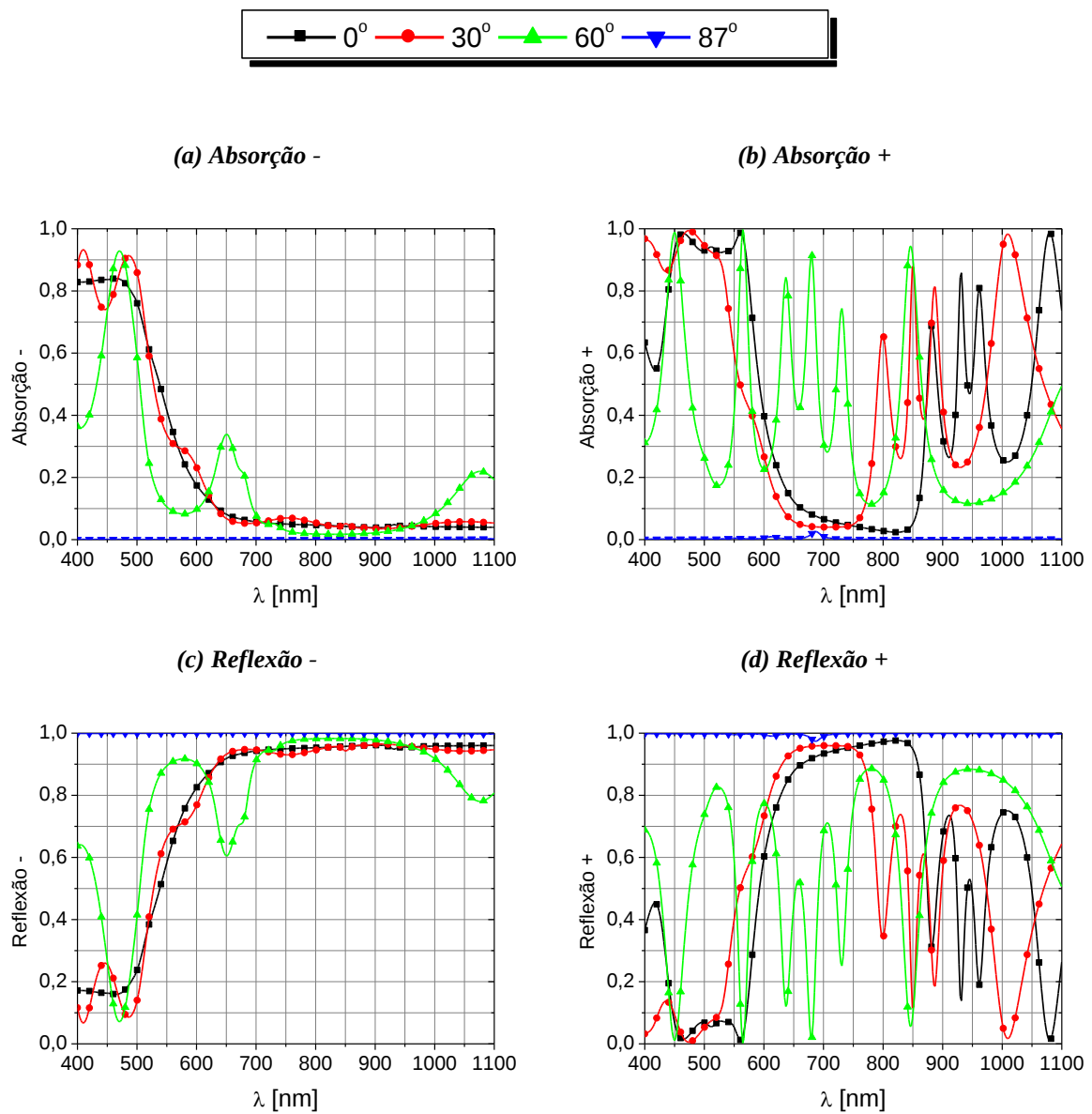


Figura 94: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

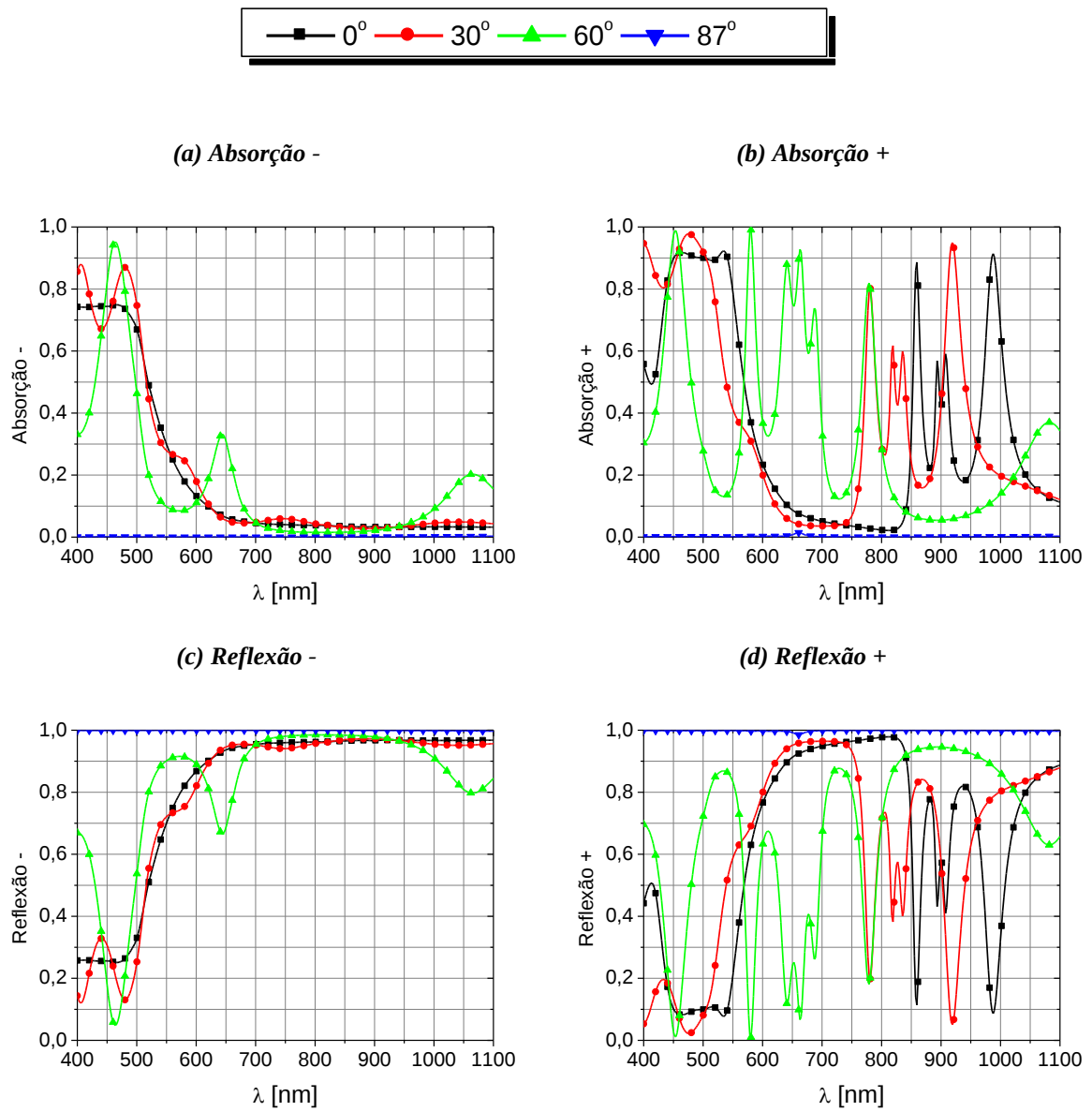


Figura 95: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 250$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

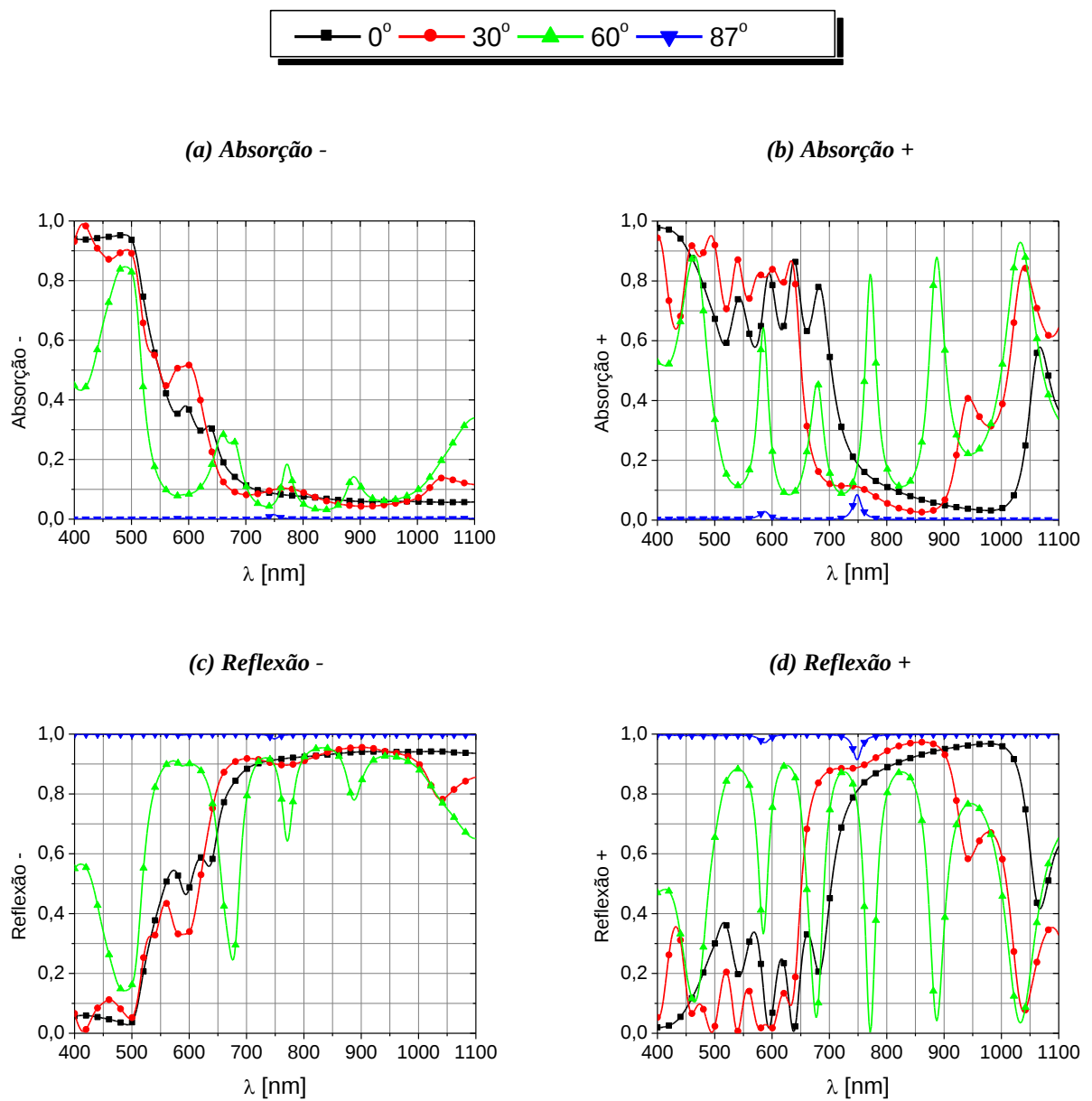


Figura 96: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

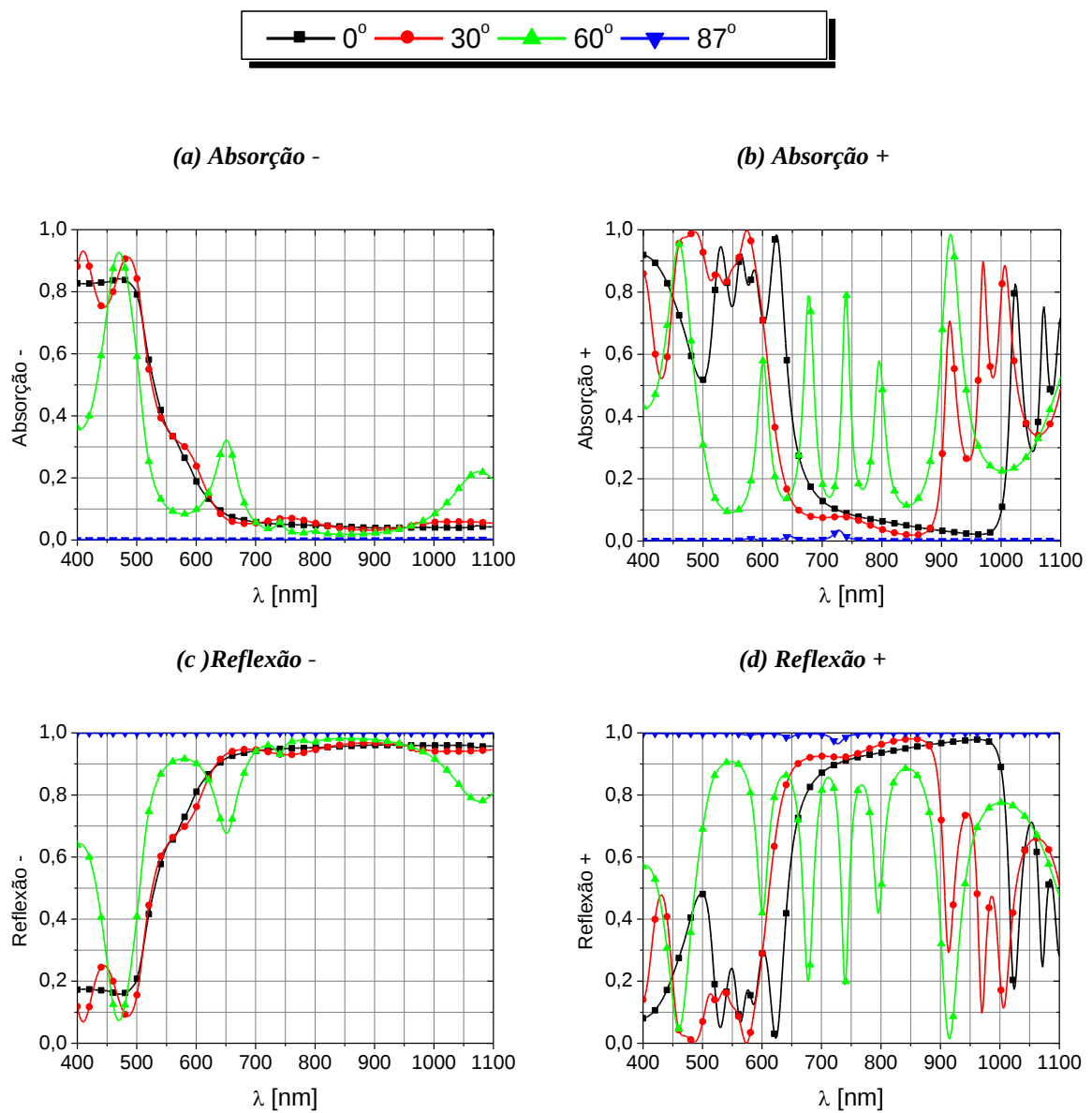


Figura 97: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

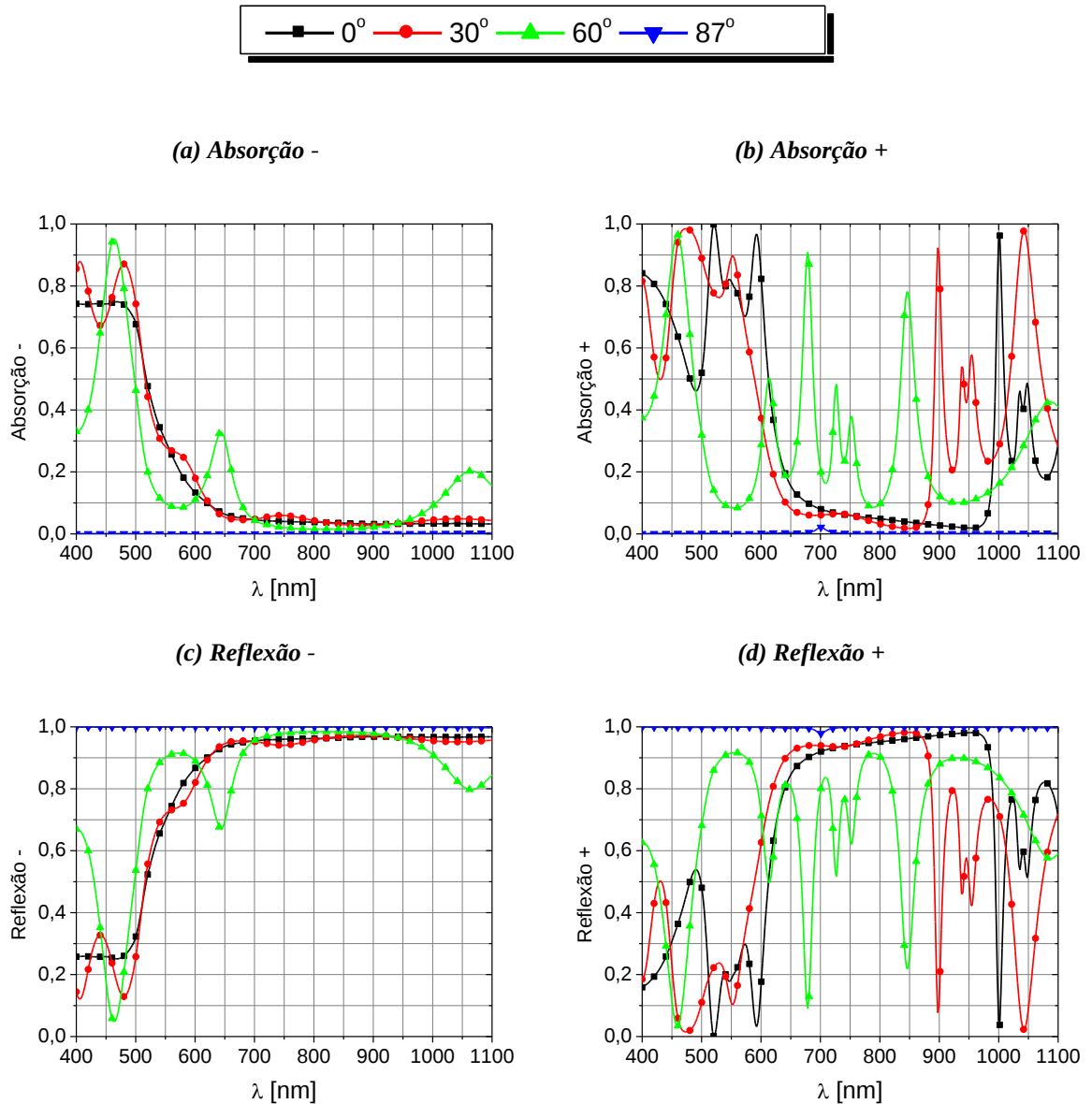


Figura 98: Propagação no metamaterial de Fibonacci Au-SiO₂ em função da fração de preenchimento do dielétrico de metal com $L = 300$ nm e variação do metal-dielétrico de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 90 a 98 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de metal-dielétrico (Au-SiO₂). A fração de preenchimento do metal - dielétrico variou de 0.25 a 0.75, mas agora em uma espessura de 30 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência continuou sendo variado de 0° a 87° no modo TE, mantendo possível o uso da estrutura como um absorvedor ou refletor seletivo, usando quando necessário um determinado ângulo de incidência na estrutura.

A estrutura mantém o comportamento assimétrico, com transmitância irrelevante na maioria dos casos. O comportamento de absorvedor e refletor é observado por diversos comprimentos de onda, satisfazendo os resultados esperados da simulação. O ângulo de 0° novamente não foi analisado por apresentar os mesmos resultados que o modo TM.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 90, onde a maior parcela da estrutura é de dielétrico, o desempenho de absorvedor é exposto em variados comprimentos de onda. A resposta de absorção nas Figuras 90 (a) e (b) apresentam maiores picos de incidência nos comprimentos de onda iniciais da região do visível, acima de 94% entre 400 e 500 nm no ângulo de 30° , além disso, em 90 (b) foram apresentadas maiores oscilações com diversos picos ao longo da propagação, percebe-se que na região do infravermelho se fixado o intervalo de 850 nm a 900 nm encontra-se altas absorções para 30° e 60° . A assimetria na absorção da estrutura continua se apresentando em torno dos 700 nm aos 1100 nm, onde na propagação para esquerda a fração de potência não ultrapassa 30% e na propagação para direita são atingidos picos com absorvedores quase perfeitos em variados comprimentos de onda e variações angular. Em 90 (c) e (d) pode ser observada a reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 nm aos 500 nm não apresentam resultados muito relevantes, a fração de potência refletida não chega a 75 %, a partir dos 600 nm começam a existir maiores oscilações e picos nas respostas da estrutura. Para a propagação para esquerda no intervalo de 800 nm a 950 nm a reflexão para 60° se mantém acima de 90 %. A propagação para direita se analisada em 750 nm demonstra no ângulo de 30° absorção também acima de 90%.

Com metade do preenchimento de metal na estrutura do metamaterial e metade de dielétrico é observado que o comportamento assimétrico se mantém para os ângulos de 30° e 60° . A absorção para esquerda em 91 (a) possui resultados com menores frações de potência, já 91 (b) mantém oscilações com picos acima de 98% entre 850 nm e 900 nm para 30° . A estrutura em ambos os sentidos de propagação mantém resultados de refletor, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 90 % a no intervalo de 750nm e 950 nm independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita (d) nos intervalos de 600 a 650 nm e 850 a 950 nm possui picos acima de 90 % para as incidências de 30° e 60° respectivamente.

Na configuração com maior parcela de metal (Figura 92), 22.5 nm de Au e 7.5 nm de SiO_2 , a propagação para direita obteve menores picos de absorção em comparação ao preenchimento anterior (91 (b)), neste caso os ângulos de 30° e 60° obtiveram alguns picos sendo absorvedores com frações de potência de até 98%. O resultado da absorção para a esquerda apresentou comportamento semelhante com as configurações anteriores para essa estrutura, sendo possível notar o comportamento assimétrico, pois neste caso em questão a

partir dos 700 nm a absorção não possui muitas variações ao decorrer da propagação, contrastando com a propagação para direita com picos de até 98 %. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantém o comportamento com respostas similares aos apresentados para 91 (c) e (d), a reflexão para esquerda tem frações de potência acima de 92 % para todos os ângulos incididos entre 800 nm e 900 nm, já a reflexão para direita no intervalo de 800 e 950 nm tem reflexão acima de 95% para 60°.

Para $L=250$, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de metal de 0.25 na Figura 93, demonstrou um aumento na absorção quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ na Figura 90. Em 93 (a) o ângulo de 30° obteve um pico de fração de potência acima de 97% no intervalo de 400 a 450 nm. Em (b) percebe-se que a estrutura mantém a assimetria na faixa do infravermelho com picos alternados ao longo do comprimento de onda com absorções acima de 98 % como no intervalo de 700 a 850 nm para as incidências de 60° e 30° respectivamente. Para a reflexão nos dois sentidos de propagação, 93 (c) e (d) os ângulos de 30 e 60° trouxeram pontos com frações de potência acima de 90 %, demonstrando que a estrutura pode ser utilizada como espelho em vários comprimentos de onda, ângulos de incidência e sentido de propagação.

No preenchimento de 0.5, ainda em $L=250$ na Figura 94, as respostas de propagação de absorção e reflexão são similares aos de $L=200$. A absorção em 94 (b) apresenta absorvedores quase perfeitos com absorção acima de 98% nos ângulos de 30° e 60°, já a reflexão em 94 (d) acima de 95 % entre 700 e 750 nm para a incidência de 30°. O preenchimento de 0.75 para $L=250$, Figura 95, também apresenta assimetria e comportamento de espelho e absorvedor por alternados comprimentos de onda.

Para $L=300$, das imagens 96 a 98, os resultados em geral são mantidos, apresentando variações que podem ser utilizadas a depender da necessidade de aplicação do material.

4.4.2.2 Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO₂-Au

Estrutura composta por dielétrico-metal, SiO₂- Au separadas pelo dielétrico SiO₂, com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os pares de metal dielétrico variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 20 nm. O modo de incidência é o TE com variação angular de 0° a 87°.

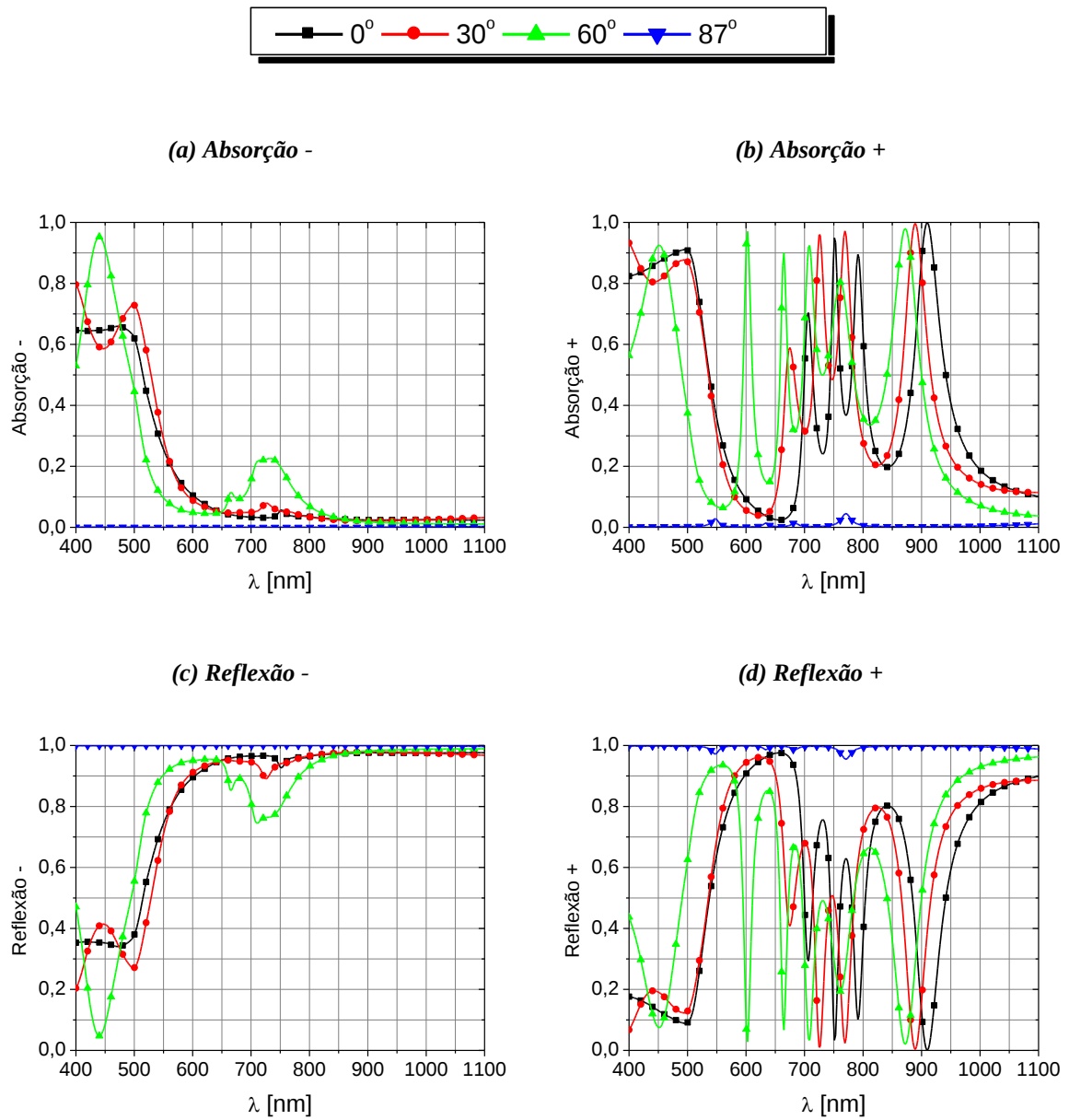


Figura 99: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

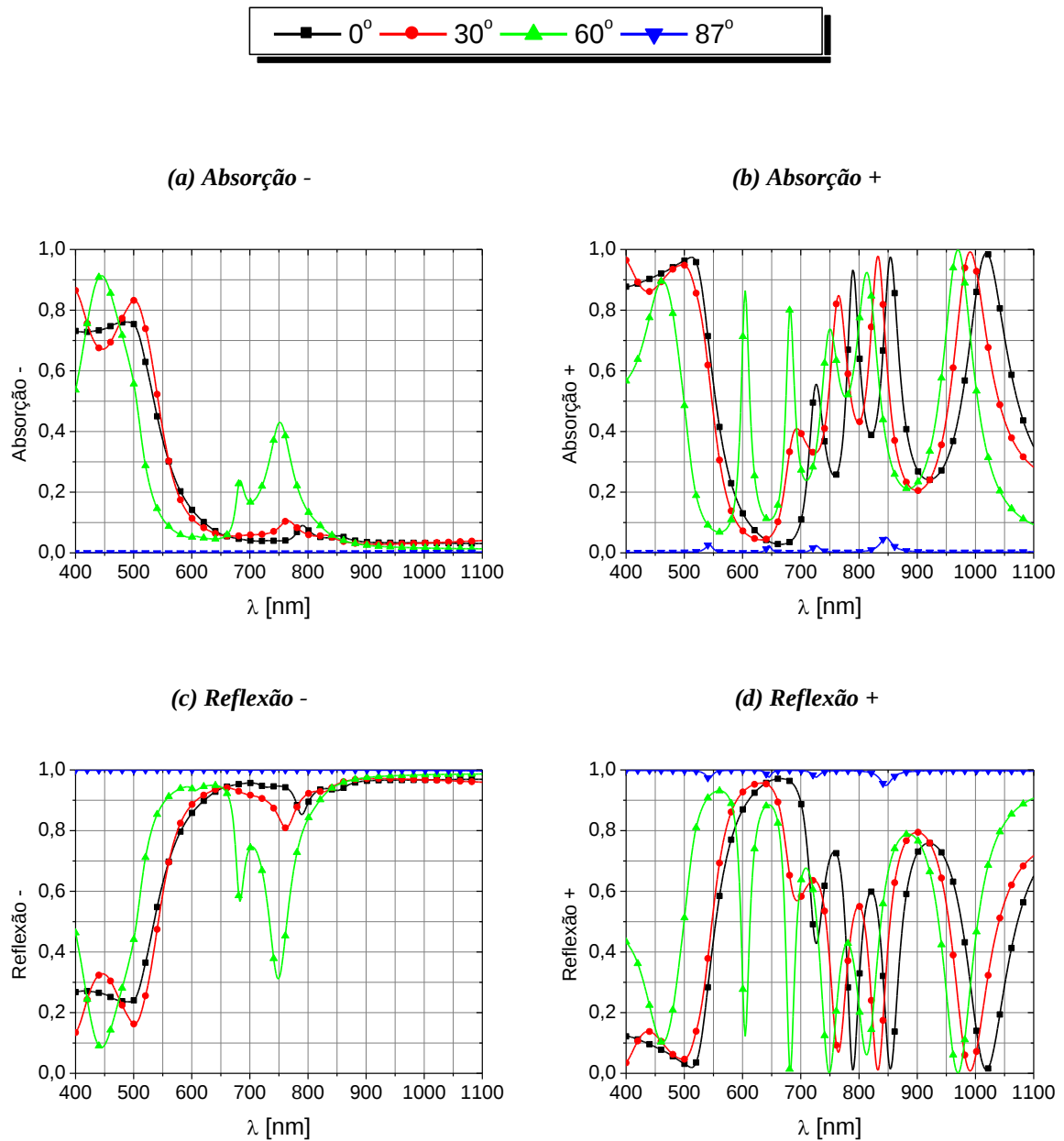


Figura 100: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

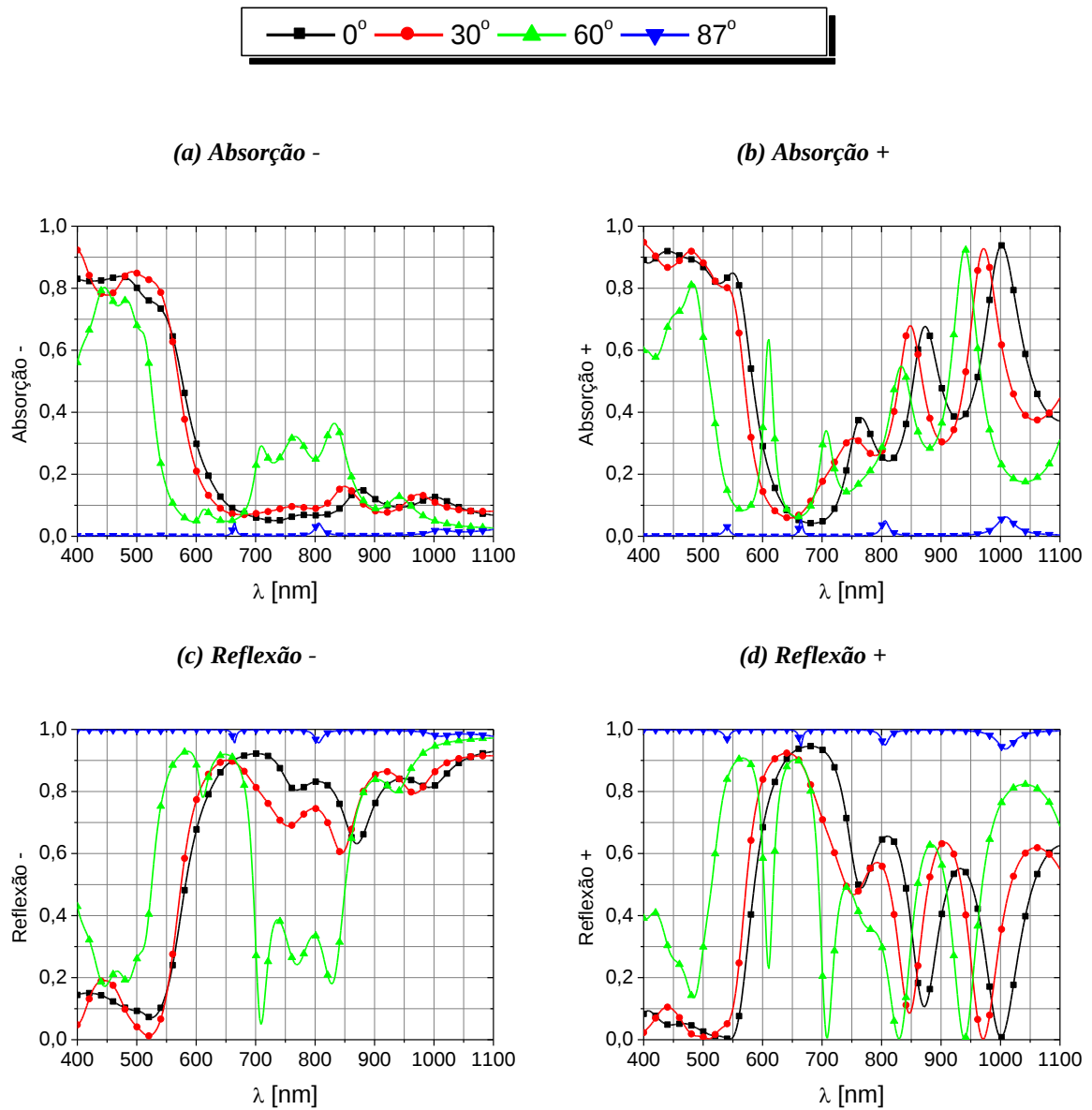


Figura 101: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

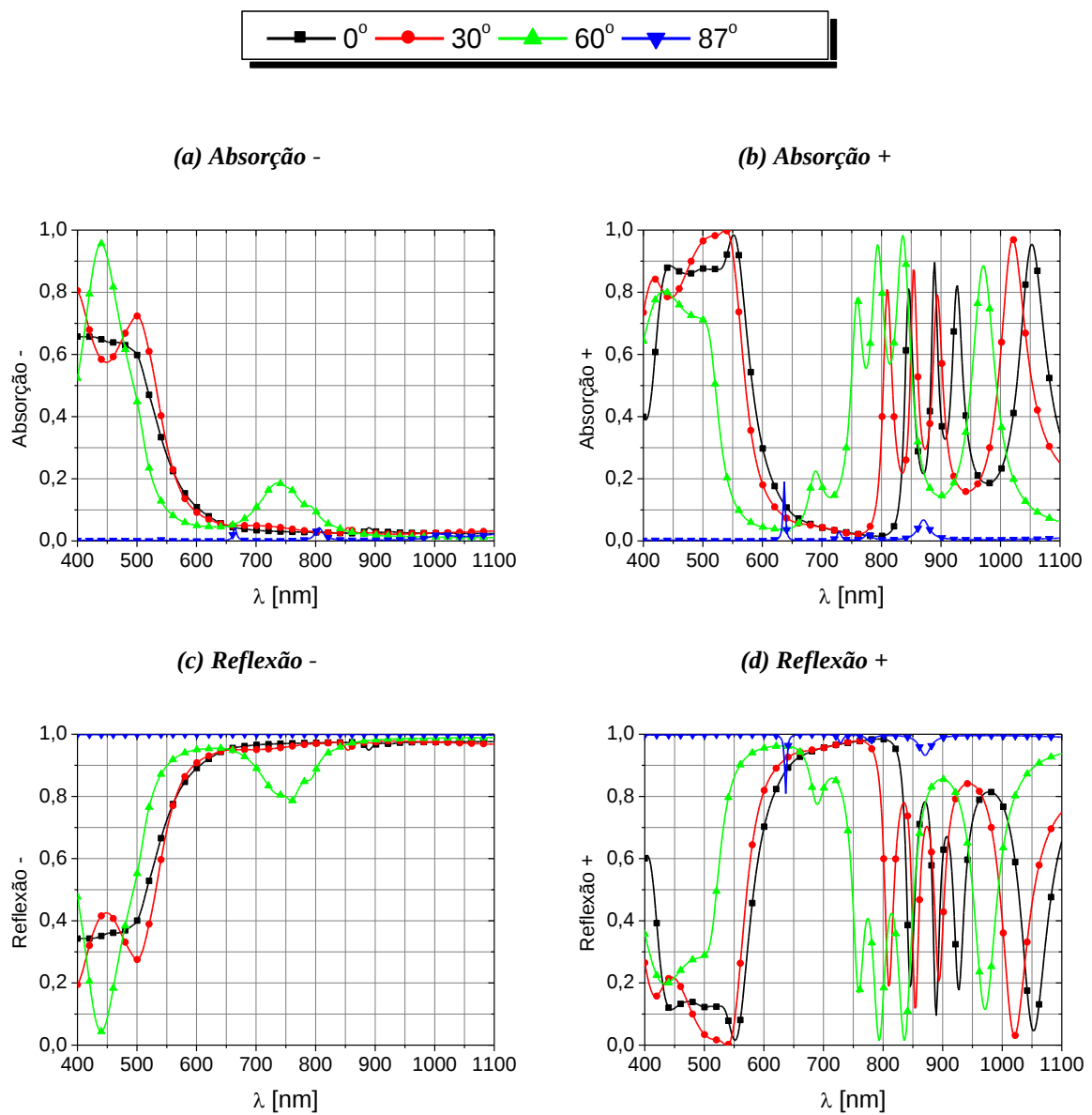


Figura 102: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO₂ - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87°.

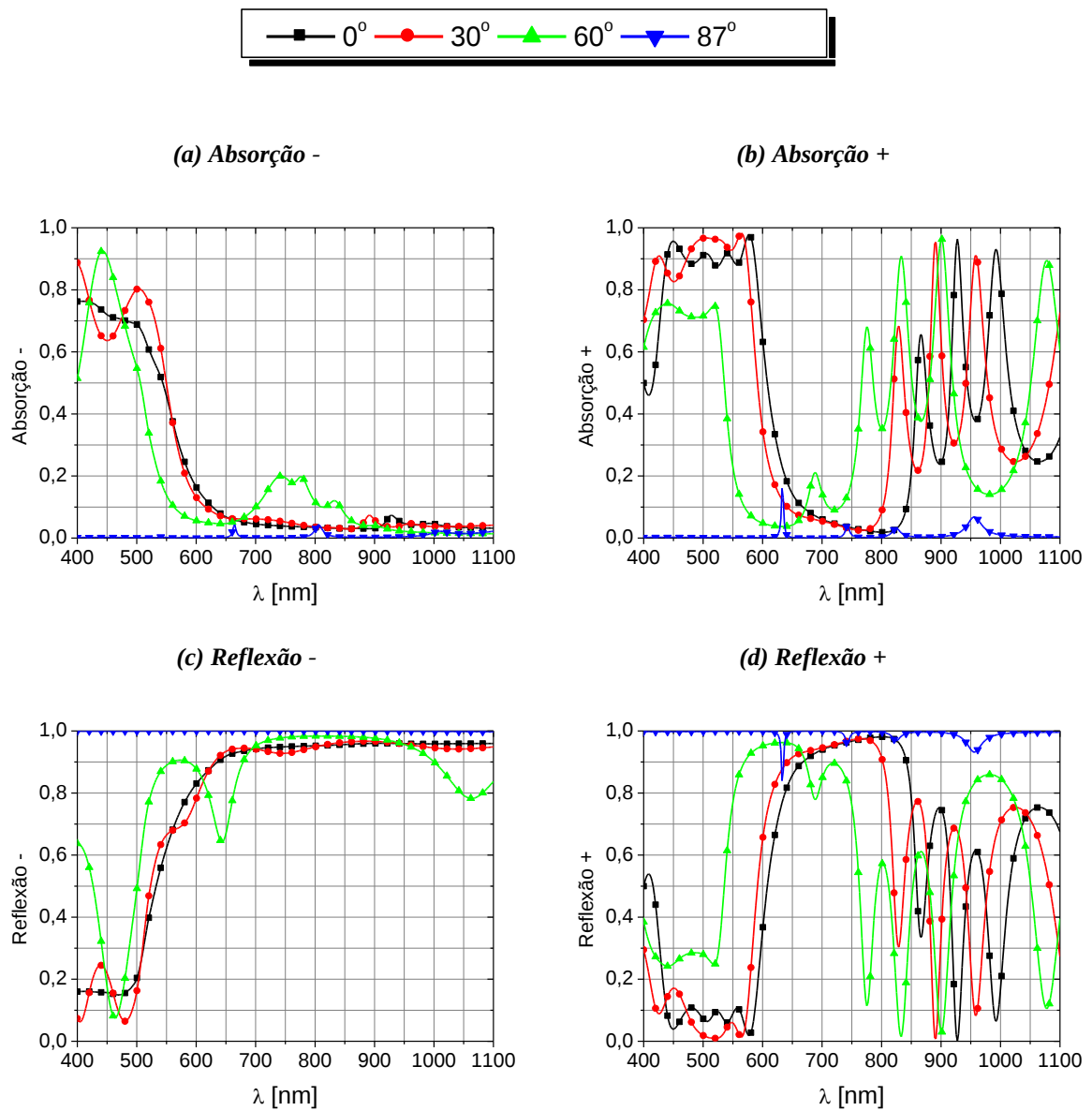


Figura 103: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

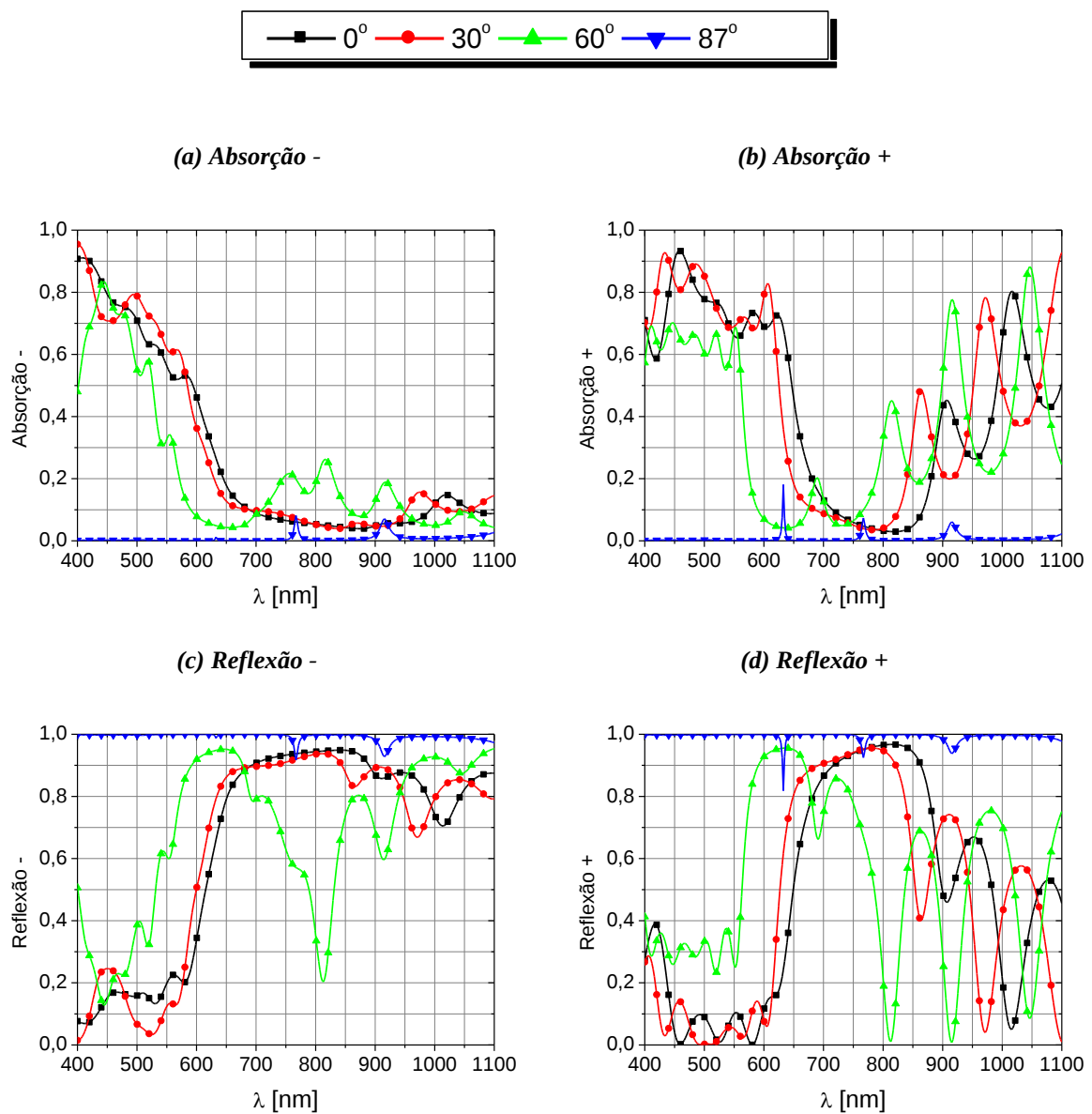


Figura 104: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico- metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

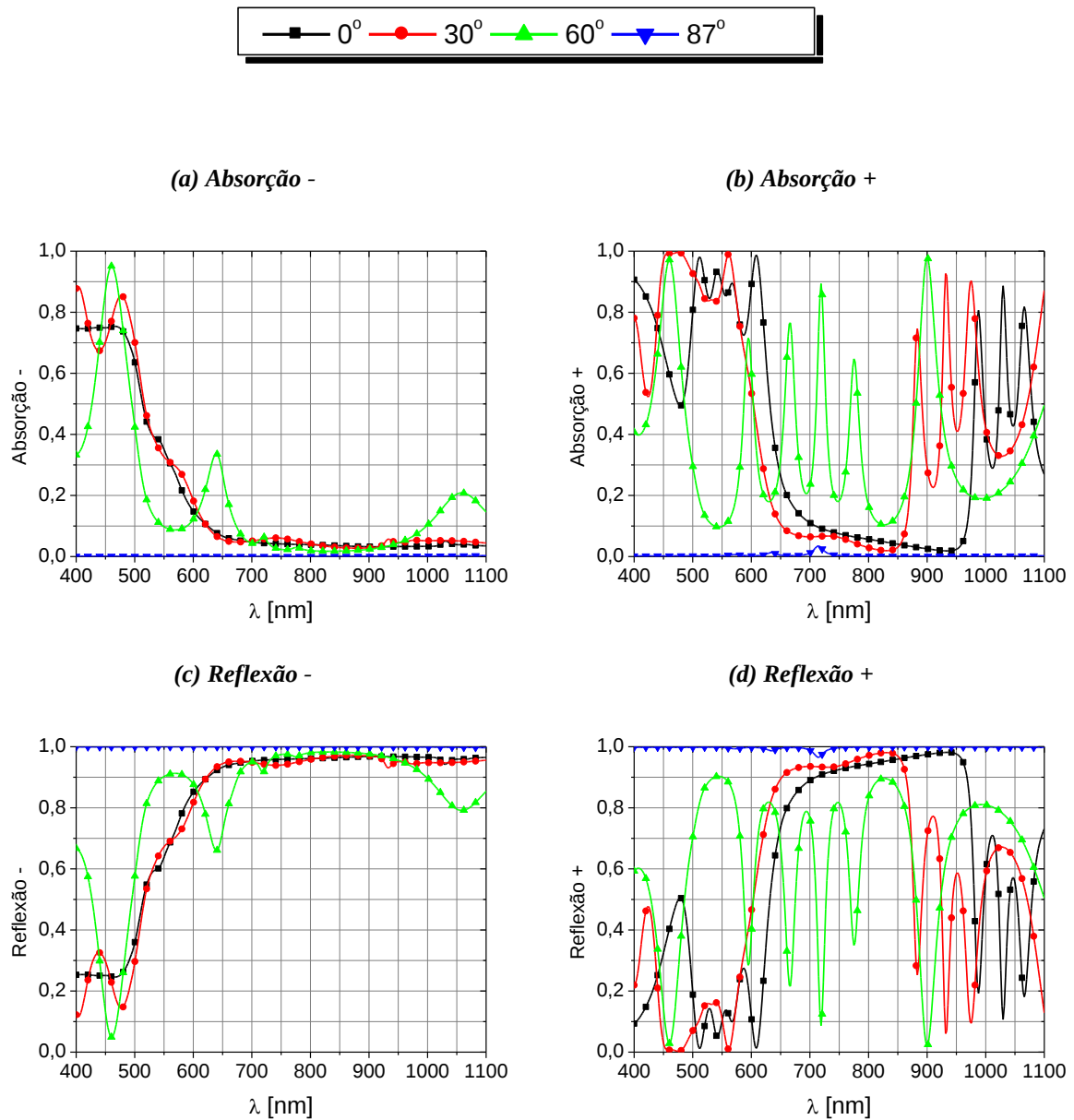


Figura 105: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0,25, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

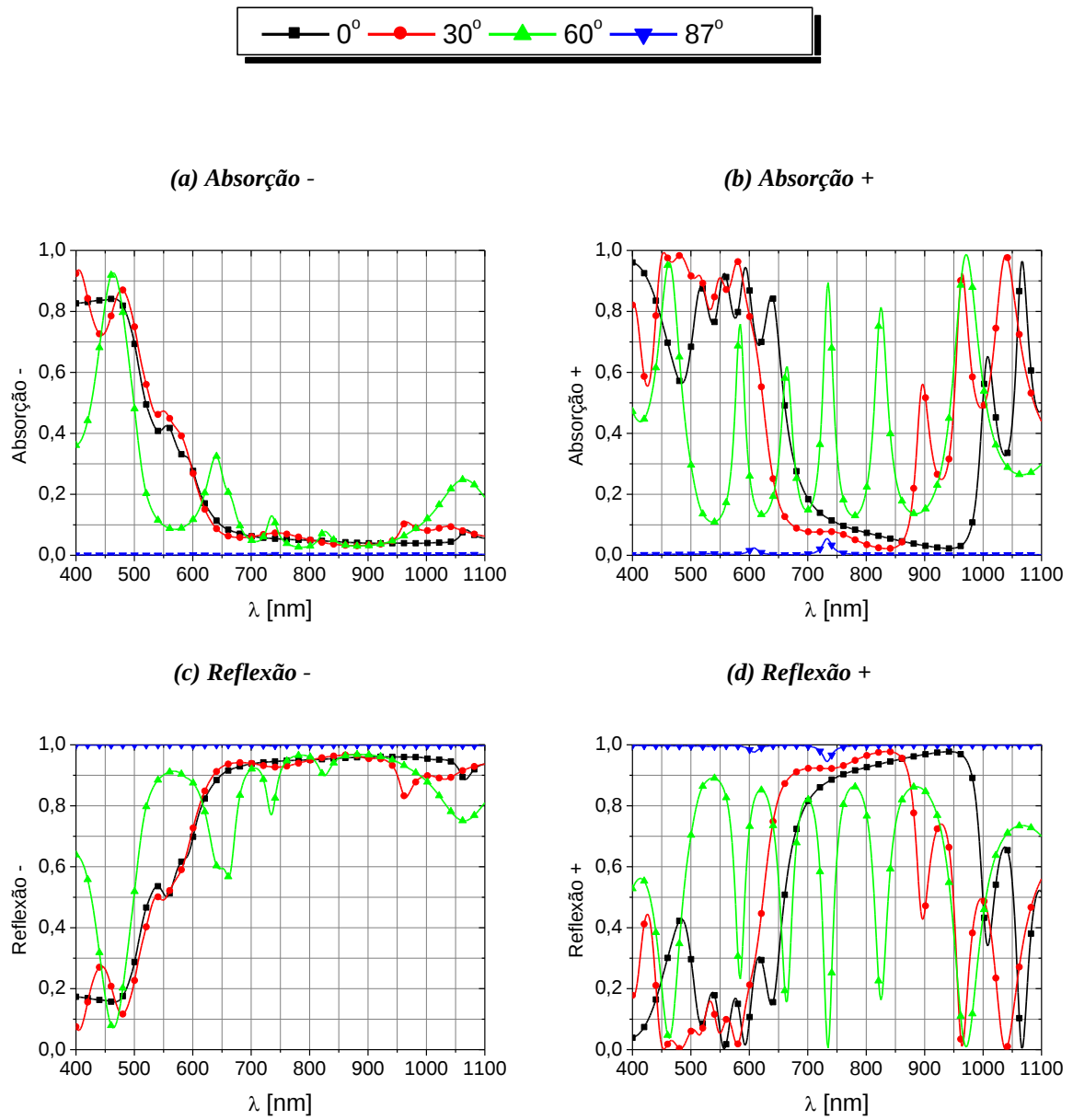


Figura 106: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

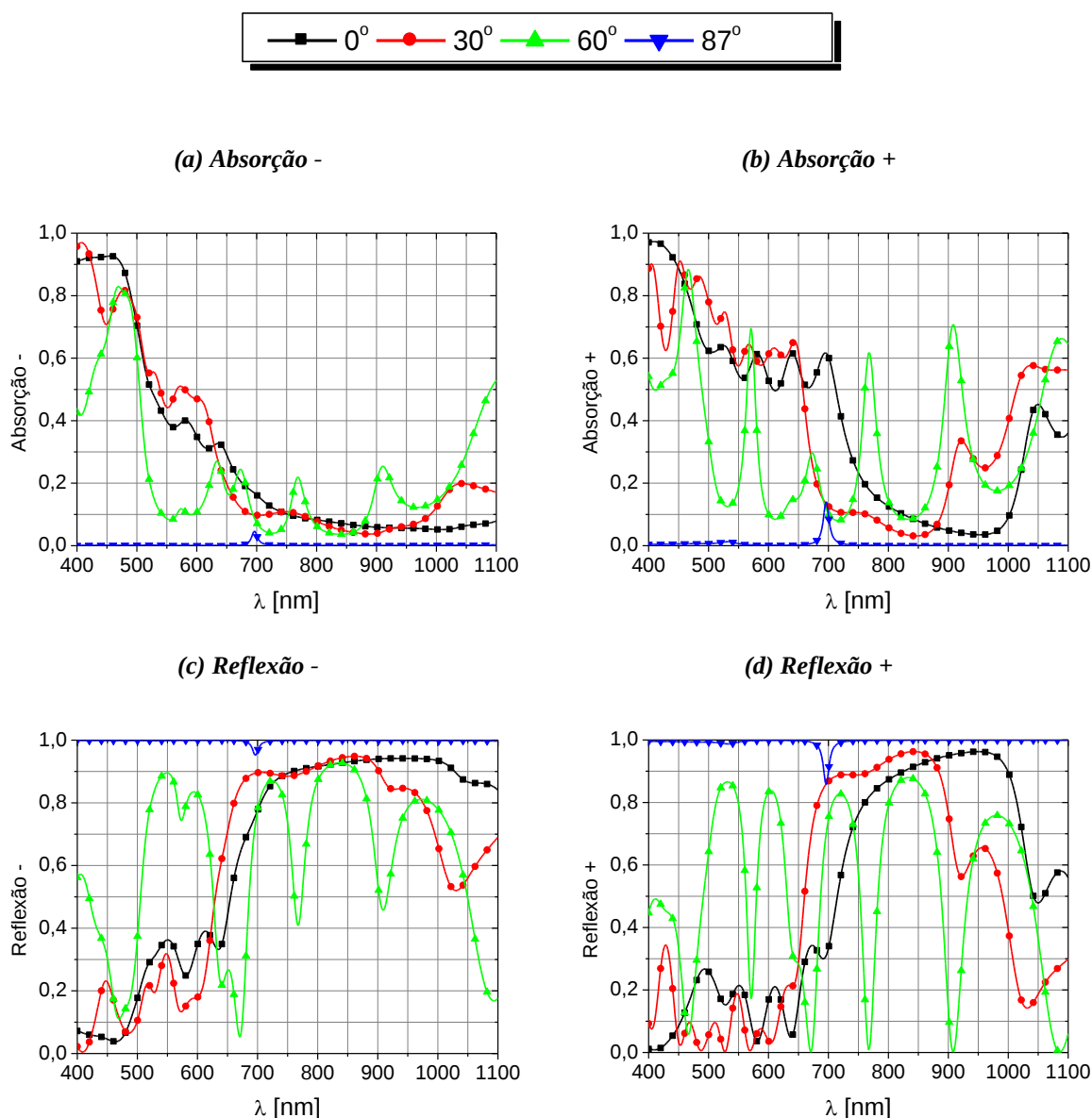


Figura 107: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 - Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=20$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 99 a 107 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de dielétrico-metal (SiO_2 - Au). A fração de preenchimento do dielétrico - metal variou de 0.25 a 0.75 em uma espessura de 20 nm com espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO_2 . O ângulo de incidência foi variado de 0° a 87° no modo transversal elétrico e a estrutura apresenta o comportamento de absorvedor e refletor na faixa do infravermelho e visível.

Para os resultados de $L=200$ apresentados na Figura 99, onde a maior parcela da estrutura é de metal, o desempenho de absorvedor quase perfeito é observado em alguns comprimentos de onda. A resposta de absorção com propagação para esquerda apresentou para o ângulo de 60° potência acima de 92 % entre 400 nm e 450 nm, já na propagação para direita, 99 (b), foram observadas várias oscilações por todo o comprimento de onda analisado. Entre 850 e 900 nm os ângulos de 30° e 60° demonstraram o comportamento de absorvedor quase perfeito com fração de potência acima de 97 %. A assimetria na absorção pode ser observada por diversos pontos como os que demonstram absorções acima de 98 % e abaixo de 10 % a depender do sentido de propagação e ângulo incidido. Em 99 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, em ambos os casos o comportamento de refletor dos 400 aos 550 nm não apresentam resultados acima de 80 % e a partir dos 600 nm começam a existir maiores reflexões acima de 98 %. Na propagação para esquerda todos os ângulos apresentam um comportamento acima de 97 % no intervalo de 850 nm a 1100 nm, já a propagação para direita obteve oscilações a depender do ângulo de incidência e comprimento de onda analisado, se fixado o intervalo de 600 a 650 nm para os ângulos de 30° é observado que a estrutura pode ser utilizada como espelho com reflexões acima de 95%.

Ainda com $L=200$, mas com metade do preenchimento de metal e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 99 (b), em 100 (b) a estrutura possui comportamento similar, onde é possível obter absorvedores quase perfeitos em variados comprimentos de onda e ângulos de incidência, com valores acima de 98% na região do infravermelho. Na região do visível no intervalo de 400 nm e 500 nm, o ângulo de 30° chega a 93% de absorção da estrutura, na região do infravermelho foram analisados vários picos com um absorvedor quase perfeito entre 950 nm e 1050 nm para as incidências de 30° e 60° . A absorção para esquerda 100 (a) mantém resultados semelhantes a 99 (a) com sua absorção máxima abaixo de 83% nos comprimentos de ondas da região do visível e abaixo de 10% na maior parte da região do infravermelho. A reflexão em ambos os sentidos de propagação também mantém resultados similares ao preenchimento anterior, com reflexão em 100 (c) no intervalo de 850 nm a 1100 nm acima de 96 % independente do ângulo incidido na estrutura. A propagação para direita (d) possui novamente entre 600 e 700 nm o maior pico para as incidências de 30° com frações acima de 95%. Na configuração com menor parcela de metal, 15nm de SiO_2 e 5 nm de Au, Figura 101, foram obtidas frações de potências menores que as demais configurações para ambas as variáveis e sentido de propagação.

Para $L=250$, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de dielétrico de 0.25 na Figura 102, não demonstraram alterações

relevantes quando comparadas ao mesmo preenchimento de metal, mas com $L=200$ na Figura 99. Em 102 (a) a absorção chegou a 94 % para o ângulo de 60° entre 400 nm e 450 nm, já a propagação para direita no intervalo de 500 a 600 nm obteve um absorvedor quase perfeito com 98% de absorção. A propagação para esquerda em 102 (c) mostrou que a partir dos 900 nm a estrutura pode ser considerada um refletor em qualquer um dos ângulos de incidência analisados, com frações de potência acima de 97 %. A reflexão para direita, no entanto, possui uma variação nos ângulos podendo ser utilizada como refletor em alguns pontos específicos, como no intervalo de 550 nm a 650 nm para o ângulo de 60° que apresenta as melhores respostas de reflexão, já na faixa de 650nm a 750 nm o ângulo de 30° possui as maiores frações de potência.

O comportamento ocorre semelhante para $L=250$ com preenchimentos de 0.5 e 0.75, Figuras 103 e 104 respectivamente, a absorção com propagação para a direita possui diversos picos em ambos os casos como em 103 (b), onde na faixa de 500 nm a 600 nm para o ângulo de 30° são obtidas absorções acima de 90 %. A absorção com propagação para a esquerda tem a melhor resposta em 103 (a) para 60° e em 104 (a) para 30° , onde conseguem alcançar a fração acima de 90 % no início da faixa do visível. A reflexão para em ambos os sentidos de propagação em 103 e 104 apresentam comportamentos semelhantes com oscilações ao longo do comprimento de onda.

Para $L=300$, das imagens 105 a 107, a estrutura manteve oscilações com pontos de absorção e reflexão, tendo os melhores resultados para os preenchimentos de 0.25 e 0.5 de dielétrico com maiores ou iguais parcelas de metal. Em 105 (b) a absorção no intervalo de 450 a 600 nm teve dois picos acima de 98 %, comportamento semelhante em 106 (b) para os intervalos de 450 a 500 nm e 1000 nm a 1100 nm. A reflexão também em ambos os casos apresentaram similaridade (na reflexão para direita), onde entre 700 nm e 850 nm na reflexão para direita obteve fração de potência acima de 90 % para o ângulo de 30° .

- Estrutura composta por dielétrico- metal, $\text{SiO}_2\text{-Au}$, separadas pelo dielétrico SiO_2 , com variação do comprimento de onda na faixa do visível ao IR de 400-1100nm. Os parâmetros L variaram de 200nm a 300nm em passos de 50 nm. Os parâmetros de dielétrico metal variaram de 0.25 a 0.75 com um total de 30 nm. Modo de incidência TE, com variação angular de 0° a 87° .

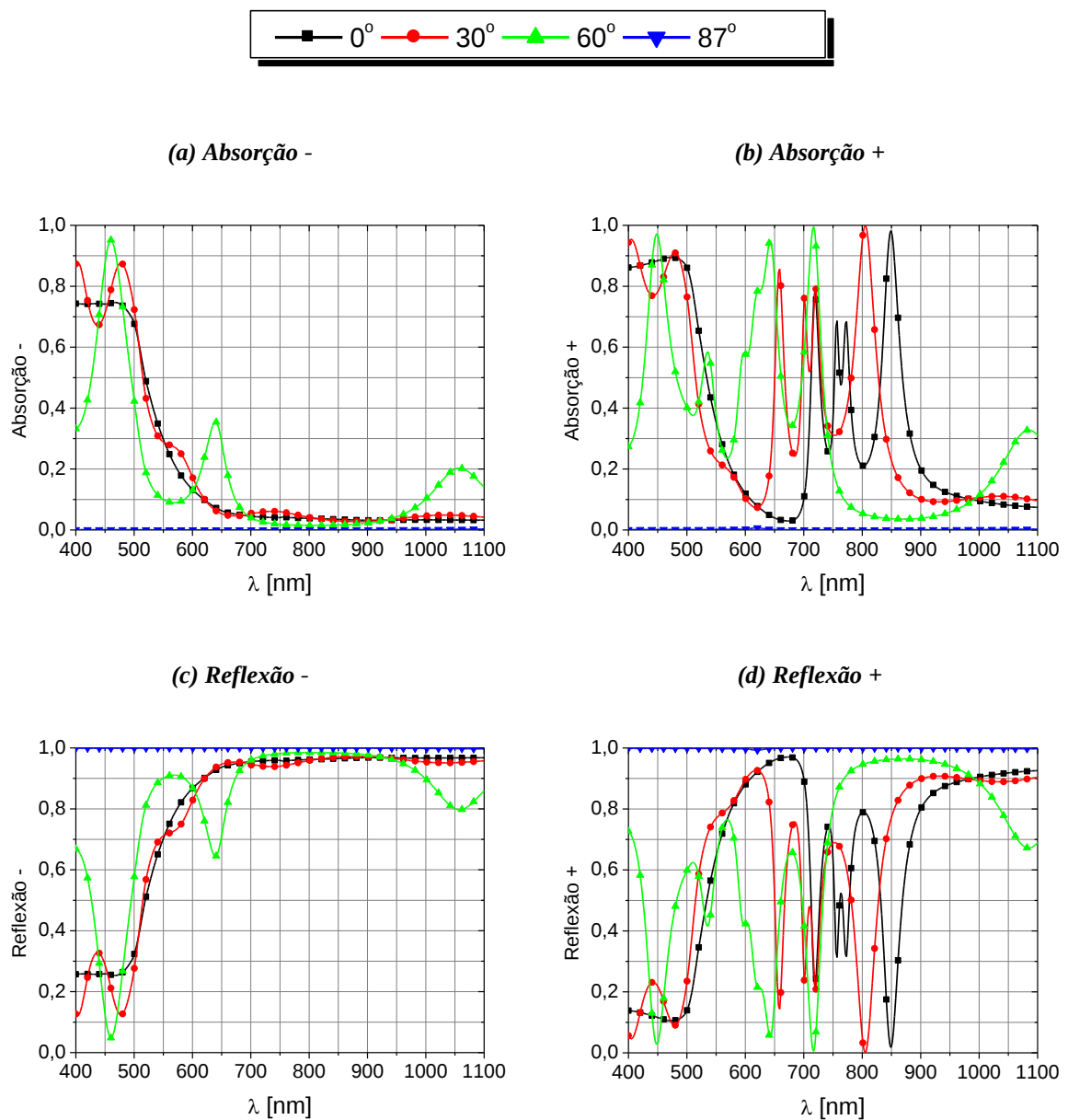


Figura 108: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200 \text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=30 \text{ nm}$ e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

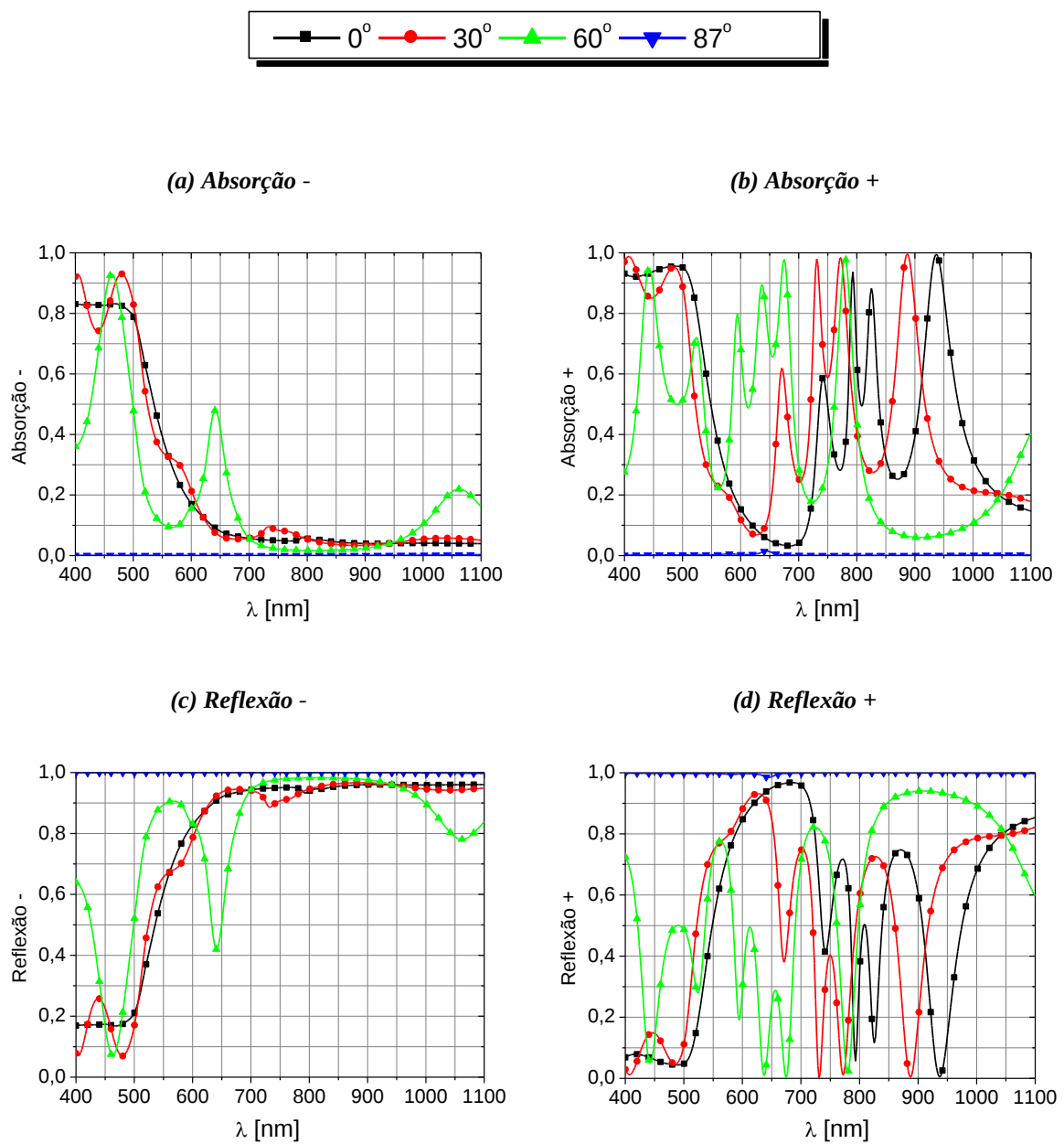


Figura 109: Propagação no metamaterial de Fibonacci de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

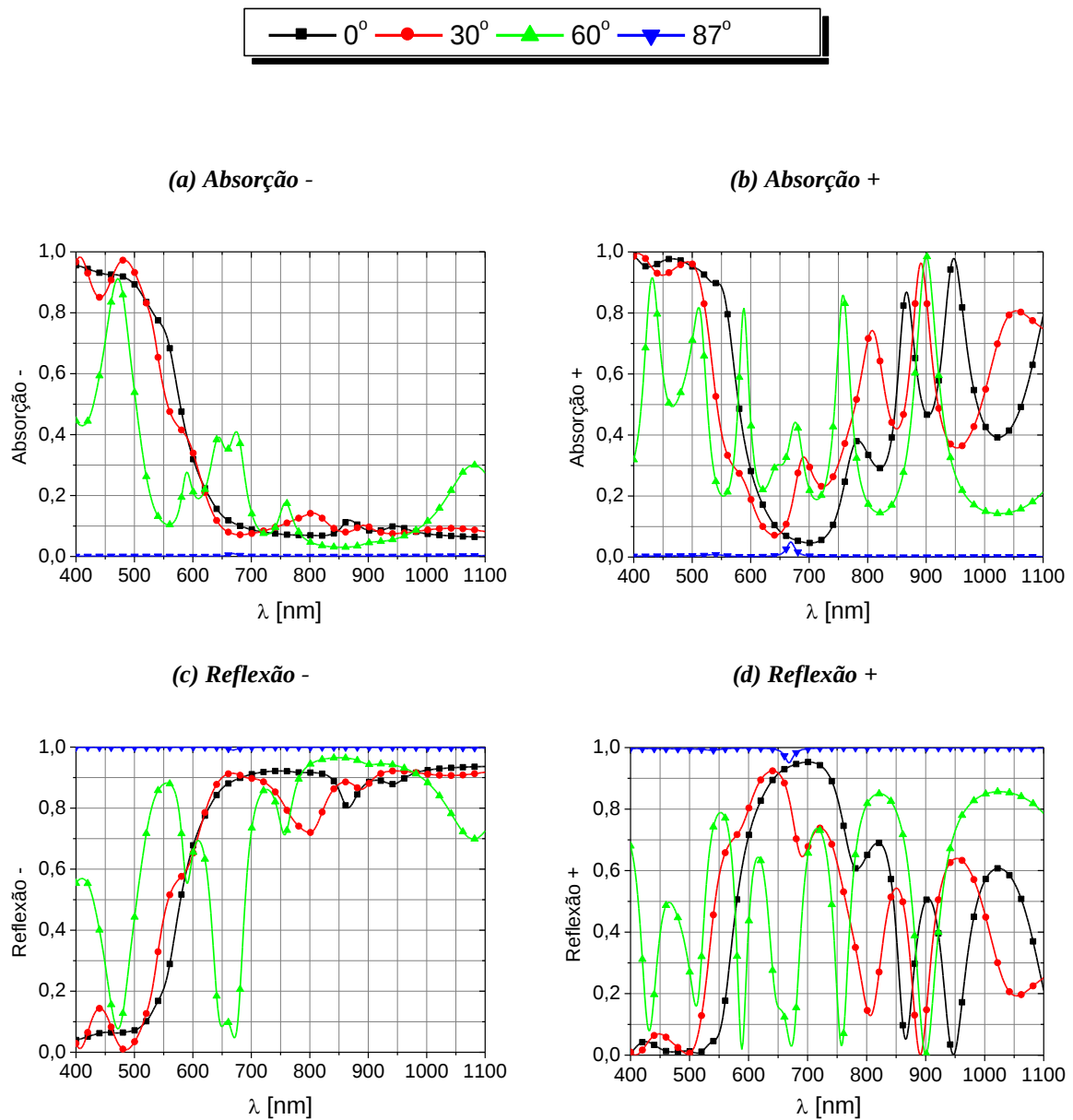


Figura 110: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 200$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

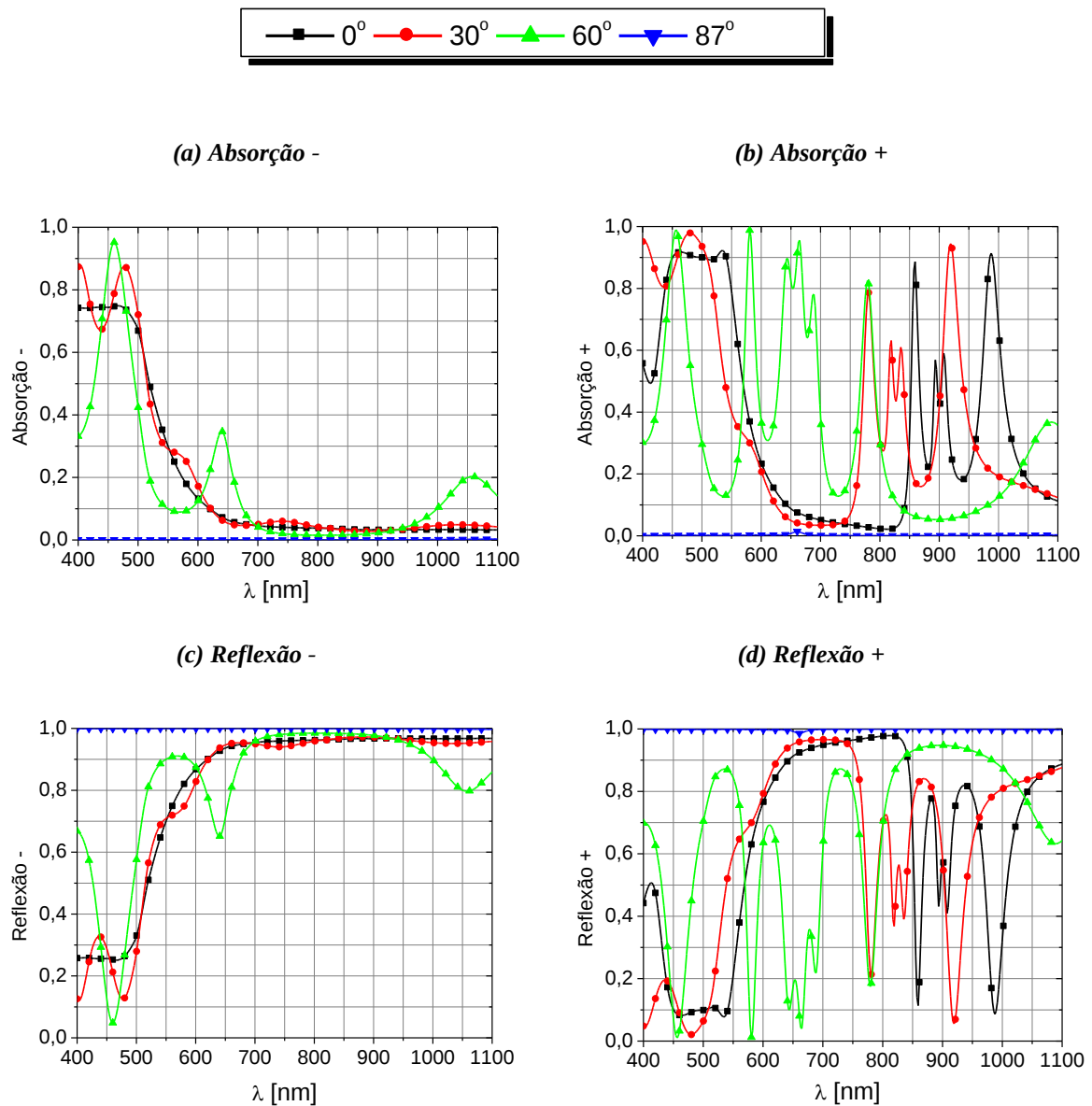


Figura 111: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0,25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

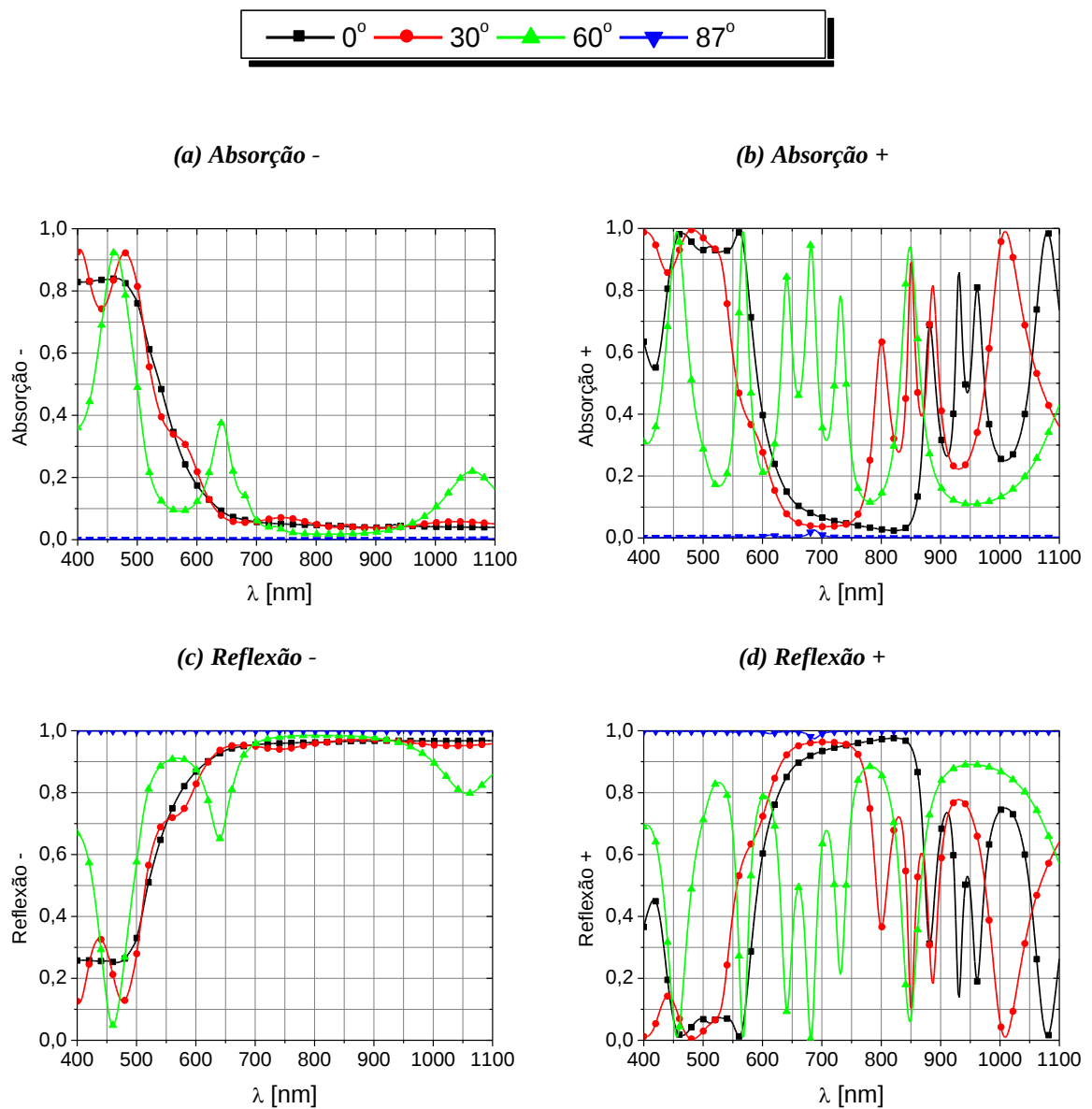


Figura 112: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

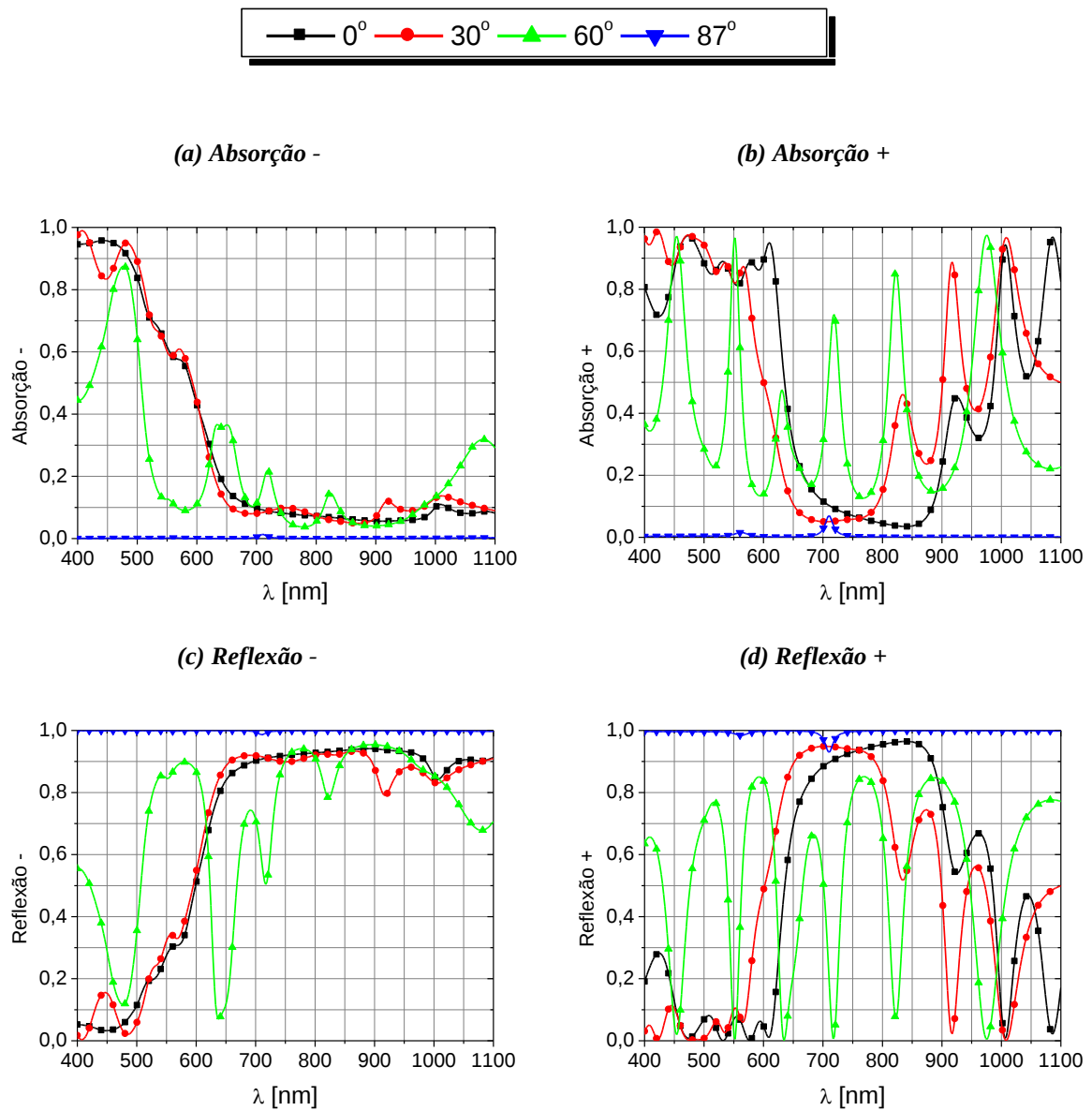


Figura 113: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 250$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

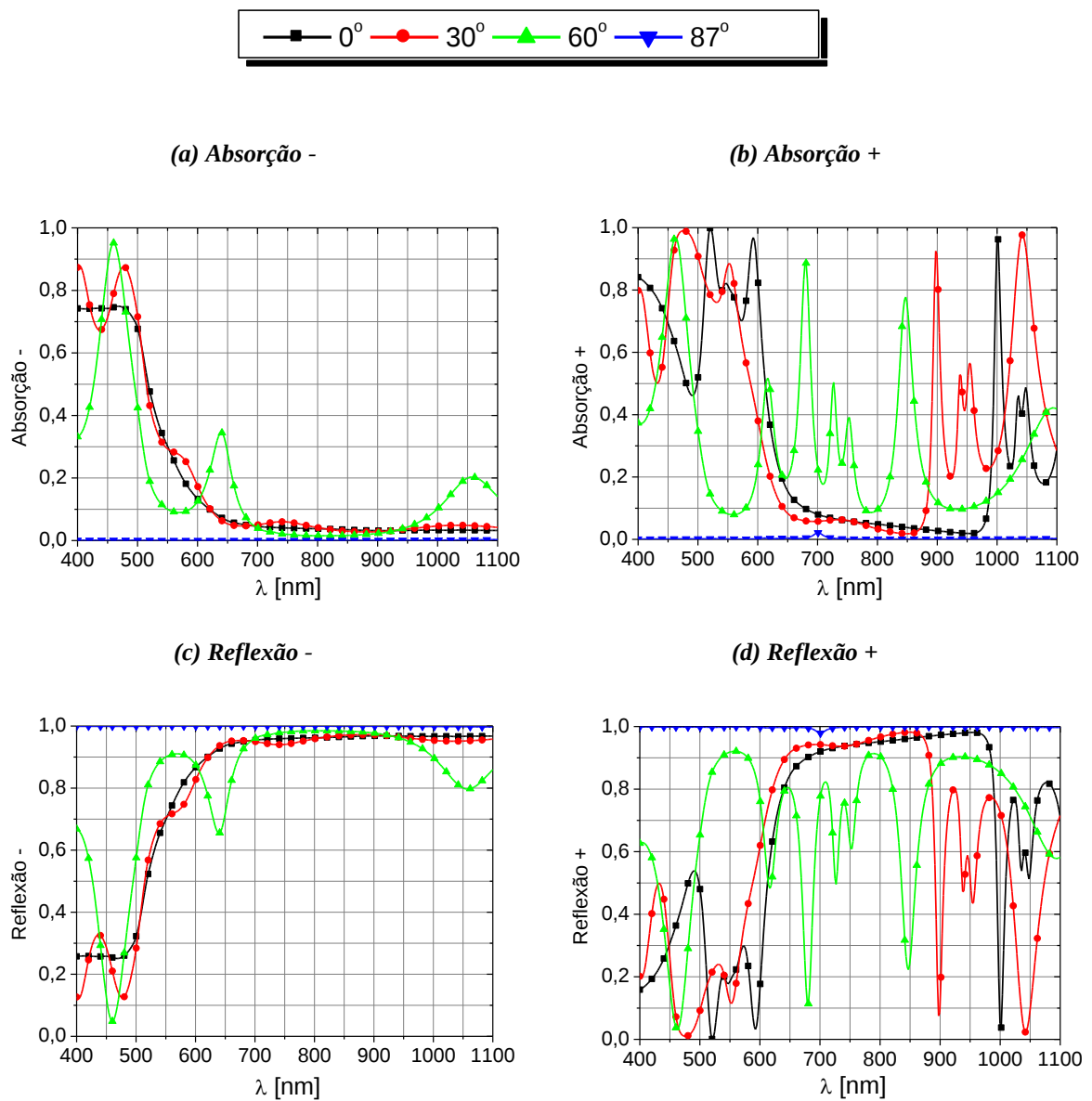


Figura 114: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.25, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

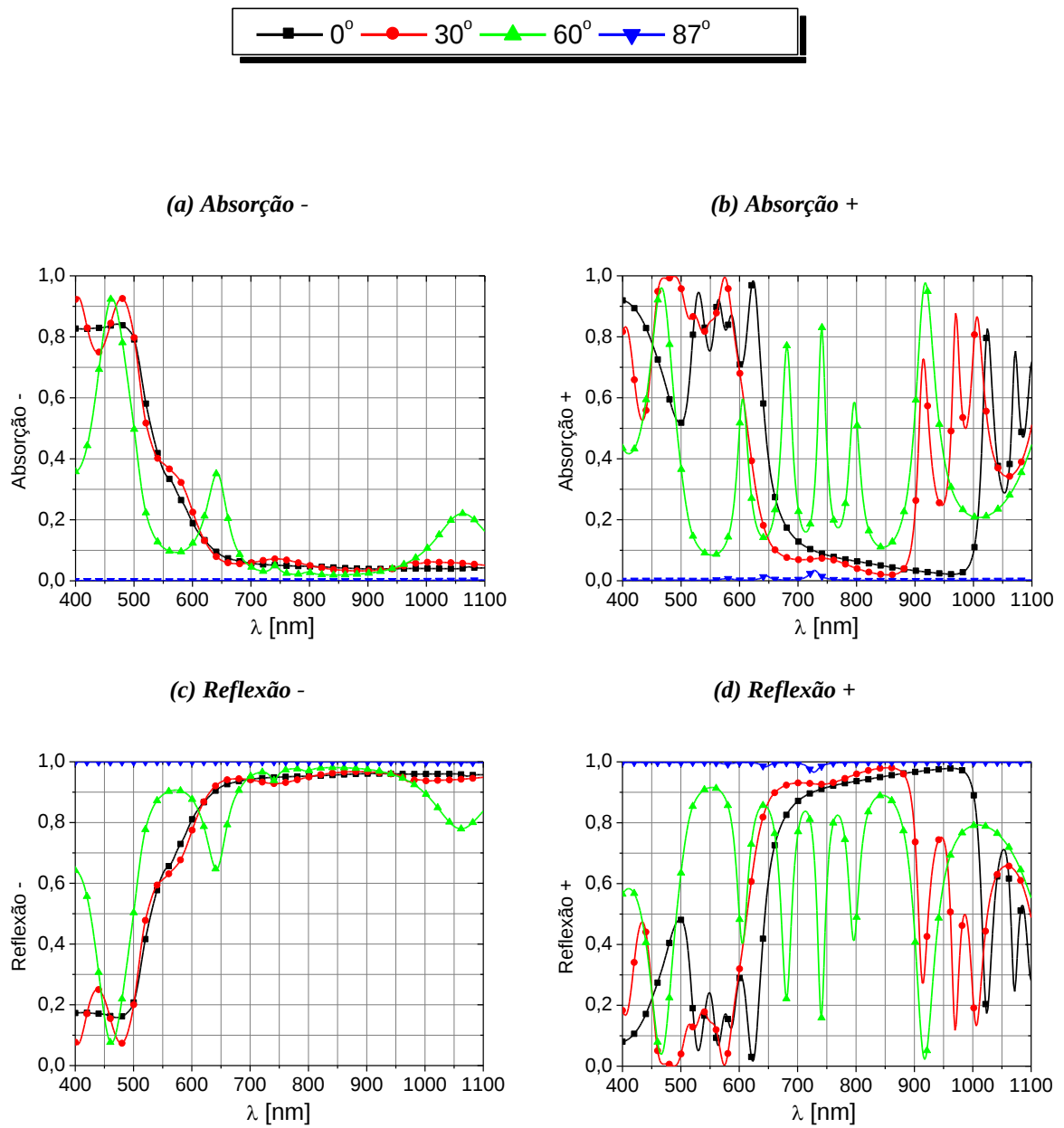


Figura 115: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300$ nm e variação do dielétrico-metal de 0.50, $d=30$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

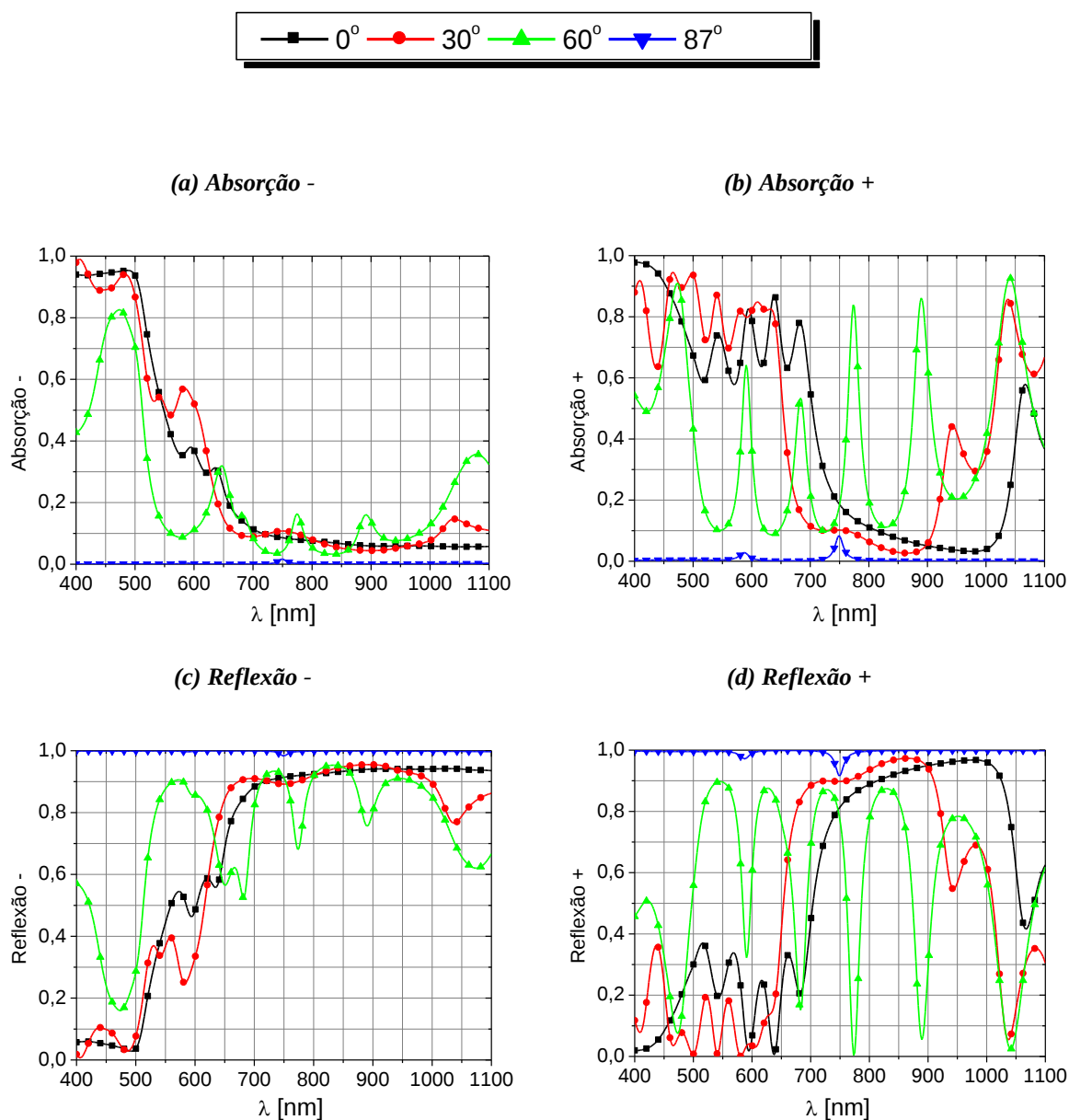


Figura 116: Propagação no metamaterial de Fibonacci SiO_2 -Au em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 300 \text{ nm}$ e variação do dielétrico-metal de 0.75, $d=30 \text{ nm}$ e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 108 a 116 apresentam os resultados de propagação da estrutura do hiper cristal com multicamadas alternadas de dielétrico - metal (SiO_2 -Au). A fração de preenchimento do dielétrico-metal variou de 0.25 a 0.75 em uma espessura de 30 nm com

espaçamentos de 200 a 300 nm preenchidos por SiO₂. O ângulo de incidência continuou sendo variado de 0° a 87° no modo TE.

Em 108 são apresentados os resultados de absorção e reflexão da estrutura com a parcela de 0.25 de dielétrico e 0.75 de metal na faixa do visível e no infravermelho. Na Figura 108 (a) no intervalo de 450 nm a 500 nm para o ângulo de 60 ° é possível observar o comportamento de absorvedor da estrutura. Para a propagação para direita na Figura 108 (b) esse mesmo comportamento é observado em diversos picos para os ângulos de 30° e 60 ° nos intervalos de 700 nm a 750 nm e entre 800 nm e 850 nm respectivamente. A assimetria na absorção pode ser observada em torno dos 700 nm aos 900 nm, onde na propagação para esquerda a fração de potência não ultrapassa os 10% e na propagação para direita são atingidos picos em variados comprimentos de onda e variações angular. Em 108 (c) e (d) são obtidos os comportamentos de reflexão da estrutura, para a propagação para esquerda todos os ângulos atingem a frações de potência acima de 95 % entre os 700 nm e 950 nm, o que permite uma alta reflexão independente do ângulo incidido na estrutura.

Com metade do preenchimento de metal na estrutura do metamaterial e metade de dielétrico é observado que comparado com a Figura 108 (b), 109 (b) demonstra resultados semelhantes com absorção acima de 98% no intervalo de 750 a 800 nm para as incidências de 30° e 60 °. A reflexão em ambos os sentidos de propagação também mantém resultados similares ao preenchimento anterior, com a propagação para esquerda (c) com valores acima de 90 % dos 800 nm aos 950 nm independente do ângulo incidido na estrutura e propagação para direita (d) com reflexão em torno de 92 % para 30 e 60 °.

Na configuração com maior parcela de dielétrico (Figura 110), 22.5 nm de SiO₂ e 7.5 nm de Au, a propagação para direita obteve manteve altas frações de potências, como em 900 nm para o ângulo de 60°. A propagação para a esquerda em 110 (a) teve aumento de fração de potência, alcançando frações acima de 96 % até os 550 nm para 30 °. As reflexões em ambos os sentidos de propagação mantém o comportamento com respostas similares aos apresentados para L=200, no entanto com frações de potência menores.

Para L=250, aumentado a separação entre as camadas de metamaterial, as respostas de propagação com fração de dielétrico de 0.25 na Figura 111 demonstram o comportamento de absorvedor e espelho da estrutura. Em 111 (b) os ângulos de 30° e 60° obtiveram picos com fração de potência acima de 96%, ainda em (b) percebe-se que a estrutura mantém a assimetria na faixa do infravermelho com picos alternados ao longo do comprimento de onda com absorções acima de 90 %. Para a reflexão em ambos os sentidos de propagação, 111 (c) e (d) os ângulos de 30 e 60° mostram pontos com frações de potência acima de 95 %. Em 111 (c), a

fração de potência independente do ângulo de incidência é maior que 94% no intervalo de 700 nm a 950 nm, já em 111(d) na faixa de 650 nm a 750 nm o ângulo de 30° atinge mais que 95 % de reflexão na estrutura. No preenchimento de 0.5 ainda em L=250, Figura 112, as respostas de propagação de absorção e reflexão mesmo similares aos de L=200, (Figura 109), mostram leves aumentos de frações de potência, com absorção em 112 (b) acima de 90% nos ângulos de 0° e 30 ° entre 400nm e 600 nm e reflexão em 75 (d) com pico de 99% entre 450 e 500 nm no ângulo de 30°. Em L=250 preenchimento de 0.75, Figura 113, ocorre redução da absorção e reflexão comparados a L=200 (Figura 110).

Para L=300, das imagens 114 a 116, quando comparadas a L=250 não se notam muitas disparidades dos resultados, a estrutura continua apresentando assimetria e variações de potência de absorção e reflexão, mantendo a possibilidade de ser utilizada como um absorvedor ou refletor seletivo.

4.4.3 Análise dos campos

Visando obter uma compreensão do desempenho da estrutura hiper cristal de Fibonacci, o comportamento da distribuição do campo em alguns picos de absorção e reflexão foram analisados nos modos TE e TM na estrutura de Fibonacci composta por metal dielétrico (Au-SiO₂). Na figura 117, são obtidos os comportamentos no modo TE onde em (a), (c) e (e) a estrutura atua como um espelho altamente refletivo em que o campo se intensifica até a metade da estrutura, no entanto, com excitações nas combinações de metal e dielétrico. Já nas figuras (b), (d) e (f) para absorções quase perfeitas o campo se mantém até a metade da estrutura sem variação da intensidade. Em 118, são obtidos os comportamentos correspondentes ao modo TM, onde a estrutura também atua como espelho em (a), (b) e (c). Com comportamento similar ao modo TE, o campo novamente se intensifica na metade da estrutura, no entanto é possível observar que o campo é menor em comprimentos de onda >1000 nm. Em (b), (d) e (f) são observados os comportamentos de absorvedores na estrutura em que o campo se mantém estável por toda parte inicial da estrutura similar ao modo transversal elétrico.

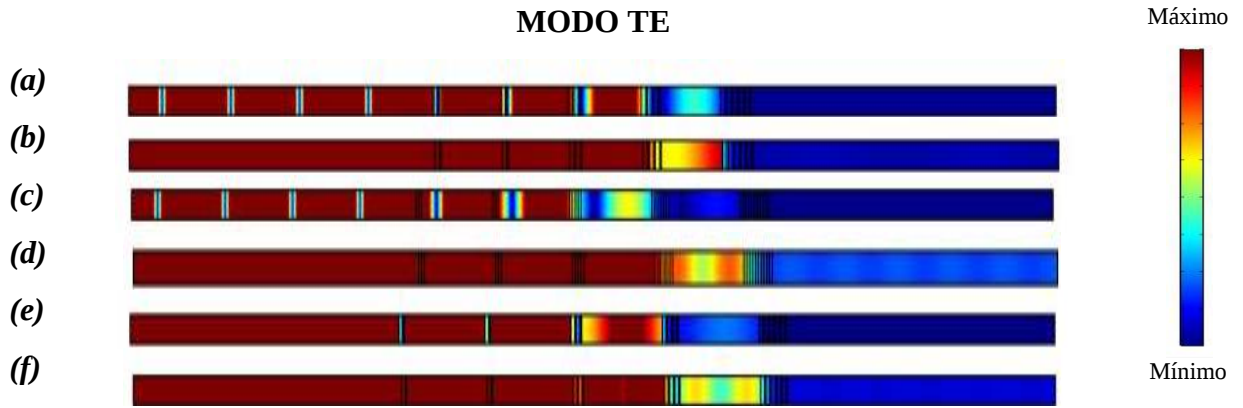


Figura 117: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 657$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.75 e ângulo de incidência de 0° ; (b) $\lambda = 760$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.75 e ângulo de incidência de 60° ; (c) $\lambda = 690$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ;(d) $\lambda = 473$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 830$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° ; (f) $\lambda = 470$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° .

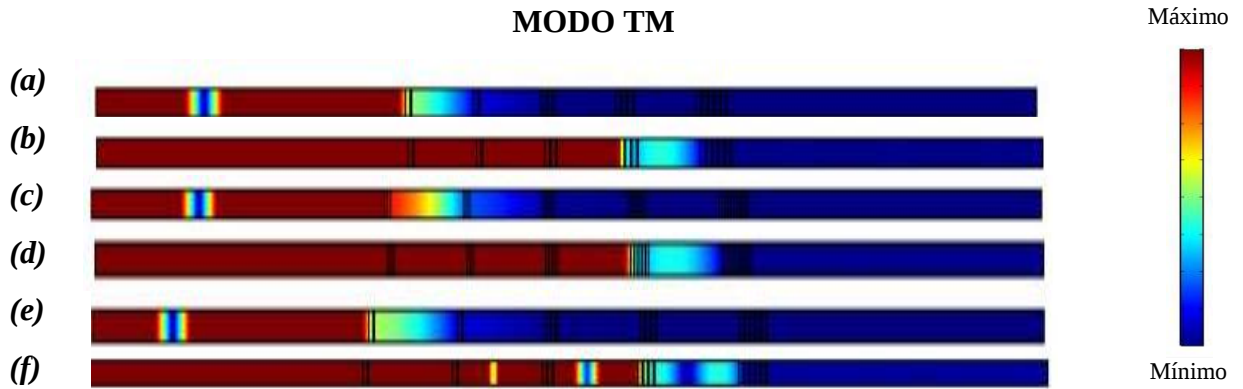


Figura 118: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 1000$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.75 e ângulo de incidência de 60° ; (b) $\lambda = 793$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.75 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 1004$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 60° ;(d) $\lambda = 1017$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 1080$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 60° ; (f) $\lambda = 550$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.75 , e ângulo de incidência de 30° .

O comportamento da distribuição do campo em alguns picos de absorção e reflexão também foram analisados nos modos TE e TM na estrutura de Fibonacci composta por metal dielétrico (SiO₂-Au). Na figura 119, são obtidos os comportamentos no modo TE onde em (a), (c) e (e) com resultados semelhantes aos apresentados anteriormente, a estrutura atua como um espelho altamente refletivo em que o campo se intensifica até a metade da estrutura, no entanto, com excitações nas combinações de metal e dielétrico. Nas figuras (b), (d) e (f) para absorções quase perfeitas o campo se mantém até a metade da estrutura sem variação da intensidade. Em 120, são obtidos os comportamentos correspondentes ao modo TM, onde a estrutura também atua como espelho em (a), (b) e (c), nesta análise percebe-se que para comprimentos de onda menor que < 1000 nm o campo se mantém pela maior parte da estrutura, com excitações na divisão do metal e dielétrico. O modo TM também apresenta similaridade nos resultados apresentados anteriormente, o campo novamente se intensifica na metade da estrutura, no entanto as excitações nas combinações de metal e dielétrico são ligeiramente maiores que no modo analisado anteriormente. Em (b), (d) e (f) são observados os comportamentos de absorvedores na estrutura em que o campo se mantém estável por toda parte inicial da estrutura similar ao modo transversal elétrico.

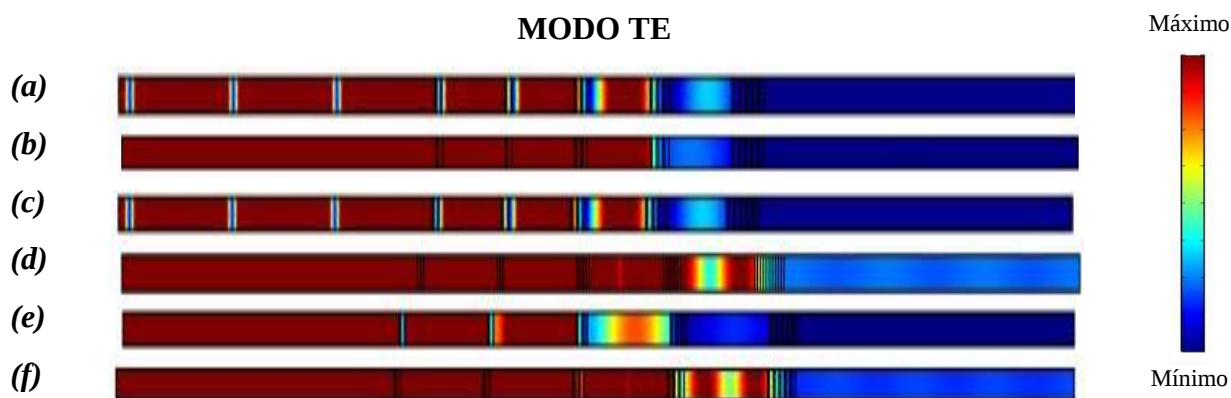


Figura 119: Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 655$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.25 e ângulo de incidência de 0° ; (b) $\lambda = 889$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.25 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 802$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ;(d) $\lambda = 564$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 30° ; (e) $\lambda = 881$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° ; (f) $\lambda = 492$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° .

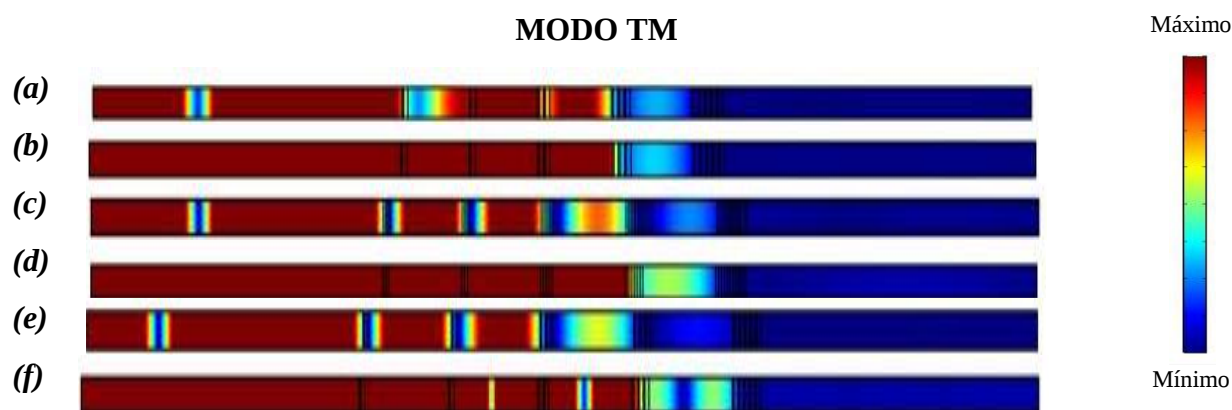


Figura 120 : Campo Elétrico na estrutura de Fibonacci em (a) $\lambda = 697$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm, variação de 0.25 e ângulo de incidência de 60° ; (b) $\lambda = 837$ nm $d=20$ nm, $L=200$ nm , variação de 0.25 e ângulo de incidência de 30° ; (c) $\lambda = 802$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 0° ; (d) $\lambda = 650$ nm $d=20$ nm, $L=250$ nm, variação de 0.5 , e ângulo de incidência de 60° ; (e) $\lambda = 758$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 60° ; (f) $\lambda = 582$ nm $d=20$ nm, $L=300$ nm, variação de 0.25 , e ângulo de incidência de 30° .

4.5 Estrutura de Hiper cristal vertical composta por Grafeno

Em 2004, Nosolelov [86], descobriu que por meio de clivagem micromecânica no grafite era possível obter o grafeno, material que até então possuía boas propriedades eletrônicas e permitia a fabricação de dispositivos elétricos, no entanto, as propriedades ópticas do material foram nesse momento pouco estudadas e só foram verificadas em estudos posteriores [84-86]. Com o avanço do estudo dos materiais, autores como Gray [87] e Weber [83] investigaram propriedades ópticas como reflexão e transmissão no grafeno, obtendo resultados inovadores, ampliando suas aplicações e pesquisas.

O grafeno é um material bidimensional de monocamada que consiste em uma estrutura cristalina hexagonal estruturada por átomos de carbono [88-89], este material é estudado para diversas aplicações e entre elas estão os painéis solares com maior eficácia. Este material pode ser obtido do grafite onde na sua composição de 1 mm é possível encontrar 3 milhões de

camadas de grafeno separadas em uma distância de 0.34nm, onde ao ser extraído uma única camada pode se obter o grafeno.

Neste trabalho as propriedades ópticas do grafeno foram estudadas em uma estrutura de um hiper cristal vertical multicamadas contendo metamaterial, dielétrico e um substrato de metal. A simulação da estrutura variou do visível ao infravermelho (400 nm a 1600 nm) com uma onda polarizada no modo TM com variação angular de 0° a 87°. A estrutura é composta pela junção das camadas $d_g + d_a$ alternadas com um período de 10 multicamadas formando o metamaterial hiperbólico e L é o período variado de 100 e 150 nm. A espessura do grafeno (d_g) é de 0.34 nm, onde foram agrupadas 3 camadas do material, o parâmetro d foi variado em 50, 80, 90 e 100 nm, o período de alternância das camadas foi $N= 6$. O dielétrico utilizado na estrutura d_a e em L foi o Si , o índice refrativo do grafeno (d_g) foi obtido em [84] e o substrato foi o Ouro, a variação do comprimento de onda foi na faixa do visível ao IR de 400-1600nm.

A permissividade do grafeno pode ser obtida através de:

$$\epsilon_{Graf(w)} = 1 + \frac{\sigma_{graf(w)}}{w\epsilon_0\delta} \quad (4.1)$$

Onde δ é a espessura do grafeno, 0.34 nm e $\sigma_{graf(w)} = \sigma^{intra}(w) + \sigma^{inter}(w)$ que são as condutividades do grafeno e podem ser obtidas pelo modelo de Kubo [88,89]:

$$\sigma^{intra}(w) = \frac{ie^2k_B T}{k\pi(kw + i2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (4.2)$$

$$\sigma^{inter}(w) = \frac{ie^2}{4\pi k} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (k_w + i2\Gamma)}{2|\mu_c| + (k_w + i2\Gamma)} \right] \quad (4.3)$$

Sendo ‘e’ a carga do elétron, k_B a constante de Boltzman, T a temperatura, Γ a taxa de dispersão, μ_c o potencial químico controlado e k a constante de Planck reduzida.

O índice de refração obtido do grafeno pode ser visto na Figura 117.

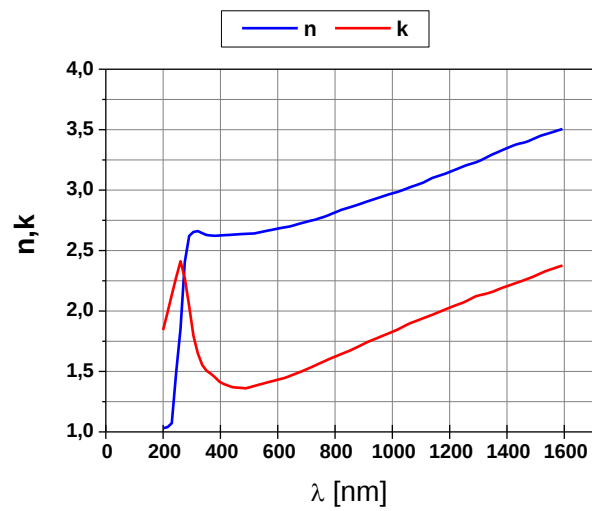


Figura 121: Curva do índice de refração do grafeno, parte real e imaginária.

A estrutura do hiper cristal composto por camadas de grafeno e silício pode ser vista na Figura 121. Para todas as periodicidades analisadas da estrutura foram observadas as características de absorção e reflexão como pode ser visto nos resultados demonstrados.

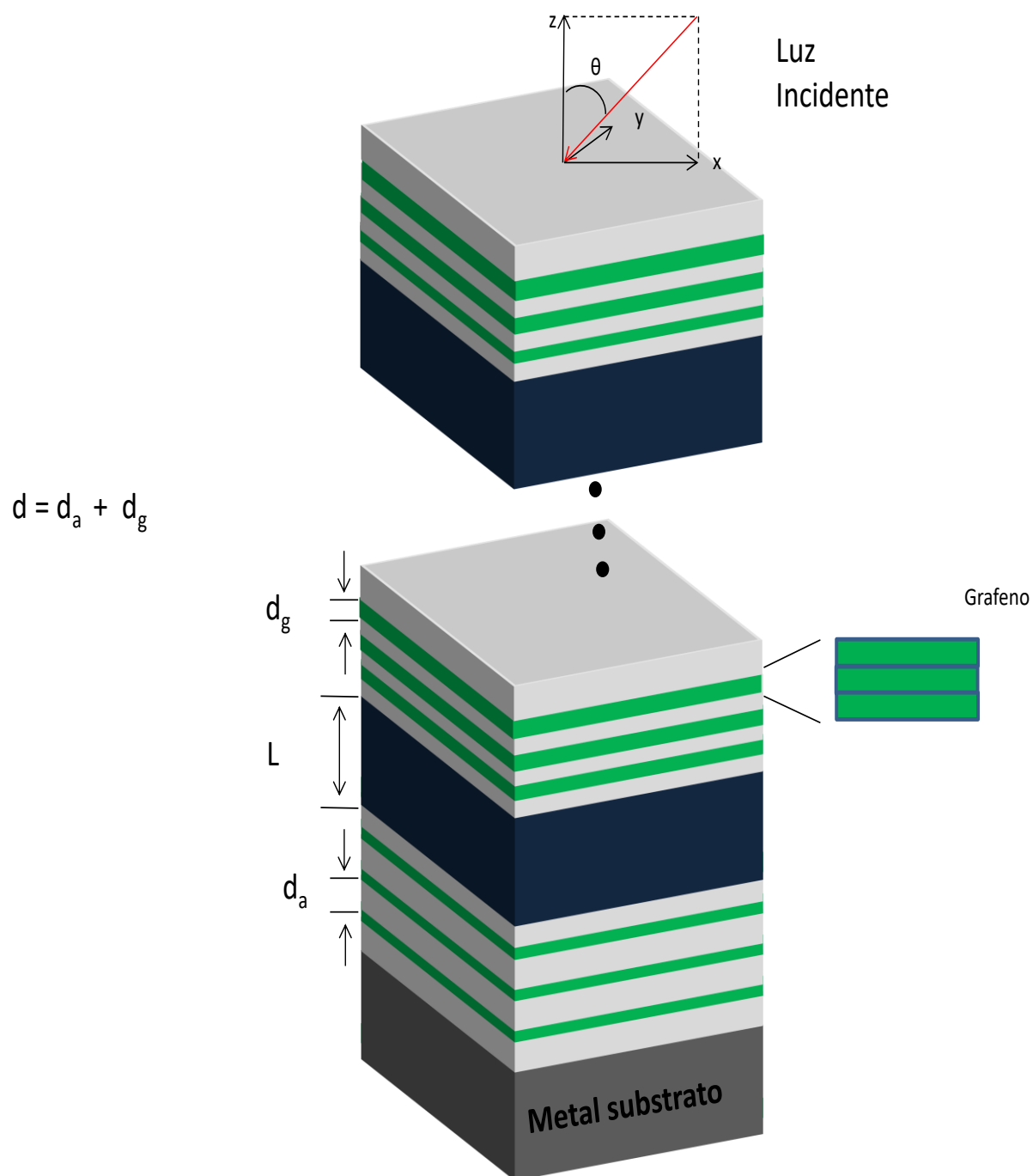


Figura 122: Estrutura hipercristal vertical multicamadas composto de Grafeno e Silício.

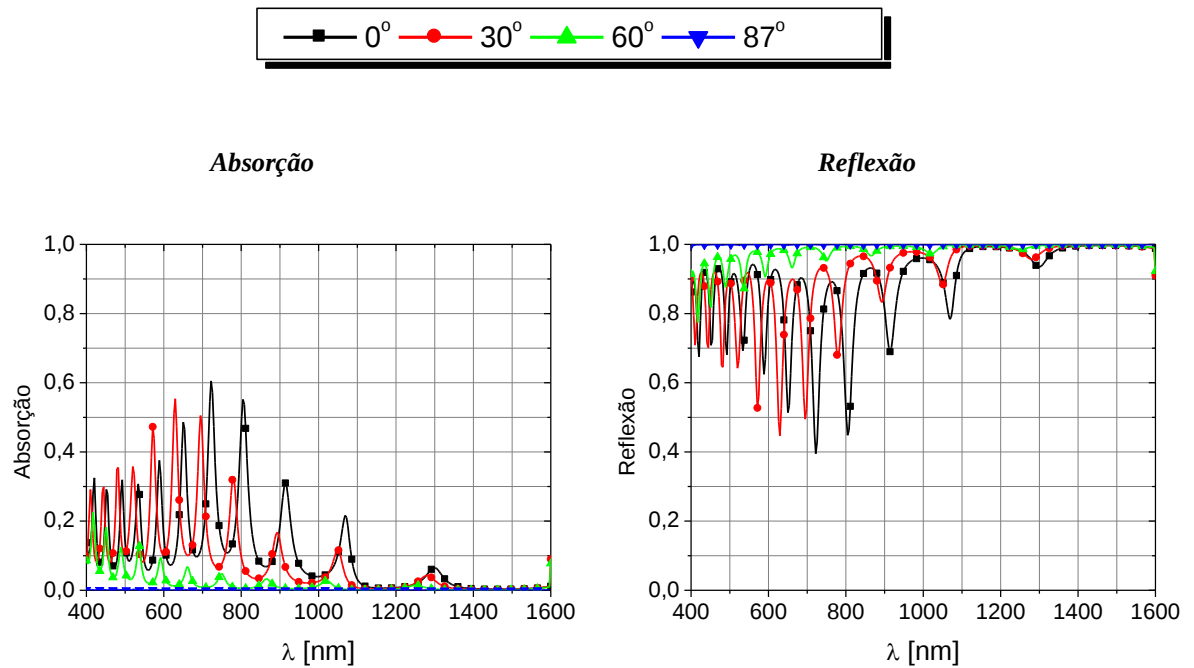


Figura 123: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g = 0.34$ nm, $d_a = 8.98$ nm, $d = 50$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

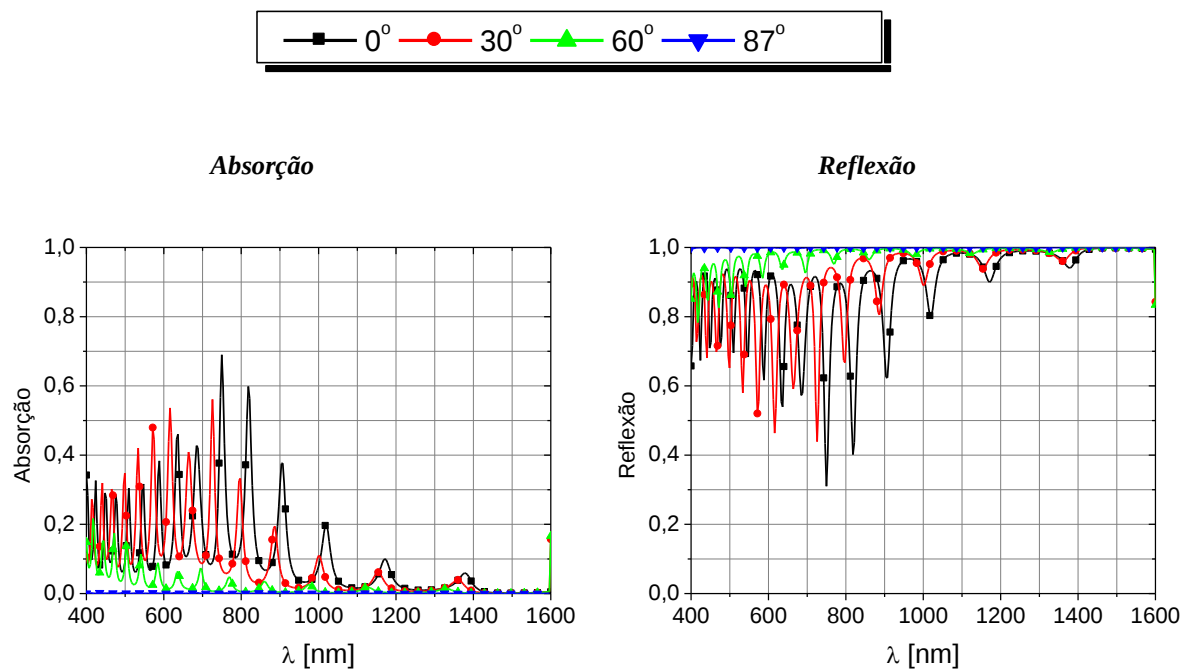


Figura 124: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g = 0.34$ nm, $d_a = 8.98$ nm, $d = 50$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

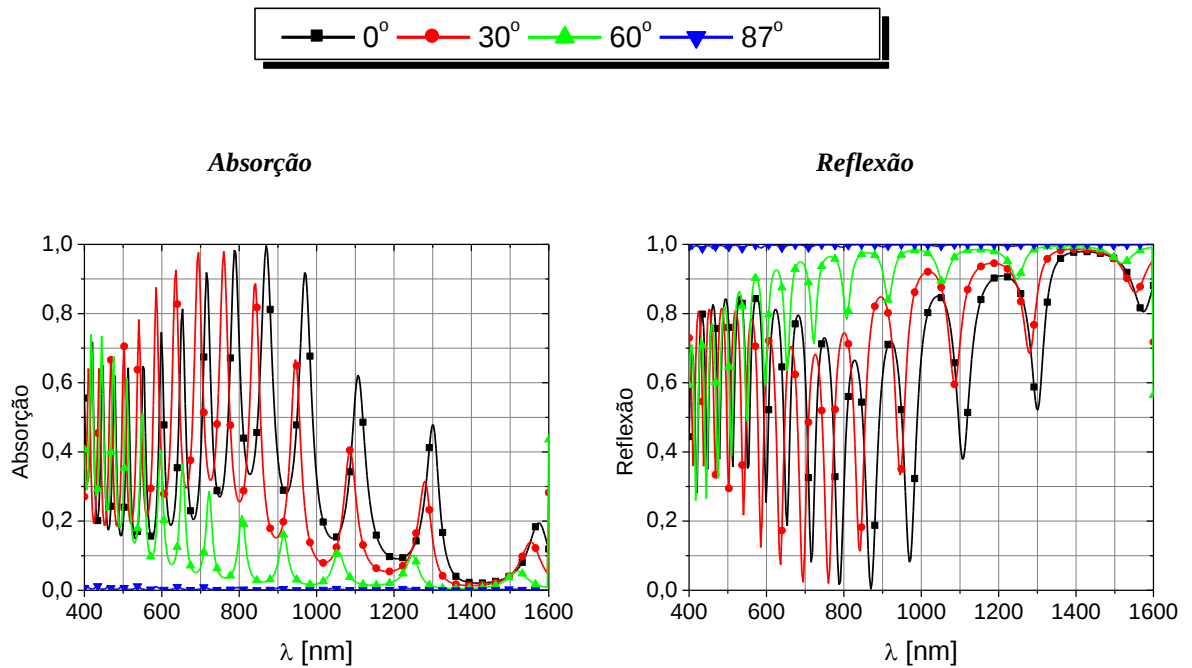


Figura 125: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=14.98$ nm, $d=80$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

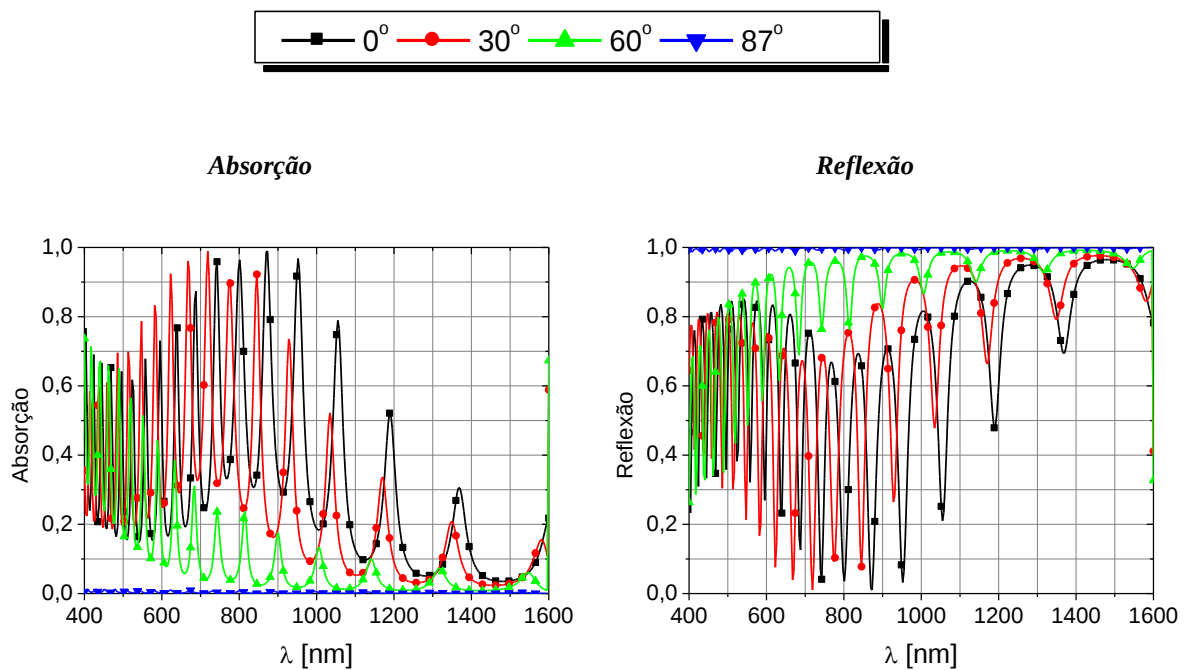


Figura 126: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=14.98$ nm, $d=80$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

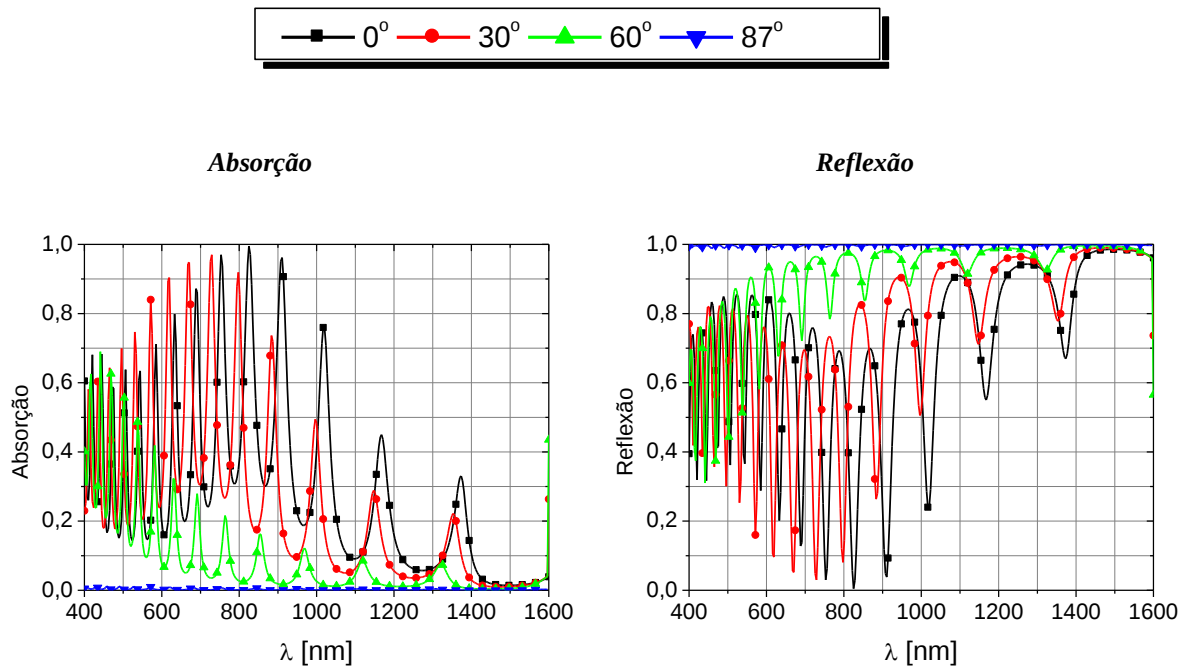


Figura 127: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g = 0.34$ nm, $d_a = 16.98$ nm, $d = 90$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

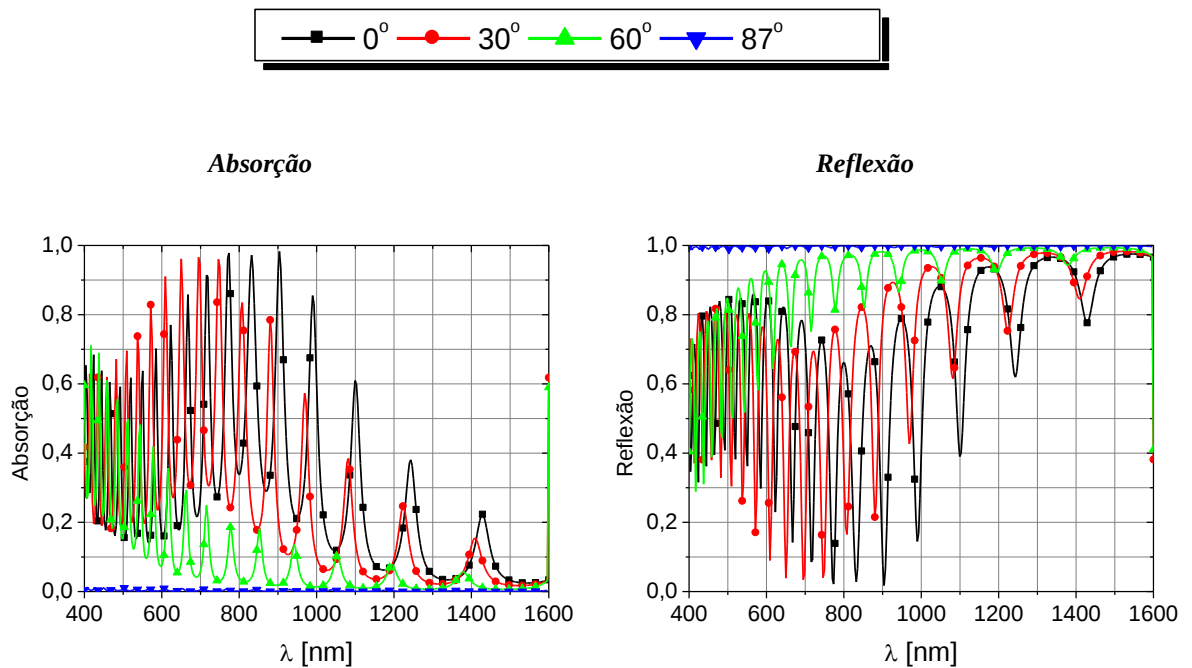


Figura 128: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g = 0.34$ nm, $d_a = 16.98$ nm, $d = 90$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

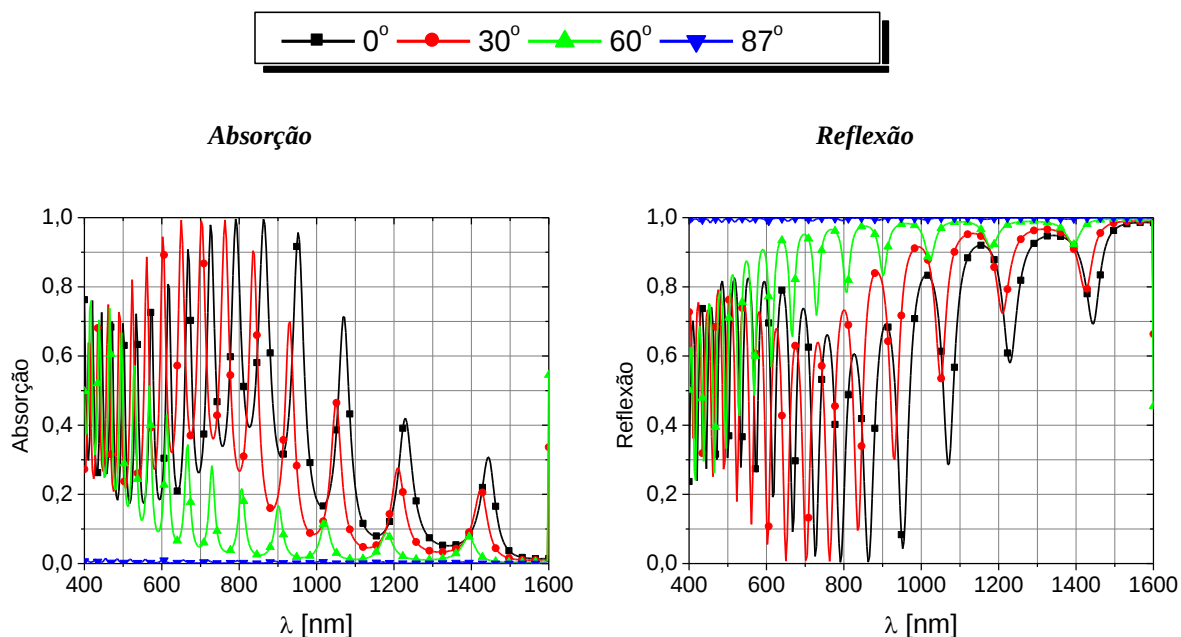


Figura 129: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 100$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=18.98$ nm, $d=100$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

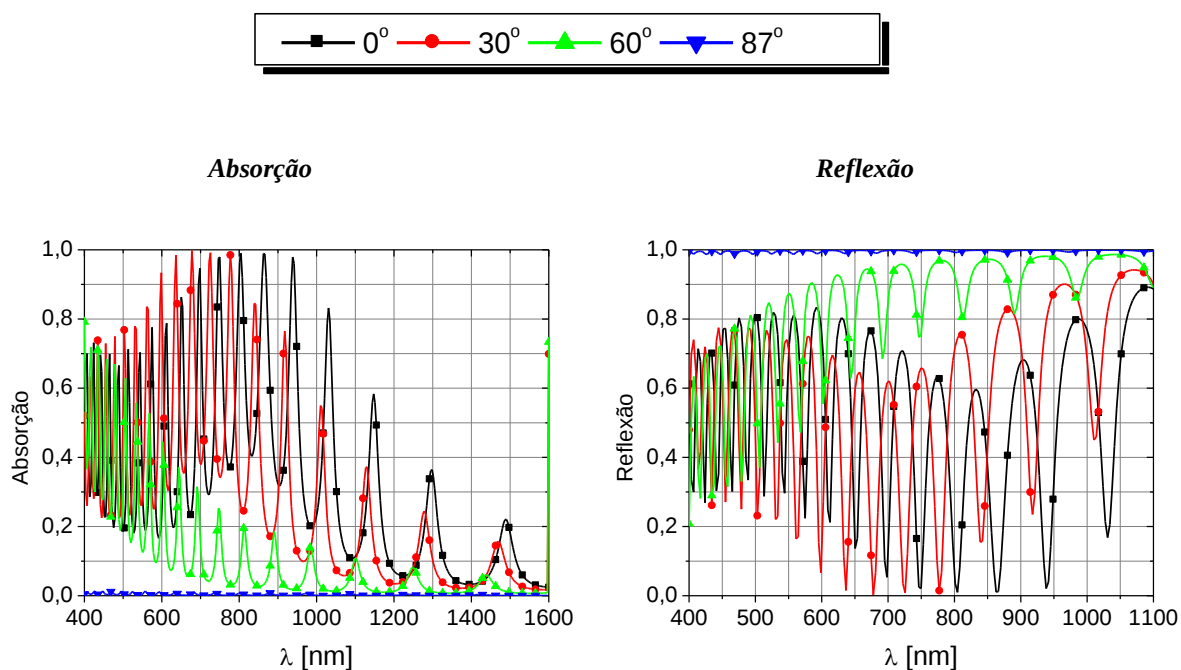


Figura 130: Propagação no hiper cristal Grafeno-Silício em função da fração de preenchimento do dielétrico com $L = 150$ nm, $d_g=0.34$ nm, $d_a=18.98$ nm, $d=100$ nm e variação do ângulo de incidência 0° a 87° .

As Figuras 123 e 124 apresentam os resultados para absorção e reflexão da estrutura do hiper cristal com camadas de grafeno de 0.34 nm e silício 8,98 nm totalizando 50 nm com espaçamentos de $L=100$ nm e 150 nm respectivamente. Para $L=100$ a fração de absorção da

estrutura não ultrapassou 60% nos ângulos de incidência estudados, entretanto a reflexão na estrutura apresentou resultados satisfatórios com diversos picos acima dos 90 % durante a propagação, entre os 800 e 1100 nm houve as maiores frações com picos acima de 98%. Para a mesma configuração, porém com $L=150$ na Figura 119, os resultados apresentaram similaridade com o resultado anterior com um acréscimo da absorção ultrapassando os 60%, a reflexão manteve as mesmas oscilações e com picos acima de 98%.

As Figuras 125 e 126 apresentam os resultados para absorção e reflexão da estrutura do hiper cristal com camadas de grafeno de 0.34 nm e silício 14.98 nm totalizando 80 nm com espaçamentos de $L=100$ nm e 150 nm respectivamente. No primeiro caso a estrutura apresentou comportamento de absorvedor quase perfeito para os ângulos de 0° e 30° entre 750 e 900 nm e a reflexão teve frações de potência acima de 90 % para 60° entre 950 e 1050 nm. Para a mesma configuração, mas com $L=150$ nm o comportamento se manteve similar com um leve aumento dos picos de absorção, a reflexão manteve o mesmo comportamento da anterior.

As Figuras 127 e 128 apresentam os resultados para absorção e reflexão da estrutura do hiper cristal com camadas de grafeno de 0.34 nm e silício 16.98 nm totalizando 90 nm com espaçamentos de $L=100$ nm e 150 nm respectivamente. Para $L=100$ a estrutura apresentou comportamento de absorvedor quase perfeito para os ângulos de 0° e 30° entre 750 e 850 nm e a reflexão teve frações de potência acima de 90 % para 60° entre 900 e 1100 nm. Para a mesma configuração, mas com $L=150$ nm o comportamento continuou apresentando similaridade com um leve aumento dos picos de absorção e reflexão mantendo o comportamento da anterior.

As Figuras 129 e 130 apresentam os resultados para absorção e reflexão da estrutura do hiper cristal com camadas de grafeno de 0.34 nm e silício 18.98 nm totalizando 90 nm com espaçamentos de $L=100$ nm e 150 nm respectivamente. Nesta configuração foram apresentados os melhores resultados de absorção da estrutura com absorvedores quase perfeitos para os ângulos de $0,30$ e 60° com frações de potência acima de 98%.

Em todos os casos a absorção a partir de 1100 nm reduz no material e como consequência ele possui um comportamento de refletor pelo fim do comprimento de onda analisado.

Os resultados demonstram que conforme esperado a estrutura pode ser utilizada como absorvedores ou espelhos em variados comprimentos de onda e ângulos de incidência.

CAPITULO 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados novos modelos e diferentes configurações de hiper cristais fotônicos compostos por metal e dielétrico que podem ser utilizados como absorvedores e refletores. O projeto prevê um metamaterial capaz de superar as limitações dos atuais existentes no mercado, com um maior controle da propagação de luz na estrutura.

Em um primeiro momento foi composto um hiper cristal fotônico baseado na sequência de Fibonacci, este hiper cristal foi analisado para o ângulo de 0° onde foram variados os parâmetros como periodicidade e materiais constituintes no regime da luz visível. No segundo momento foram inseridas variações para os ângulos de incidência o que permitiu que a estrutura seja utilizada como seletor angular a depender da necessidade de aplicação, foi ampliado também à região de análise passando para região do infravermelho além da região do visível. Estes resultados foram analisados nos modos Transversal Elétrico e Magnético ampliando suas aplicações.

Foi também proposto neste trabalho um hiper cristal contendo grafeno, material descoberto em 2004 e que desde então obteve diversos avanços em estudos e aplicações. Sua importância no cenário científico foi constatada em 2010 após ser atribuído aos Físicos K. S. Novoselov e A. K. Geim o prêmio Nobel pela síntese de Grafeno em 2004. Neste trabalho foi desenvolvido o estudo e aplicado este novo material com o intuito de obter respostas de absorção e reflexão na estrutura. O regime avaliado foi do visível ao infravermelho (400nm a 1600 nm) com variação angular de 0 a 87° no modo de incidência TM.

Os metamateriais propostos servem como absorvedores, refletores e filtros na faixa do visível e parte do IR. A assimetria nas respostas de propagação das estruturas também foi verificada, a transmitância em todos os casos quase não apresenta relevância e é a mesma para direita e esquerda. Quando analisados os resultados nota-se que a estrutura pode ser utilizada como um espelho ou um absorvedor para comprimentos de onda específicos e ângulos de incidência, a escolha apropriada dos parâmetros permite a proposta e o projeto de filtros ou absorvedores seletores com as propriedades operacionais desejadas. Foi observado que a parcela do metal influencia diretamente na resposta do hiper cristal, na maioria dos casos ampliando as características de absorção das estruturas.

5.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é sugerido à variação de materiais na estrutura dos hiper cristais, aplicando outros materiais como os utilizados em células solares, variação de parâmetros tais como altura, largura, periodicidade e comprimento de onda e análise da influência da variação da temperatura nos materiais, para que sejam analisadas as novas respostas da estrutura.

5.3 Publicações associadas ao trabalho

- Miriele C. Carvalho, J. J. Isidio de Lima, V. F. Rodriguez-Esquerre, "Multilayered metamaterials hypercrystals at visible and infrared frequencies," Proc. SPIE 11080, Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2019, 110801V (5 September 2019); doi: 10.1117/12.2529260 Event: SPIE Nanoscience + Engineering, 2019, San Diego, California, United States

Resumo: Propusemos e analisamos a resposta de propagação eletromagnética de hiper cristais, metamateriais multicamadas. A estrutura é composta por uma sequência periódica de dielétrico material e um metamaterial à base de metal incorporado em outro dielétrico. A estrutura final pode exibir propriedades ópticas assimétricas e podem ser usadas como espelhos, para filtros de banda e absorvedores de unidade para radiação visível e infravermelha. As propriedades de propagação da proposta hiper cristal podem ser ajustadas modificando seus parâmetros ópticos e geométricos e ópticos.

- Miriele C. Paim, J. J. Isidio de Lima, V. F. Rodriguez-Esquerre, "Propagation properties of Fibonacci hypercrystal based on metamaterials," Proc. SPIE 10719, Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2018, 1071933 (19 September 2018); doi: 10.1117/12.2323363 Event: SPIE Nanoscience + Engineering, 2018, San Diego, California, United States

Resumo: Neste artigo, analisamos a resposta de propagação de hiper cristais baseados em Fibonacci composto por metamateriais dielétricos metálicos multicamadas. A estrutura pode ser projetada para comportar-se como espelhos ou parar filtros e absorvedores de banda para radiação visível e infravermelha. As propriedades de propagação do hiper cristal proposto podem ser facilmente ajustadas e drasticamente alteradas ajustando seus parâmetros geométricos e ópticos.

- PAIM, Miriele C.; DE LIMA, JJ Isídio; RODRÍGUEZ-ESQUERRE, V. F. Analysis of Fibonacci Hypercrystal Metamaterials. In: Latin America Optics and Photonics Conference. Optical Society of America, 2018. p. Th4A. 32.

Resumo: Neste artigo, as propriedades de hiper cristais fotônicos foram analisadas. A estrutura consiste em pares de camadas metal-dielétricas separadas por ar após uma sequência de Fibonacci. Nós demonstramos que a estrutura possui propriedades ópticas assimétricas que permitem o comportamento como espelhos de banda, filtros ou absorvedores de radiação visível e infravermelha.

- PAIM, Miriele C.; DE LIMA, JJ Isídio; RODRÍGUEZ-ESQUERRE, V. F. Análise de Hiper cristal Baseado em Metamaterial em Frequências no Visível e Infravermelho. Em : IX Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança. ENCOM, 2019.

Resumo: Neste artigo a resposta da propagação de ondas eletromagnéticas em hiper cristais composto por metamaterial foram analisadas. A estrutura é composta por uma sequência periódica de material dielétrico e um metamaterial embebido em outro dielétrico. A estrutura apresenta propriedade ópticas com comportamento assimétrico podendo ser usados como espelhos, filtros rejeita faixa e absorvedores quase ideais para frequências curtas (visível infravermelho).

Referências Bibliográficas

- [1] Y. C. Chang, A. V. Kildishev, E. E. Narimanov, and T. B. Norris, “Metasurface perfect absorber based on guided resonance of a photonic hypercrystal,” *Physical Review B* 94, 155430 (2016).
- [2] Hu, C. A., Wu, C. J., Yang, T. J., & Yang “Analysis of effective plasma frequency in a superconducting photonic crystal,” *JOSA B*, v. 30, n. 2, p. 366-369 (2013).
- [3] Aly, A. H., Mehaney, A., & El-Naggar, S. A. ., “ Evolution of phononic band gaps in one-dimensional phononic crystals that incorporate High-K superconductor and magnetostrictive materials,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 30, n. 10, p. 2711-2716 (2017).
- [4] Wu, C. J., Liu, C. L., & Yang, T. J, “Investigation of photonic band structure in a one-dimensional superconducting photonic crystal,” *JOSA B*, v. 26, n. 11, p. 2089-2094 (2009).
- [5] Aly, A. H., Elsayed, H. A., & El-Naggar, S. A. , “The properties of cutoff frequency in two-dimensional superconductor photonic crystals,” *Journal of Modern Optics*, 61:13 (2014).
- [6] Ricci, M., Orloff, N., & Anlage, S. M., “Superconducting metamaterials,” *Applied Physics Letters*, v. 87, n. 3, p. 034102 (2005).
- [7] Aly, A. H., & Sabra, W., “Superconductor-semiconductor metamaterial photonic crystals.” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 29, n. 8, p. 1981-1986 (2016).
- [8] Shin, J., Shen, J. T., & Fan, S. , “Three-dimensional metamaterials with an ultrahigh effective refractive index over a broad bandwidth,” *Physical review letters*, v. 102, n. 9, p. 093903 (2009).
- [9] Cheng, M., Fu, P., Lin, Y., Chen, X., Chen, S., Tang, X., & Feng, S. “Analysis of tunable and highly confined surface wave in the photonic hypercrystals containing graphene-based hyperbolic metamaterial.” *Superlattices and Microstructures*, v. 121, p. 75-85 (2018).

- [10] Ali, M. Z., “Dispersion relations and wave propagation in photonic hypercrystals,” *Modern Physics Letters B*, v. 32, n. 02, p. 1750320 (2018).
- [11] SCH Schilling, J. ILLING, Jörg., “Uniaxial metallo-dielectric metamaterials with scalar positive permeability,” *Physical Review E*, v. 74, n. 4, p. 046618 (2006).
- [12] Argyropoulos, C., Estakhri, N. M., Monticone, F., & Alù, A. , “Negative refraction, gain and nonlinear effects in hyperbolic metamaterials,” *Optics express*, v. 21, n. 12, p. 15037-15047 (2013).
- [13] Narimanov, E. E. , “Photonic hypercrystals,” *Physical Review X*, v. 4, n. 4, p. 041014 (2014).
- [14] T. Galfsky, J. Gu, E. Narimanov and V. Menon, “Photonic hypercrystals for control of light--matter interactions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, 5125–5129 (2017).
- [15] T. Galfsky, Z. Sun, C. Considine, E. Narimanov and V. Menon, “Broadband enhancement of spontaneous emission in two-dimensional semiconductors using photonic hypercrystals,” *Nano letters* 16, 4940-4945 (2016).
- [16] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, and L. P. Pitaevskii., “*Electrodynamics of Continuous Media*,” 2nd edition. Vol. 8. *Course of Theoretical Physics*. Pergamon (1984).
- [17] Papadakis, Georgia Theano, “Optical Response in Planar Heterostructures: From Artificial Magnetism to Angstrom-Scale Metamaterials”. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology (2018).
- [18] Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S., “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity,” *Physical review letters*, v. 84, n. 18, p. 4184 (2000).
- [19] Claire M. Watts, Xianliang Liu, and Willie J. Padilla. “Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers,” *Advanced Materials*, (2014).

- [20] Mikhail Y. Shalaginov et al. “Enhancement of single-photon emission from nitrogen-vacancy centers with TiN/(Al,Sc)N hyperbolic metamaterial”. *Laser Photonics Reviews* 9 ,pp. 120–127 (2015).
- [21] Min Seok Jang et al. “Tunable large resonant absorption in a midinfrared graphene Salisbury screen”. *Phys. Rev. B* 90 , p. 165409 (2014).
- [22] M. C. Paim, J. J. Isídio de Lima, and V. F. Rodríguez-Esquerre, "Analysis of Fibonacci Hypercrystal Metamaterials," in *Latin America Optics and Photonics Conference*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper Th4A.32.
- [23] Akselrod, G. M., Huang, J., Hoang, T. B., Bowen, P. T., Su, L., Smith, D. R., & Mikkelsen, M. H., “Large-area metasurface perfect absorbers from visible to near infrared”. *Advanced Materials*, v. 27, n. 48, p. 8028-8034 (2015).
- [24] Azad Abul K. et al., “Metasurface broadband solar absorber,” *Scientific reports*, v. 6, p. 20347 (2016).
- [25] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ,” *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514 (1968).
- [26] Mahmoodi, M., Tavassoli, S. H., Takayama, O., Sukham, J., Malureanu, R., & Lavrinenko, A. V. (2019). Existence Conditions of High-k Modes in Finite Hyperbolic Metamaterials. *Laser & Photonics Reviews*, 13(3), 1800253.
- [27] GALFSKY, T. et al. Light extraction from high-k modes in a hyperbolic metamaterial. arXiv preprint arXiv:1408.5181, 2014.
- [28] WEIGLHOFER, Werner S.; LAKHTAKIA, Akhlesh (Ed.), “ Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics. Bellingham,” WA: SPIE press (2003).
- [29] C. L. Cortes, W. Newman, S. Molesky, and Z. Jacob, "Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials," *J. Opt.* 14, 063001 (2012).

- [30] W. E. Kock, “Metallic delay lenses,” *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 27, pp. 58–82 (1948).
- [31] Cui T.J., Liu R., Smith D.R., “Introduction to Metamaterials. In: Cui T., Smith D., Liu R. (eds) *Metamaterials*,” Springer, Boston (2010).
- [32] D. R. Smith et al. “Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity,” *Phys. Rev. Lett.* 84, pp. 4184–4187 (2000).
- [33] Lazarides, N., & Tsironis., “Superconducting metamaterials,” *Physics Reports* (2018).
- [34] Caloz, Christophe. , “Perspectives on EM metamaterials,” *Materials Today*, v. 12, n. 3, p. 12-20 (2009).
- [35] J. Kaschke and M. Wegener, “Gold triple-helix mid-infrared metamaterial by STED-inspired laser lithography”. *Opt. Lett.* 40, pp. 3986–3989 (2015).
- [36] Plum E, Liu XX, Fedotov VA, Chen Y, Tsai DP, Zheludev NI, “Metamaterials: optical activity without chirality,” *Phys. Rev. Lett.* (2009).
- [37]Liu N, Liu H, Zhu S, Giessen H: “Stereometamaterials.” *Nat. Photonics* (2009).
- [38] J.B. Pendry, John Brian. “Negative refraction makes a perfect lens.” *Physical review letters*, v. 85, n. 18, p. 3966 (2000).
- [39] Mills, D. L., & Burstein, E., “Polaritons: the electromagnetic modes of media.” *Reports on Progress in Physics*, v. 37, n. 7, p. 817 (1974).
- [40] Camley, R. E.; Mills, D. L., “Surface polaritons on uniaxial antiferromagnets,” *Physical Review B*, v. 26, n. 3, p. 1280 (1982).
- [41] Radkovskaya, A. et al., “Magnetic metamaterials: Coupling and permeability,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 459, p. 187-190 (2018).
- [42] Yao, Jie et al., “Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires,” *Science*, v. 321, n. 5891, p. 930-930 (2008).
- [43] Luna, Aelfo Marques. *Materiais de engenharia elétrica*. Recife: do autor (2006).

- [44] S. Mendhe and Y.Kosta, "Metamaterial properties and applications," *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 4, 85-89 (2011).
- [45] K. Gangwar, "Metamaterials: characteristics, process and applications," *Advances in Electronic and Electric Engineering* 4, 97-106 (2014).
- [46] P. Shekhar, J. Atkinson and Z. Jacob, " Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications," *Nano convergence* 1, 14 (2014).
- [47] L.Ferrari, C. Wu, D. Lepage and Z. Liu, et al., "Hyperbolic metamaterials and their applications," *Progress in Quantum Electronics*, 40, 1-40 (2015).
- [48] V. F. Barros. "Estudo do Efeito de substratos Metamateriais em Parâmetros de Antenas de Microfitas". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2012).
- [49] Smolyaninov, Igor I. Hyperbolic metamaterials. Morgan & Claypool Publishers (2018).
- [50] Podolskiy V A and Narimanov E, "Strongly anisotropic waveguide as a nonmagnetic left-handed system," *Phys. Rev. B*, (2005).
- [51] Jacob Z, Alekseyev L V and Narimanov E., "Optical hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit," *Opt. Express* (2007).
- [52] Narimanov E. E. and Kildishev A. V., "Metamaterials: Naturally hyperbolic," *Nat. Photonics* (2015).
- [53] Smolyaninov, Igor I., "Vacuum in a strong magnetic field as a hyperbolic metamaterial," *Physical review letters*, v. 107, n. 25, p. 253903 (2011).
- [54] Poddubny, Alexander et al., "Hyperbolic metamaterials," *Nature photonics*, v. 7, n. 12, p. 948 (2013).
- [55] Chen, Hou-Tong; TAYLOR, Antoinette J. YU, Nanfang, "A review of metasurfaces: physics and applications," *Reports on progress in physics*, v. 79, n. 7, p. 076401 (2016).
- [56] Marqués, Ricardo; MARTIN, Ferran; SOROLLA, Mario. *Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications*. John Wiley & Sons (2011).
- [57] Krowne, Clifford M.; ZHANG, Yong. *Physics of negative refraction and negative index materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2007).
- [58] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu," *Sov.Phys. Uspekhi*, 10, pp. 509-514 (1968).
- [59] L. I. Mandelshtam, "Lectures on Some Problems of the Theory of Oscillations," *Complete Collection of Works, Vol. 5, Academy of Sciences, Moscow*, pp. 428- 467 (1944).
- [60] Jakšić, Zoran; Dalarsson, Nils; Maksimović, Milan, "Negative refractive index metamaterials," *Principles and applications. Mikrotalasna revija*, p. 36-49 (2006).

- [61] Marqués, Ricardo; Martin, Ferran; SOROLLA, Mario. “Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications,” John Wiley & Sons (2011).
- [62] S. A. Ramakrishna, “Physics of negative refractive index materials,” *Rep. Prog. Phys.* 68, 449–521, (2005).
- [63] J. Lu, T. M., Y. Zhang, J. Pacheco, Jr., B.-I.Wu, J. A. Kong, M. Chen, “Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability,” *Opt. Express*, 11, pp. 723–734, (2003).
- [64] Hassanzadeh, Moazameh; Sovizi, Mahdi; Mohsseni, Mahdi. Position calculation of the frequency band gap in the finite photonic crystal with multiple alternations using boundary element method. *Optik*, v. 124, n. 24, p. 6869-6873, (2013).
- [65] Aly, Arafa H.; Mehaney, Ahmed; A. Rahman, Ehab. “Study of physical parameters on the properties of phononic band gaps,” *International Journal of Modern Physics B*, v. 27, n. 11, p. 1350047 (2013).
- [66] K. Gangwar, "Metamaterials: characteristics, process and applications," *Advances in Electronic and Electric Engineering* 4, 97-106 (2014).
- [67] T.Larsen, A. Bjarklev, D. Hermann and J.Broeng, "Optical devices based on liquid crystal photonic bandgapfibres," *Optics Express* 11, 2589-2596 (2003).
- [68] Joannopoulos, John D." Photonic crystals (PFCs)" in *Photonic crystals: molding the flow of light*, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade (Princeton university press, 2011).
- [69] Igor A. Sukhoivanov e Igor V. Guryev, *Photonic Crystal - Physics and Practical Modeling*, (2009).
- [70] Aly, Arafa H.; Elsayed, Hussein A.; EL-Naggar, Sahar A. “The properties of cutoff frequency in two-dimensional superconductor photonic crystals,” *Journal of Modern Optics*, v. 61, n. 13, p. 1064-1068, (2014).
- [71] T.Larsen, A. Bjarklev, D. Hermann and J.Broeng, "Optical devices based on liquid crystal photonic bandgapfibres," *Optics Express* 11, 2589-2596 (2003).
- [72] E. Narimanov, “Photonic hypercrystals: the best of both worlds." *SPIE J* 10.1117/2.1201503.005744 (2015).
- [73] XUE, Chun-hua et al., “Wide-angle spectrally selective perfect absorber by utilizing dispersionless Tamm plasmon polaritons,” *Scientific reports*, v. 6, p. 39418 (2016).
- [74] JIN, Jian-Ming, “The finite element method in electromagnetics,” John Wiley & Sons, (2015).

- [75] Polycarpou, Anastasis C., "Introduction to the finite element method in electromagnetics," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, v. 1, n. 1, p. 1-126 (2005).
- [76] Galfsky, T. et al., "Control of light-matter interaction using photonic hypercrystals," In: *Laser Science*. Optical Society of America (2017).
- [77] Narimanov, Evgenii E., "Dirac dispersion in photonic hypercrystals," *Faraday discussions*, v. 178, p. 45-59, (2015).
- [78] Fedorin, Illia V. Dyakonov, "Surface Waves at the Interface between Porous Nanocomposite and Hypercrystal." In: *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*. p. 66-69, IEEE (2018).
- [79] Sadiku, M.N.O. *Numerical Techniques in electromagnetics*. 2.Ed. Editora CRC Press, Nova Iorque, (2000).
- [80] MACIÁ, Enrique, "Physical nature of critical modes in Fibonacci quasicrystals," *Physical Review B*, v. 60, n. 14, p. 10032 (1999).
- [81] H. Rahimi, A. Namdar, S. R. Entezar, and H. Tajalli, "Photonic Transmission Spectra One-Dimensional Fibonacci Multilayer Structures Containing Single-Negative Metamaterials," *Progress In Electromagnetics Research*, 15-30 (2010).
- [82] JIN, Jian-Ming. *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, (2015).
- [83] Weber, J. W.; Calado, V. E.; Van de Sanden, M. C. M. Optical constants of graphene measured by spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics Letters*, v. 97, n. 9, p. 091904 (2010).
- [84] BRUNA, Matteo; BORINI, SJAPL. Optical constants of graphene layers in the visible range. *Applied Physics Letters*, v. 94, n. 3, p. 031901 (2009).
- [85] NELSON, F. J. et al. "Optical properties of large-area polycrystalline chemical vapor deposited graphene by spectroscopic ellipsometry", *Applied Physics Letters*, v. 97, n. 25, p. 253110 (2010).
- [86] NOVOSELOV, Kostya S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *science*, v. 306, n. 5696, p. 666-669 (2004).
- [87] GRAY, Alexander et al. Optical detection and characterization of graphene by broadband spectrophotometry. *Journal of Applied Physics*, v. 104, n. 5, p. 053109 (2008).
- [88] HANSON, George W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene. *Journal of Applied Physics*, v. 103, n. 6, p. 064302 (2008).
- [89] DEPINE, Ricardo A. *Graphene Optics: Electromagnetic solution of canonical problems*. Morgan & Claypool Publishers (2017).