

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 845

**METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE LENTES INTRAOCULARES  
MONOFOCAIS E MULTIFOCAIS MODELADAS COMPUTACIONALMENTE EM  
MODO NÃO SEQUENCIAL COM BASE EM ALGORITMO GENÉTICO**

**Luiz Melk de Carvalho**

DATA DA DEFESA: 11/12/2014

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE LENTES INTRAOCULARES  
MONOFOCAIS E MULTIFOCAIS MODELADAS  
COMPUTACIONALMENTE EM MODO NÃO SEQUENCIAL COM  
BASE EM ALGORITMO GENÉTICO**

Luiz Melk de Carvalho

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Davies William de Lima Monteiro

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2014

**"Metodologia de Otimização de Lentes Intraoculares  
Monofocais e Multifocais Modeladas Computacionalmente em  
Modo não Sequencial com Base em Algoritmo Genético"**


**Luiz Melk de Carvalho**

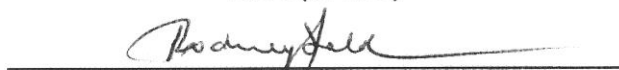
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

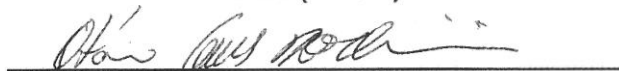
Aprovada em 11 de dezembro de 2014.

Por:

  
Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro  
DEE (UFMG) - Orientador

  
Prof. Dr.ª Luciana Pedrosa Salles  
DEE (UFMG)

  
Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha  
DEE (UFMG)

  
Dr. Otávio Gomes de Oliveira  
Departamento P&D (Mediphacos Ltda.)

## FICHA CATALOGRÁFICA

Carvalho, Luiz Melk de

Metodologia de otimização de lentes intraoculares monofocais e multifocais modeladas computacionalmente em modo não sequencial com base em algoritmo genético /Luiz Melk de Carvalho – Belo Horizonte, 2014.

121 f. : il.color. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Engenharia Elétrica, 2014.

1.Lente intraocular; 2. Algoritmo genético; 3. NSGA-II; 4. Lente monofocal; 5. Lente multifocal.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais cujo trabalho e privações foram essenciais para que eu me tornasse o homem que sou hoje. Agradeço ao meu irmão pelo exemplo e assistência durante toda minha vida. Agradeço à Bárbara pela paciência nos momentos difíceis, pelo carinho e apoio. Agradeço ao Davies por inspirar desde a graduação a ideia de que nós alunos podemos ir mais longe e pela oportunidade de poder trabalhar com ele desde aquela época até os dias de hoje. Agradeço aos meus colegas de trabalho cuja assistência foi essencial para que eu pudesse concluir meu mestrado.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para otimização de lentes intraoculares (LIOs) por meio de modelagem computacional não sequencial no software Zemax®. A metodologia abordada se baseia no emprego de um algoritmo de otimização de busca global denominado “*Non-dominating Sorting Genetic Algorithm II*” (NSGA-II) implementado no software Matlab® para otimizar os parâmetros de LIOs monofocais e multifocais. No que diz respeito às LIOs monofocais, que representam problemas de otimização mono-objetivo, o algoritmo NSGA-II tem a função de encontrar a região de convergência do ótimo global das mesmas. Tal região permite que seja possível alcançar o melhor desempenho óptico do sistema (representado por sua curva de limite de difração). Além disso, será avaliada a robustez desse algoritmo na otimização de LIOs monofocais que apresentam desvios em sua superfície óptica com o intuito de simular situações práticas em que exista um desalinhamento no eixo do torno que fabrica as superfícies da lente. Quanto às LIOs multifocais, que representam problemas de otimização multiobjetivo, o algoritmo NSGA-II tem a função de otimizar o sistema apresentando soluções que atendam múltiplos requisitos (qualidade óptica em seus múltiplos pontos focais) de acordo com as necessidades do usuário. A grande vantagem dessa abordagem reside na capacidade do NSGA-II em lidar com problemas multiobjetivos e em sua capacidade de busca global das soluções ótimas em relação aos métodos determinísticos tradicionais que não apresentam tal capacidade e flexibilidade. Os resultados alcançados comprovam que o NSGA-II foi capaz de encontrar a região de ótimo global de todas as dioptrias de LIOs monofocais simuladas e para aquelas LIOs que apresentavam desvios em sua superfície foi possível encontrar soluções cuja qualidade óptica é superior ao de LIOs esféricas presentes no mercado. Além disso, os resultados indicam que o NSGA-II foi capaz de otimizar uma LIO multifocal refrativa que apresentou características ópticas compatíveis com a de LIOs multifocais refrativas comercializadas. Tal fato valida, portanto, a capacidade do algoritmo em solucionar problemas mono e multiobjetivos, não só na área de óptica aplicada à LIOs, mas em qualquer área que execute atividades relacionadas à modelagem de sistemas ópticos refrativos e reflexivos no Zemax, como, por exemplo, lentes de câmeras com aplicação industrial ou de entretenimento, matriz de microlentes para sensores de frente de onda, faróis automotivos etc.

**Palavras-chave:** Lente intraocular, Algoritmo genético, NSGA-II, Lente monofocal, Lente multifocal.

## ABSTRACT

This paper presents a methodology for optimization of intraocular lenses (IOLs) using computational non-sequential modeling of the Zemax® software. The methodology discussed is based on the use of an optimization algorithm for global search called Non-dominating Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) implemented in Matlab® software to optimize monofocal and multifocal IOLs' parameters. With respect to monofocal IOLs, which represents a mono-objective optimization problem, the NSGA-II algorithm has the task of finding the region of convergence to the global optimum of those lenses. This region allows it to be possible to achieve the best optical performance of the system (represented by its diffraction limit curve). Moreover, the robustness of the algorithm will be evaluated through the optimization of monofocal IOLs that exhibit deviations in its optical surface in order to simulate practical situations where there is an axis misalignment of the lathe that produces the surfaces of the lens. As for the multifocal IOLs, which represents multi-objective problems, the NSGA algorithm has the function of optimizing the system by presenting solutions that meet multiple requirements (the optical quality in its multiple focal points) according to the user's needs. The big advantage of this approach lies in the ability of the NSGA-II to deal with multi-objective problems and its ability to search the global optimal solutions than traditional deterministic methods that don't have such capability and flexibility. The results show that the NSGA-II was able to find the region of global optimum for all diopters of monofocal IOLs simulated and for those lenses that presented deviations on its surface it was possible to find solutions that showed a better optical quality than the spherical IOLs encountered in the market. Furthermore, the results indicate that the NSGA-II was able to optimize a refractive multifocal IOL that showed optical characteristics compatible with refractive multifocal IOLs marketed. This, therefore, validates the ability of the algorithm to solve mono- and multi-objective problems not only in the field of optics applied to IOLs, but in any area that performs activities related to the modeling of refractive and reflective optics in Zemax as, for example, camera lenses with industrial or entertainment application, microlens array for wavefront sensors, automotive lights etc.

**Keywords:** Intraocular lens, Genetic Algorithm, NSGA-II, Monofocal lens, Multifocal lens.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESTRUTURA ÓPTICA DO OLHO HUMANO. ....	16
FIGURA 2 – CAMADAS DA RETINA. ....	17
FIGURA 3 - LIO MONOFOCAL: A) LIO ESFÉRICA BICONVEXA E B) VERGÊNCIA DOS RAIOS NA LIO ESFÉRICA. ....	20
FIGURA 4 - VERGÊNCIA DOS RAIOS EM UMA LIO ASFÉRICA. ....	20
FIGURA 5 – IMAGEM FORMADA: A) POR UMA LIO ESFÉRICA E B) POR UMA LIO ASFÉRICA. ....	21
FIGURA 6 - LIO MULTIFOCAL: A) BIFOCAL E B) TRIFOCAL. ....	23
FIGURA 7 - OBJETO DISTANTE SENDO FOCALIZADO POR UMA LIO BIFOCAL. ....	24
FIGURA 8 - OBJETO PRÓXIMO SENDO FOCALIZADO POR UMA LIO BIFOCAL. ....	24
FIGURA 9 - LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA. ....	26
FIGURA 10 - PRINCÍPIO DE HUYGENS. ....	27
FIGURA 11 – LIOM DIFRATIVA. ....	28
FIGURA 12 – EFICIÊNCIA DE UMA LIO DIFRATIVA MONOFOCAL EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA. ....	29
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO OBJETO E DA IMAGEM PARA UM SISTEMA ÓPTICO REAL. ....	30
FIGURA 14 – A) OBJETO PADRÃO E B) SUA CURVA DE INTENSIDADE. ....	31
FIGURA 15 - TRANSFERÊNCIA DE CONTRASTE PARA UMA IMAGEM CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTF. ....	32
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE DO OBJETO E DA IMAGEM PARA UM SISTEMA LIMITADO POR DIFRAÇÃO. ....	33
FIGURA 17 - MTF DE UM SISTEMA ÓPTICO REAL E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	34
FIGURA 18 - IMAGEM PROJETADA: A) POR UM SISTEMA LIMITADO POR DIFRAÇÃO E B) POR UM SISTEMA COM MTF ABAIXO DO LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	34
FIGURA 19 - PLANO SAGITAL E TANGENCIAL. ....	36
FIGURA 20 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA LIO MONOFOCAL. ....	37
FIGURA 21 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE LIOS MULTIFOCALIS: A) LIOM REFRACTIVA E B) LIOM DIFRATIVA. ....	38
FIGURA 22 – SISTEMA ÓPTICO SEQUENCIAL MODELADO NO ZEMAX. ....	39
FIGURA 23 - SISTEMA ÓPTICO NÃO SEQUENCIAL MODELADO NO ZEMAX. ....	39
FIGURA 24 - MODELO DE OLHO DEFINIDO PELA NORMA ISO 11979. ....	42
FIGURA 25 - FUNÇÃO MULTIMODAL ILUSTRANDO MÁXIMO/MÍNIMO LOCAL/GLOBAL. ....	44
FIGURA 26 – EVOLUÇÃO DAS POPULAÇÕES NO NSGA-II. ....	45
FIGURA 27 – OTIMIZAÇÃO DE UMA LIO MONOFOCAL: A) MÍNIMO GLOBAL DO SISTEMA ÓPTICO E B) SOLUÇÕES ENCONTRADAS. ....	47
FIGURA 28 - PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO E FUNÇÃO DE MÉRITO DA LIO MONOFOCAL. ....	48
FIGURA 29 - FLUXOGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DO NSGA-II PARA UMA LIO MONOFOCAL. ....	50
FIGURA 30 – PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO E FUNÇÕES DE MÉRITO DA LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA. ....	52
FIGURA 31 – FLUXOGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DO NSGA-II PARA UMA LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA. ....	53
FIGURA 32 - ESPAÇO DE SOLUÇÕES RESULTANTE DA OTIMIZAÇÃO DA LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA. ....	54
FIGURA 33 - SOLUÇÃO SELECIONADA PARA UMA ABERTURA DE 3 MM DE DIÂMETRO. ....	54
FIGURA 34 - SOLUÇÃO SELECIONADA PARA UMA ABERTURA DE 5 MM DE DIÂMETRO. ....	55



FIGURA 35 – ABERRAÇÃO COMA GERADA POR UMALENTE PERFEITA SUJEITA À INCIDÊNCIA OBLÍQUA DO FEIXE DE LUZ.....	56
FIGURA 36 - LIO FABRICADA POR MEIO DE UM TORNO DESALINHADO.....	57
FIGURA 37 - LIO IMPLANTADA COM DESALINHAMENTO NO SACO CAPSULAR.....	58
FIGURA 38 - GRÁFICO DO DESALINHAMENTO DO TORNO VERSUS AMPLITUDE DE ABERRAÇÃO COMA NA LIO.....	59
FIGURA 39 – MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 30 D OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	60
FIGURA 40 - DIFERENÇA ENTRE O MTF DA LIO DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	61
FIGURA 41 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	62
FIGURA 42 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	63
FIGURA 43 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS).....	63
FIGURA 44 - LIO DE +30 D OTIMIZADA DIRETAMENTE PELO MÉTODO DLS.....	64
FIGURA 45 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 25 D OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	65
FIGURA 46 - DIFERENÇA ENTRE O MTF DA LIO DE + 25 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	66
FIGURA 47 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 25 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	66
FIGURA 48 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 25 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	67
FIGURA 49 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 25 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS).....	67
FIGURA 50 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 20 D OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	68
FIGURA 51 - DIFERENÇA ENTRE O MTF DA LIO DE + 20 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	69
FIGURA 52 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 20 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	70
FIGURA 53 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 20 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	71
FIGURA 54 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 20 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS).....	71
FIGURA 55 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 15 D OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	72
FIGURA 56 - DIFERENÇA ENTRE O MTF DA LIO DE + 15 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	73
FIGURA 57 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 15 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	74
FIGURA 58 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 15 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	74
FIGURA 59 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 15 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS).....	75
FIGURA 60 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 5 D OTIMIZADA PELO NSGA- II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	76
FIGURA 61 - DIFERENÇA ENTRE O MTF DA LIO DE + 5 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	77
FIGURA 62 – MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 5 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	77
FIGURA 63 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 5 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	78
FIGURA 64 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 5 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS).....	79
FIGURA 65 – MTF DAS LIOS MONOFOCAIS.....	80

FIGURA 66 - RESÍDUO ENTRE O LIMITE DE DIFRAÇÃO E O MTF DAS LIOS MONOFOCAIS OTIMIZADAS PELO NSGA-II. ....	82
FIGURA 67 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 30 D E COMA $\Lambda/2$ OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	83
FIGURA 68 - PSF SAGITAL E TANGENCIAL DA LIO DE +30D COM COMA DE $\Lambda/2$ DE AMPLITUDE. ....	84
FIGURA 69 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	85
FIGURA 70 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	85
FIGURA 71 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS). ....	86
FIGURA 72 - DIFERENÇA ENTRE O MTF SAGITAL E TANGENCIAL DA LIO DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	87
FIGURA 73 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 30 D E COMA $\Lambda/8$ OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	88
FIGURA 74 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	88
FIGURA 75 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	89
FIGURA 76 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS). ....	90
FIGURA 77 - DIFERENÇA ENTRE O MTF SAGITAL E TANGENCIAL DA LIO DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	90
FIGURA 78 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 30 D E COMA $\Lambda/14$ OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	91
FIGURA 79 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	92
FIGURA 80 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	92
FIGURA 81 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS). ....	93
FIGURA 82 - DIFERENÇA ENTRE O MTF SAGITAL E TANGENCIAL DA LIO DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	93
FIGURA 83 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) PARA LIO DE + 30 D E COMA $\Lambda/20$ OTIMIZADA PELO NSGA-II E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	94
FIGURA 84 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D OTIMIZADA SEM CÔNICA E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	95
FIGURA 85 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DE UMA LIO ESFÉRICA TÍPICA DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	95
FIGURA 86 - MTF SAGITAL (S) E TANGENCIAL (T) DA LIO DE + 30 D AO FINAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA LOCAL (DLS). ....	96
FIGURA 87 - DIFERENÇA ENTRE O MTF SAGITAL E TANGENCIAL DA LIO DE + 30 D E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO. ....	97
FIGURA 88 - MTF TANGENCIAL DAS LIOS COM A PRESENÇA DE ABERRAÇÃO COMA. ....	98
FIGURA 89 - MTF SAGITAL DAS LIOS COM A PRESENÇA DE ABERRAÇÃO COMA. ....	98
FIGURA 90 - RESÍDUO SAGITAL DAS LIOS COM COMA OTIMIZADAS. ....	99
FIGURA 91 - RESÍDUO TANGENCIAL DAS LIOS COM COMA OTIMIZADAS. ....	99
FIGURA 92 - TOPOLOGIA DA LIOM REFRAATIVA OTIMIZADA. ....	102
FIGURA 93 - FRONTEIRA DE PARETO DAS SOLUÇÕES PARA 1,5 MM DE RAIOS DO ALGORITMO GENÉTICO. ....	103
FIGURA 94 - FRONTEIRA DE PARETO DAS SOLUÇÕES PARA 3 MM DE RAIOS DO ALGORITMO GENÉTICO. ....	104

FIGURA 95 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA VS. RAIO DA PUPILA.....	105
FIGURA 96 - MTF FOCO PRÓXIMO (0,3530) E MTF FOCO DISTANTE (0,3533) AMBOS PARA 50 LP/MM. ....	106
FIGURA 97 - MTF FOCO PRÓXIMO (0,2727) E MTF FOCO DISTANTE (0,3546) AMBOS PARA 50 LP/MM. ....	107
FIGURA 98 - MTF DA LIOM EM FUNÇÃO DO RAIO DA PUPILA. ....	108
FIGURA 99 - MTF THROUGH FOCUS PARA PUPILA DE 1,5 MM DE RAIO (50 LP/MM). ....	109
FIGURA 100 - MTF THROUGH FOCUS PARA PUPILA DE 2,5 MM DE RAIO (50 LP/MM). ....	109
FIGURA 101 - PSF NORMALIZADA EM RELAÇÃO AO LIMITE DE DIFRAÇÃO PARA PUPILA DE 1,5 MM DE RAIO: FOCO DISTANTE (À ESQUERDA) E FOCO PRÓXIMO (À DIREITA).....	110
FIGURA 102 - PSF NORMALIZADA EM RELAÇÃO AO LIMITE DE DIFRAÇÃO PARA PUPILA DE 2,5 MM DE RAIO: FOCO DISTANTE (À ESQUERDA) E FOCO PRÓXIMO (À DIREITA).....	110
FIGURA 103 – COMPARATIVO ENTRE A REZOOM E A LIOM PROPOSTA – MTF FOCO DISTANTE. ....	111
FIGURA 104 - COMPARATIVO ENTRE A REZOOM E A LIOM PROPOSTA – MTF FOCO PRÓXIMO. ....	112

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>7</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	<b>15</b>
2.1 O OLHO HUMANO .....	15
2.2 LENTES INTRAOCULARES .....	18
2.2.1 LIOs monofocais .....	19
2.2.2 LIOs multifocais.....	22
2.2.3 Modelagem de LIOs.....	25
2.3 TÉCNICAS DE MULTIFOCALIDADE .....	26
2.3.1 LIOs refrativas .....	26
2.3.2 LIOs difrativas .....	27
2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIOS .....	30
2.4.1 PSF e MTF .....	30
2.4.2 Strehl Ratio.....	36
2.4.3 Eficiência energética .....	37
2.5 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE ZEMAX .....	38
2.6 NORMATIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIOS .....	41
2.7 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE LIOS .....	43
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>46</b>
3.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>56</b>
4.1 LIOS MONOFOCAIS .....	56
4.1.1 LIO de + 30 D .....	60
4.1.2 LIO de + 25 D .....	65
4.1.3 LIO de + 20 D .....	68
4.1.4 LIO de + 15 D .....	72
4.1.5 LIO de + 5 D .....	75
4.1.6 Síntese dos resultados das LIOs monofocais .....	79
4.1.7 LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/2$ .....	83

4.1.8	LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/8$ .....	87
4.1.9	LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/14$ .....	91
4.1.10	LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/20$ .....	94
4.1.11	Síntese dos resultados das LIOs monofocais com a presença de aberração coma. 97	
4.1.12	Considerações gerais sobre as LIOs monofocais .....	100
4.2	LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA .....	101
4.2.1	Considerações gerais sobre a LIOM refrativa.....	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>114</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A lente intraocular (LIO) é uma lente artificial que se apresenta como solução bastante eficaz no tratamento cirúrgico de afacia<sup>1</sup>. Devido a sua grande importância no tratamento de catarata<sup>2</sup>, novas tecnologias de LIOs vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas, proporcionando grandes avanços na área oftalmológica (VRIES, 2011).

Softwares de traçado geométrico de raios (“*ray tracing*”) têm se tornado a principal ferramenta para modelagem computacional de sistemas ópticos. O Zemax®, desenvolvido pela Radiant Zemax, é uma ferramenta de simulação óptica sofisticada e mundialmente conhecida, que pode realizar suas simulações de duas maneiras diferentes: sequencial (“*sequential ray tracing*”) e não sequencial (“*non-sequential ray tracing*”). No modo sequencial os feixes luminosos de um determinado sistema se propagam por cada uma de suas superfícies ópticas na ordem pré-determinada pelo usuário, ou seja, de uma maneira sequencial, interceptando cada superfície apenas uma vez. Este modo é geralmente empregado em simulações de sistemas ópticos refrativos e reflexivos simples como, por exemplo, uma lente biconvexa monofocal. Já no modo não sequencial os feixes luminosos podem atingir as superfícies ópticas diversas vezes ao longo de qualquer caminho fisicamente possível. Neste modo é possível elaborar sistemas ópticos mais complexos onde as características de dispersão e difração dos raios precisam ser avaliadas e controladas. Em termos de análise óptica esses dois modos também apresentam ferramentas distintas: enquanto o modo sequencial possui diversas ferramentas de análise óptica

---

<sup>1</sup> Afacia é o termo empregado para descrever a ausência do cristalino no olho. Tal condição pode ser resultante da extração cirúrgica do cristalino devido a uma lesão perfurante, úlcera, anomalias congênitas ou catarata (MING e CONSTABLE, 1995).

<sup>2</sup> A catarata consiste na opacidade parcial ou total do cristalino (lente natural do olho). Além de causar a redução da visão, as pessoas podem observar imagens duplas, confusão para ver e distinguir cores, alteração frequente do grau de óculos, muita dificuldade para a leitura e visão pior com luminosidade. Pode ocorrer bilateralmente e ainda é a maior causa de cegueira no mundo, atingindo milhões de pessoas (MING e CONSTABLE, 1995; KRIEGLSTEIN e WEINREB, 2005).

(análise de aberrações, PSF, MTF etc.) e ferramentas de otimização baseadas em métodos determinísticos, o modo não sequencial permite apenas a avaliação da intensidade luminosa dos raios traçados (ZEMAX, 2013).

A complexidade técnica do desenvolvimento de novas LIOs (ex.: LIOs multifocais) requer modelagem computacional em modo não sequencial, a fim de que se possa avaliar o comportamento óptico do sistema de forma mais acurada. Entretanto, o número restrito de ferramentas de análise óptica presente no Zemax® para este modo limita sua capacidade de otimização dos parâmetros das LIOs. Essa limitação pode ser contornada através de uma funcionalidade oferecida por este software denominada “*Dynamic Data Exchange*” (DDE) (ZEMAX, 2013). Tal funcionalidade permite que programas elaborados em outros softwares (Matlab®, C++ etc.) sejam capazes de controlar, analisar e otimizar o desempenho do sistema óptico projetado. Com isso pode-se usar o Zemax® para traçar os raios de um dado sistema óptico complexo e em programas externos realizar análises ou cálculos que ele não tem disponíveis.

A otimização de sistemas ópticos é uma tarefa complexa, pois a natureza não linear de seus elementos e a interação entre os parâmetros acarreta em problemas de otimização não lineares e com múltiplos mínimos locais. Essa complexidade faz com que a utilização de métodos determinísticos para a busca da solução ótima do sistema seja ineficaz (THIBAUT, GAGNÉ, *et al.*, 1990; ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1999). Dessa forma, torna-se viável o emprego de métodos estocásticos de otimização para realização dessa tarefa. Os algoritmos evolutivos são uma classe de métodos estocásticos de busca global com base em populações bastante útil nessa situação (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1998; CHEN e YAMAMOTO, 1996).

Este trabalho propõe a otimização de LIOs monofocais e multifocais modeladas no modo não sequencial do Zemax® com base no algoritmo genético “*Non-dominating Sorting Genetic Algorithm II*” (NSGA-II) desenvolvido em Matlab®. Esta metodologia agrega a vantagem da busca global da solução ótima e da capacidade dos algoritmos genéticos (AG) de lidar com problemas de otimização multiobjetivos permitindo que LIOs complexas possam ter seus parâmetros otimizados para a obtenção de um bom desempenho óptico.

## 2 CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO

Com o intuito de compreender melhor a metodologia empregada para a otimização de LIOs monofocais e multifocais por meio de software de modelagem computacional proposta por este trabalho será apresentado neste capítulo alguns tópicos importantes. Tais tópicos irão abordar conceitos referentes à anatomia do olho humano, modelos de LIOs, parâmetros de avaliação da qualidade óptica de LIOs, software de modelagem computacional óptica, critérios normativos e algumas técnicas de otimização. Essa fundamentação permitirá a compreensão dos aspectos necessários à modelagem de LIOs (curvaturas, espessura, constante cônica etc.) e a complexidade de otimização desses parâmetros, que apresentam natureza não linear. Além disso, a análise dos métodos de otimização permitirá a definição do método mais adequado para atender os objetivos deste trabalho.

### 2.1 O OLHO HUMANO

O olho humano é uma complexa estrutura formada por diversos componentes ópticos que permitem a formação de imagens na retina. A retina atua como um fotossensor de alta resolução capaz de detectar comprimentos de onda que variam dentro da faixa espectral de 380 a 780 nm com pico de sensibilidade ocorrendo aproximadamente em 555 nm. O funcionamento concomitante do par de olhos garante a visão binocular, que permite a detecção tridimensional de objetos. Além disso, o olho humano possui uma extensa faixa focal, que varia aproximadamente de 8 cm a sua frente até o infinito, permitindo que objetos a diferentes distâncias sejam focalizados nitidamente (WILSON, 2011).

A estrutura óptica do olho humano é apresentada na Figura 1.



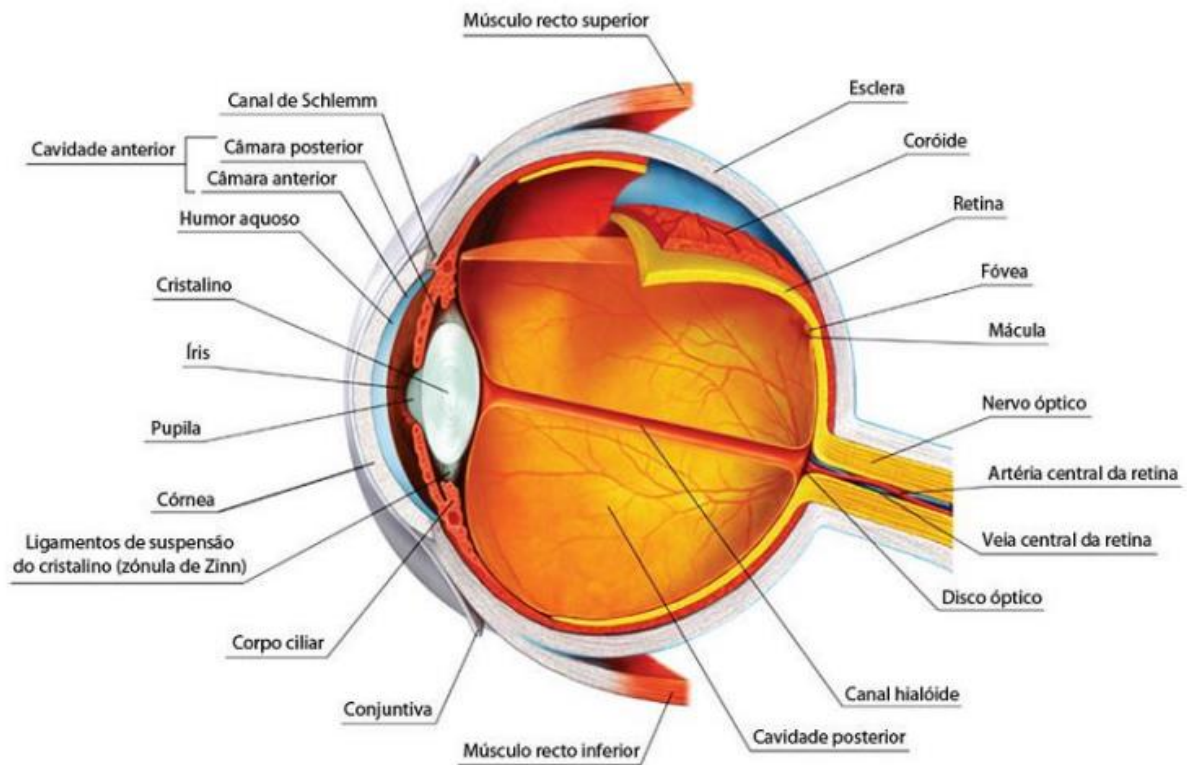


Figura 1 - Estrutura óptica do olho humano.

Fonte: Adaptado de: <http://www.virtualmedicalcentre.com/anatomy/the-eye-and-vision/28>.

A formação da imagem na retina se dá pela propagação da luz através dos elementos ópticos do olho. Inicialmente, a luz incidente é refratada pela córnea e atravessa a câmara anterior (região preenchida por um líquido denominado humor aquoso) até alcançar a íris. A íris controla a abertura do sistema óptico do olho (pupila) de acordo com a tensão/relaxamento dos músculos que compõem o corpo ciliar. A alteração do tamanho da pupila controla a quantidade de luz que irá atravessar a câmara posterior (região também preenchida pelo humor aquoso) até atingir o cristalino e impacta a profundidade de foco do olho. O cristalino é formado por uma estrutura celular flexível composta de diversas camadas. A região equatorial do cristalino é fixada a estruturas conhecidas como zônulas ou ligamentos, que são pequenas fibras elásticas conectadas ao corpo ciliar. Os músculos ciliares são responsáveis pelo processo de acomodação do olho permitindo que objetos distantes ou próximos sejam observados com detalhe (WILSON, 2011). Após atravessar o cristalino a luz se propaga pela cavidade posterior (região preenchida por um líquido denominado humor vítreo) até atingir a retina.

A retina é formada por uma série de camadas de células e pigmentos e uma camada de tecido nervoso (Figura 2).

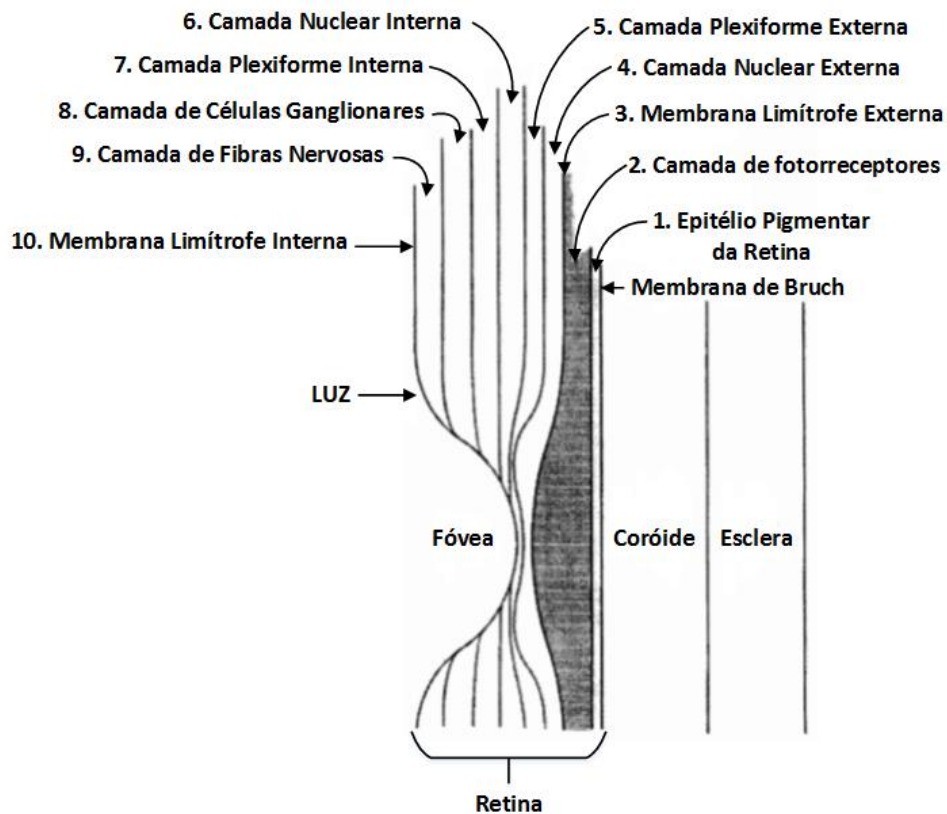


Figura 2 – Camadas da retina.

Fonte: Adaptado de: (ATCHISON e SMITH, 2002).

Cada camada, durante o processo de reflexão, absorção e espalhamento da luz incidente, tem sua devida importância no processo óptico de formação da imagem no olho. A espessura da retina varia entre a faixa de 50  $\mu\text{m}$  (no centro da fóvea) até aproximadamente 600  $\mu\text{m}$  em sua periferia. A fóvea é a região de maior concentração de fotorreceptores sendo, portanto, considerada a região de maior acuidade visual da retina. A camada com as células fotossensíveis se encontra na região mais interna da retina, sendo necessário, portanto, que a luz atravesse as outras camadas para atingir essa região. As células que compõem essa camada são denominadas cones e bastonetes. Os bastonetes são definidos como células capazes de detectar baixos níveis de luminosidade em relação aos cones, que são considerados menos sensíveis à intensidade luminosa e mais sensíveis ao comprimento de onda. As características dos cones e bastonetes são, geralmente, atribuídas ao formato de suas células (os bastonetes são, em geral, mais compridos e estreitos que os cones), entretanto, elas se devem, principalmente, à estrutura neural conectada a tais células. A rede neural que se conecta aos bastonetes é de tal forma que as saídas de aproximadamente 100 bastonetes podem ser encaminhadas ao cérebro combinadas em uma única via da rede neural. Devido a isso, os bastonetes apresentam melhor sensibilidade em condições de intensidade luminosa reduzida, mas baixa resolução espacial. Em

contrapartida, os cones possuem uma rede neural em que cada via da rede neural transmite a informação de poucos cones. Isso faz com que os cones tenham melhor resolução espacial e tenham menos sensibilidade em condições de baixa luminosidade. Além disso, os cones apresentam uma taxa de aquisição da exposição luminosa mais rápida que os bastonetes e suas células são de três tipos, cada uma com uma sensibilidade diferente a uma determinada faixa de comprimento de onda: cones longos, médios e curtos (ATCHISON e SMITH, 2002). O processo neuronal responsável pela captura e processamento do sinal de imagem fornecido pelos cones e bastonetes é bastante complexo e tem um grande impacto sobre a imagem que é formada no cérebro da pessoa em relação à imagem incidente em sua retina.

Convém destacar que o cristalino e a córnea são os principais elementos refrativos do sistema óptico do olho cujo poder dióptrico<sup>3</sup> total em seu estado não acomodado é geralmente de cerca de 60 D. Tipicamente a córnea é responsável por aproximadamente 65% do poder dióptrico total do olho sendo que sua curvatura anterior contribui com 48 D e sua curvatura posterior contribui com -6 D. O cristalino em seu estado não acomodado contribui com um poder dióptrico de 19 D e em seu estado acomodado contribui com um poder de aproximadamente 30 D (WILSON, 2011).

## 2.2 LENTES INTRAOCULARES

O implante de lentes intraoculares (LIOs) tem se tornado, nos últimos anos, a técnica mais eficaz e recomendada para o tratamento de afacia. A LIO implantada no lugar do cristalino comprometido tem o objetivo de prover o poder dióptrico necessário à correta formação da imagem na retina. As principais topologias de LIOs presentes no mercado, dentre as quais pode-se citar: LIOs monofocais e LIOs multifocais refrativas, difrativas e híbridas, serão abordadas nos tópicos seguintes, juntamente com a descrição das características de cada uma delas.

---

<sup>3</sup> Poder dióptrico ou dioptria é uma unidade de medida que afere o poder de vergência de um sistema óptico ( $m^{-1}$ ). Para o caso de lentes essa unidade é popularmente conhecida como grau.

### 2.2.1 LIOs monofocais

As LIOs monofocais apresentam uma única distância focal permitindo que objetos a uma distância fixa (em geral objetos distantes) sejam focalizados nitidamente na retina. Entretanto, normalmente, exige-se o uso de óculos para leitura ou para visão intermediária, afinal ela não permite uma boa qualidade visual para objetos/cenas distantes e próximos/próximas simultaneamente. Além disso, ao contrário do cristalino, o formato e a posição de uma lente monofocal são fixos e desse modo a acomodação é perdida (BASS, 2010).

As primeiras LIOs monofocais desenvolvidas eram formadas por duas superfícies esféricas com mesmo poder dióptrico (lente biconvexa simétrica – Figura 3.A). Este é o design mais básico para uma LIO e é o mais simples para sua manufatura (RAWER, STORK, *et al.*, 2005). Todavia, este formato esférico da lente provoca algumas distorções na imagem devido à presença de aberração esférica<sup>4</sup>. Essa degradação na imagem ocorre, pois em uma LIO esférica os feixes luminosos que atravessam a periferia da lente sofrem refração com uma vergência maior do que os feixes luminosos que atravessam a região central da LIO (Figura 3.B).

---

<sup>4</sup> Aberrações são distorções presentes em imagens provocadas por turbulências no meio de propagação dos feixes luminosos ou devido à estrutura óptica dos elementos por onde os feixes se propagam. Existem diversos tipos de aberrações: aberração esférica, astigmatismo, coma, entre outros (OLIVEIRA, 2012).

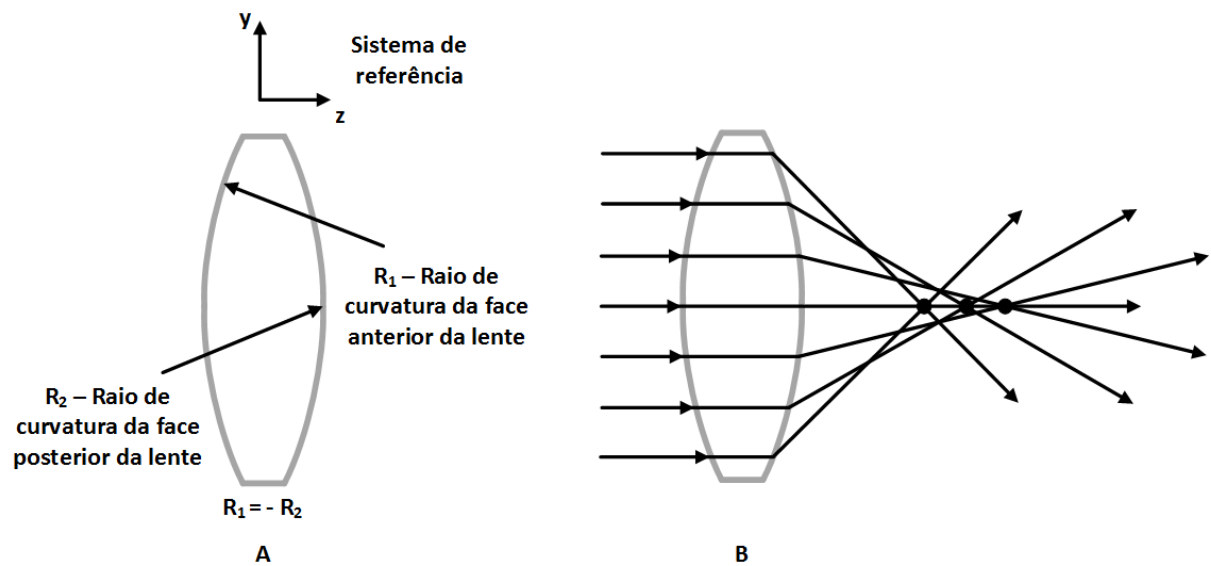


Figura 3 - LIO monofocal: A) LIO esférica biconvexa e B) Vergência dos raios na LIO esférica.

Fonte: Autoria própria.

Nas últimas décadas o aprimoramento das técnicas de fabricação de LIOs permitiu que superfícies não esféricas complexas pudessem ser construídas, comercialmente denominadas NTIOL (*New Technology Intra-Ocular Lenses*), ou lentes *premium*. As LIOs com superfícies não esféricas, designada por LIOs asféricas, permitem a redução da aberração esférica garantindo melhor qualidade de imagem em relação às LIOs esféricas. Na LIO asférica os raios luminosos que atravessam sua periferia e sua região central são focalizados sobre o mesmo ponto (Figura 4).

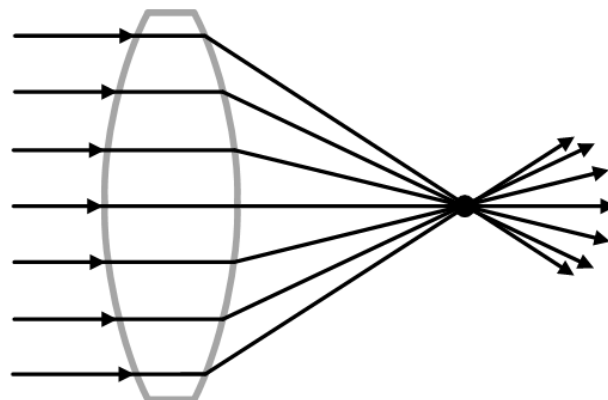


Figura 4 - Vergência dos raios em uma LIO asférica.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 apresenta o resultado de uma simulação realizada em um software de modelagem computacional óptica (Zemax®). Nessa simulação foram modeladas duas LIOs

diferentes: uma LIO esférica e uma LIO asférica. Através da Figura 5 pode-se obter uma noção qualitativa do impacto da aberração esférica na degradação de uma imagem e consequentemente a melhoria adquirida com o surgimento das LIOs asféricas.

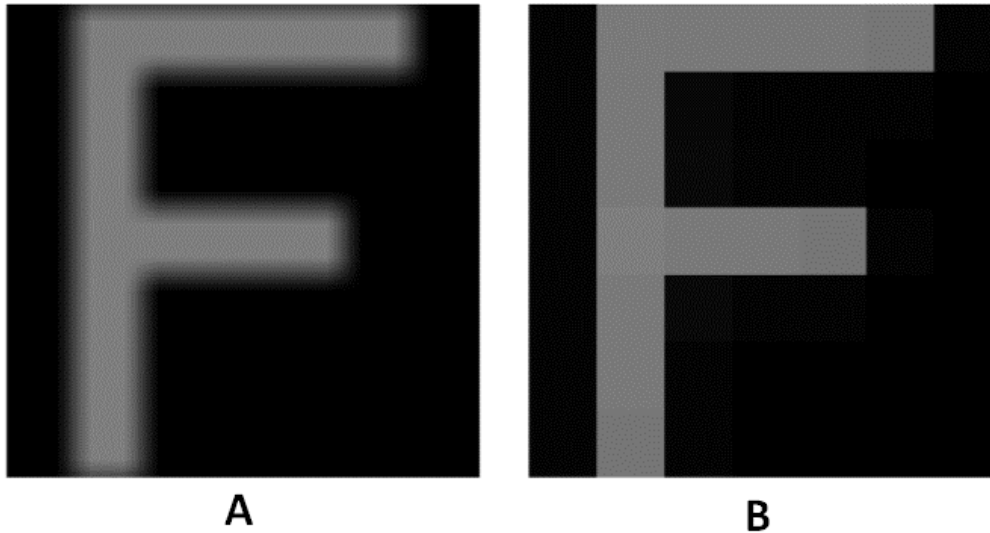


Figura 5 – Imagem formada: A) por uma LIO esférica e B) por uma LIO asférica.

Fonte: Autoria própria.

A superfície de uma LIO asférica é definida por meio de uma seção cônica. A equação que descreve seu formato em relação ao seu eixo axial  $z$  (sistema de referência ilustrado na Figura 3) é dada pela equação (1) (FREEMAN, 2007):

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} \quad (1)$$

onde  $c$  é a curvatura da superfície (recíproco do raio de curvatura),  $r$  é a distância radial da superfície da lente em relação ao seu eixo óptico e  $k$  é a constante cônica que define a asfericidade da LIO. Pode-se notar pela equação (1) que:

- se  $k = 0$  a superfície  $z$  é esférica
- se  $k < -1$  a superfície  $z$  é hiperbólica
- se  $k = -1$  a superfície  $z$  é parabólica
- se  $-1 \leq k \leq 0$  a superfície  $z$  é elipsoidal.

Logo, uma LIO asférica pode ter formato hiperbólico, parabólico ou elipsoidal dependendo do valor da sua constante cônica.

A dioptria de uma LIO monofocal, seja esférica ou asférica, com espessura central  $t$ , índice de refração  $n_{lio}$  e raios de curvatura  $R_1$  e  $R_2$  é expressa por (DERENIAK e DERENIAK, 2008):

$$D = \left( \frac{n_{lio}}{n_{meio}} - 1 \right) \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t[(n_{lio}/n_{meio}) - 1]}{n_{lio}R_1R_2} \right\} \quad (2)$$

onde  $n_{meio}$  é o índice de refração do meio em que a LIO está imersa. Caso a espessura da LIO seja pequena de modo que  $(1/t \gg D)$ , então o termo da equação (2) que contém a espessura pode ser ignorado resultando em uma expressão simplificada para o cálculo da dioptria dada por (DERENIAK e DERENIAK, 2008):

$$D = \left( \frac{n_{lio}}{n_{meio}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

A equação (3) é comumente conhecida como equação dos fabricantes de lentes.

### 2.2.2 LIOs multifocais

Com o objetivo de se garantir uma boa qualidade visual tanto para perto quanto para longe sem o uso de óculos tem-se buscado nos últimos anos o desenvolvimento de lentes com mais de uma distância focal (LIOs multifocais). Os múltiplos pontos focais<sup>5</sup> criados por uma LIO multifocal ao longo do eixo óptico (veja Figura 6) formam imagens simultâneas na retina.

---

<sup>5</sup> Atualmente existem LIOs multifocais que criam dois ou três pontos focais. As LIOs com dois pontos focais (bifocais) permitem a correção da visão para perto e longe. Já as LIOs com três pontos focais (trifocais) permitem a correção da visão para perto, intermediário e longe (GATINEL, PAGNOULLE, *et al.*, 2011).

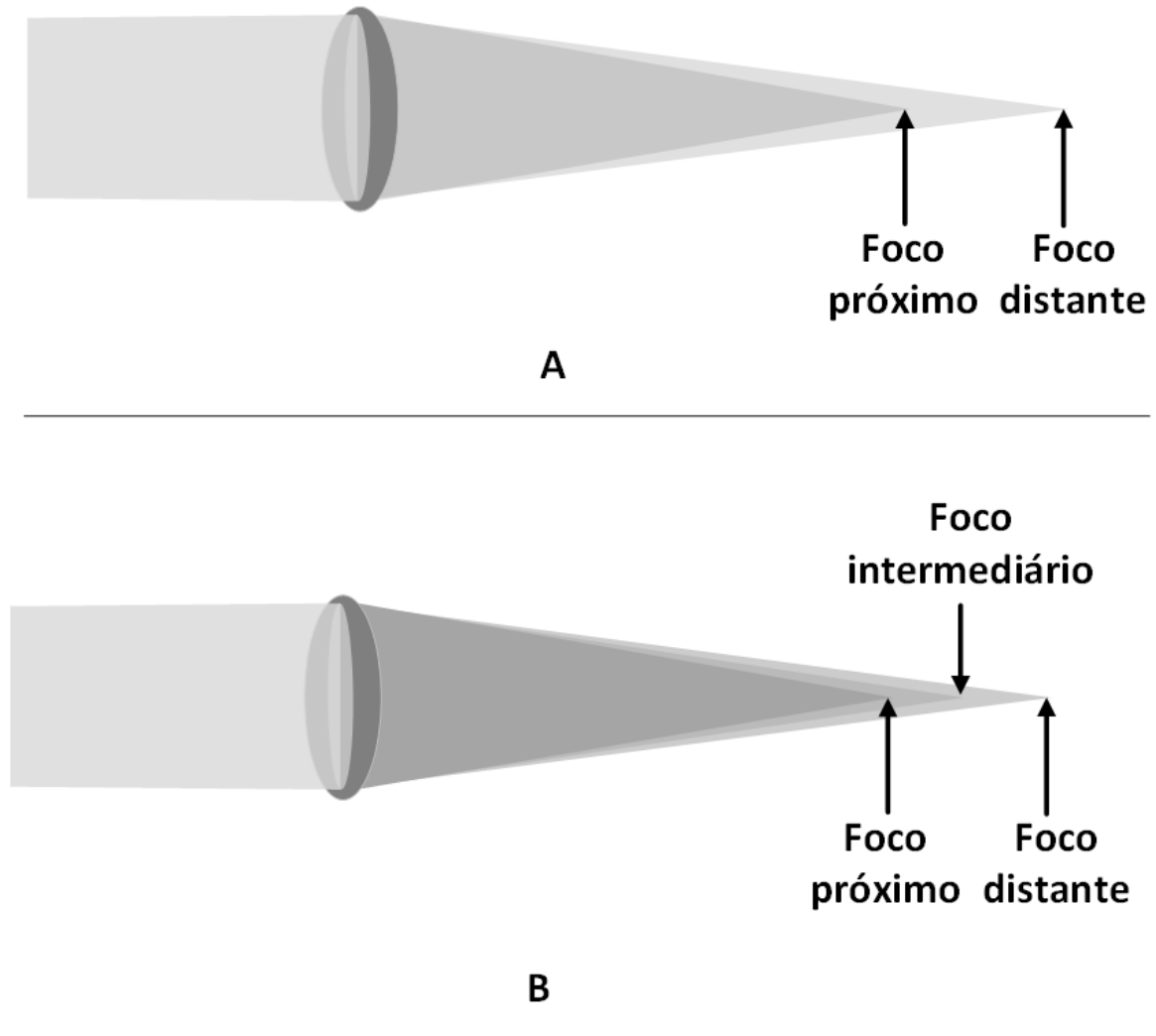


Figura 6 - LIO multifocal: A) bifocal e B) trifocal.

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, quando um objeto distante é observado, uma imagem nítida é formada na retina em função do foco distante criado. Os outros pontos focais (próximo e/ou intermediário) formarão imagens embaçadas e superpostas na retina (Figura 7).



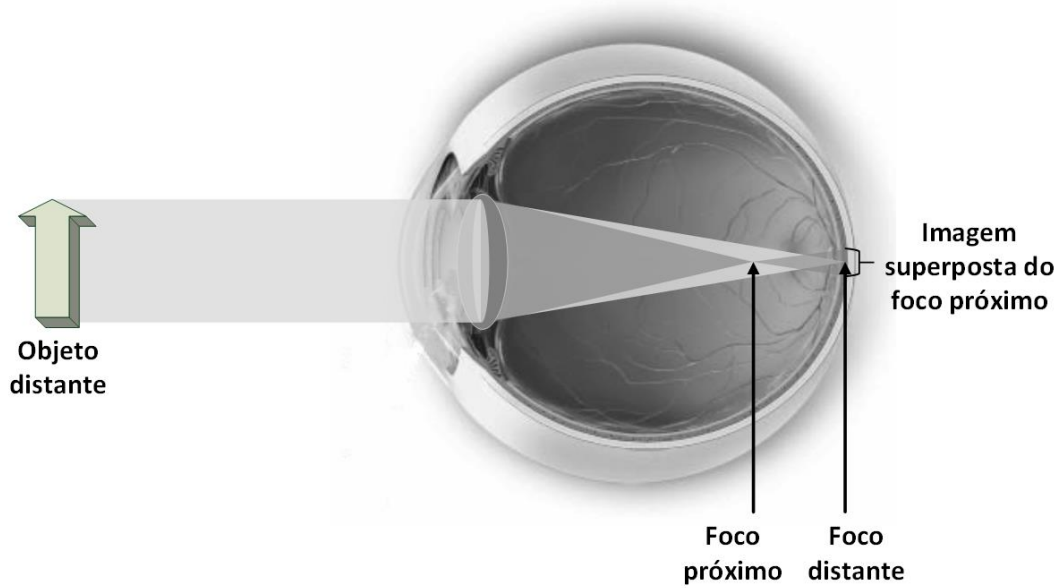


Figura 7 - Objeto distante sendo focalizado por uma LIO bifocal.

Fonte: Autoria própria.

Quando um objeto próximo está sendo observado, a situação é semelhante, ou seja, tem-se uma imagem nítida formada na retina em função do foco próximo criado e os outros pontos focais formam imagens superpostas na retina (Figura 8). A superposição das imagens que não estão focalizadas na retina reduz a nitidez da imagem em foco, entretanto, a adaptação do cérebro é de suma importância para distinguir a imagem em foco (VRIES, 2011; MONTÉS-MICÓ, ESPAÑA, *et al.*, 2003; MATHEN, 2010).

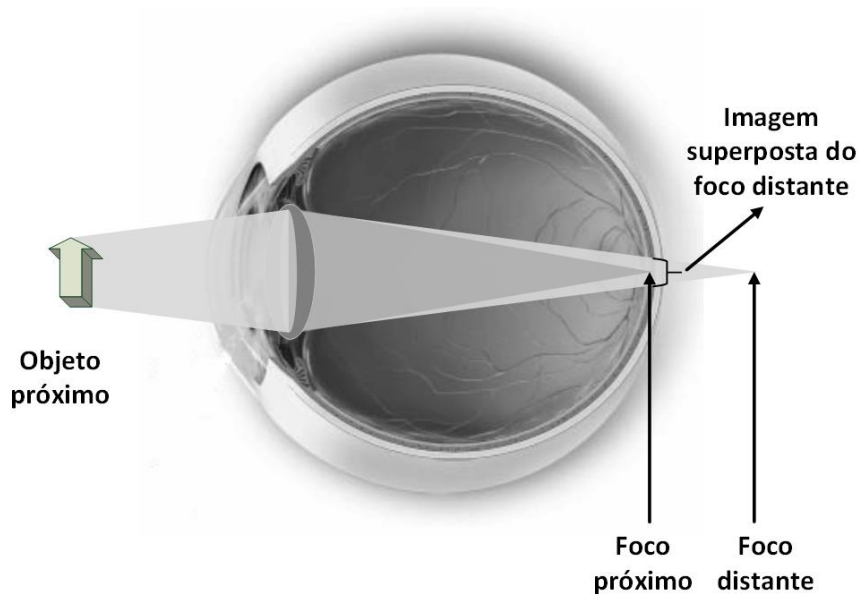


Figura 8 - Objeto próximo sendo focalizado por uma LIO bifocal.

Fonte: Autoria própria.

As lentes multifocais atualmente existentes podem ser divididas em três principais categorias (MONTÉS-MICÓ, ESPAÑA, *et al.*, 2003):

- **Lentes refrativas:** seu princípio de funcionamento se baseia na refração da luz ao atravessar o material da lente.
- **Lentes difrativas:** seu princípio de funcionamento se baseia na difração da luz ao atravessar uma rede difrativa construída na lente.
- **Lentes híbridas:** utilizam os dois princípios definidos anteriormente (refrativo e difrativo) em conjunto.

### 2.2.3 Modelagem de LIOs

A modelagem de LIOs é comumente baseada no traçado de raios (do inglês "*ray tracing*") realizado por softwares de modelagem óptica. Tais softwares estão em constante evolução, integrando cada vez mais funcionalidades, e permitem, através de uma interface gráfica, o design, de forma rápida e eficiente, de uma série de sistemas ópticos. Entretanto, com a rápida evolução tecnológica de diversos setores da indústria (oftalmológica, automotiva, aeroespacial etc.) torna-se necessário que esses softwares de modelagem permitam ao usuário uma boa flexibilidade para o desenvolvimento, controle e otimização de soluções e designs ópticos inovadores. Atualmente, os diversos pacotes de software de modelagem óptica comerciais (Zemax, ASAP, SPEOS etc.) permitem a integração de programas externos e de bibliotecas dinâmicas em sua modelagem computacional. Essa funcionalidade permite que o usuário tenha a flexibilidade de manipular as variáveis e elementos do software de modo a maximizar as possibilidades operacionais existentes no mesmo. Além disso, as ferramentas de otimização dos softwares de modelagem podem apresentar limitações. Tais ferramentas geralmente se baseiam em algoritmos de busca local e esses algoritmos necessitam da experiência do usuário na definição dos parâmetros iniciais do design óptico para que o processo de otimização convirja (estes aspectos serão descritos com mais detalhes nos próximos tópicos deste trabalho). A integração com softwares externos permite, portanto, que essa etapa seja automatizada, de modo a evitar que seja necessária uma grande experiência do usuário no processo (MICHAEL, KRONEBERGER e HERMANN, 2012).

## 2.3 TÉCNICAS DE MULTIFOCALIDADE

### 2.3.1 LIOs refrativas

Para garantir a pluralidade de focos necessária a uma boa acuidade visual tanto para longe quanto para perto as LIOs multifocais refrativas, geralmente, são baseadas em zonas anelares concêntricas com diferentes curvaturas. Essas diferentes curvaturas corresponderão a diferentes dioptrias e, portanto, fornecerão diferentes pontos focais (MONTÉS-MICÓ, ESPAÑA, *et al.*, 2003; FIALA, 2010). O poder dióptrico de cada região da LIO multifocal refrativa é determinado de maneira semelhante à da LIO monofocal (equação (2)). Uma LIO multifocal refrativa pode ser formada, por exemplo, por duas regiões com curvaturas diferentes, onde a região central possui curvatura responsável pela formação de um foco próximo e a região anelar externa é responsável pela formação de um foco distante. Com essa configuração formam-se no eixo óptico dois pontos focais (Figura 9).



Figura 9 - LIO multifocal refrativa.

Fonte: Autoria própria.

### 2.3.2 LIOs difrativas

A difração é um fenômeno físico que se constitui na distorção causada na frente<sup>6</sup> de uma onda eletromagnética que incide sobre um obstáculo de dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda. A interação da radiação com as bordas do obstáculo causa uma perturbação na radiação em propagação e a espalha para regiões onde ela não deveria, normalmente, ser detectada. Os aspectos essenciais da difração podem ser explicados qualitativamente pelo princípio de Huygens. Segundo ele, cada ponto na frente de onda age como uma fonte produzindo ondas secundárias que se espalham em todas as direções. A função envelope das frentes de onda das ondas secundárias forma a nova frente de onda total (Figura 10). Com este princípio pode-se perceber que cada nova frente de onda é formada pela interferência de infinitas fontes, as quais estão se irradiando a partir da frente de onda num instante anterior (O'SHEA, SULESKI, *et al.*, 2004).

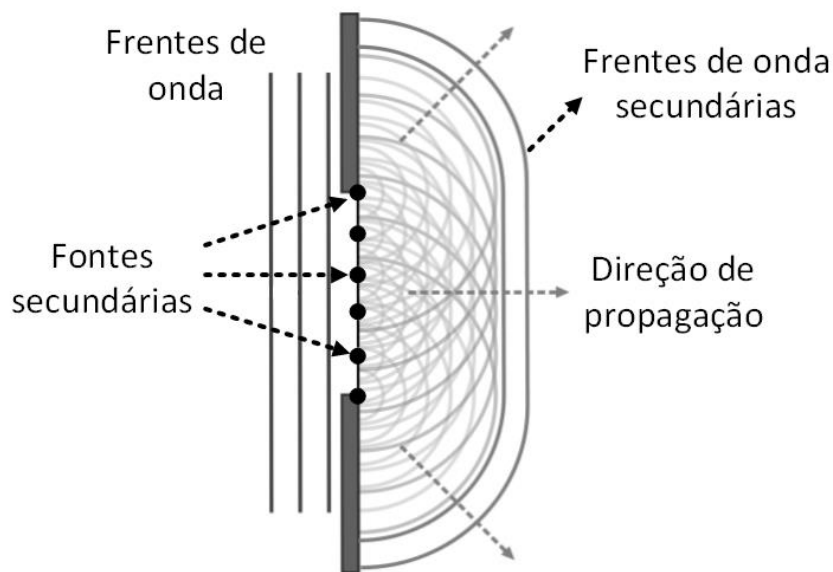


Figura 10 - Princípio de Huygens.

Fonte: Adaptado de: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio\\_de\\_Huygens](http://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_de_Huygens).

---

<sup>6</sup> Frente de onda é a região do espaço onde todos os pontos da onda em propagação estão em fase (OLIVEIRA, 2012).

Uma LIO multifocal difrativa é formada por uma rede de degraus que faz com que o feixe incidente sofra difração ao atravessá-la. Dessa forma o feixe original é decomposto em diversos raios secundários (denominados ordens difrativas) cuja quantidade de energia luminosa corresponde a uma porcentagem da energia luminosa incidente. Através deste fenômeno as ordens difrativas com maior porcentagem de energia luminosa serão responsáveis pela formação dos múltiplos pontos focais. Os fatores que irão determinar a distribuição energética das ordens difrativas são a altura do degrau e o comprimento de onda da luz em propagação, ou seja, para um dado comprimento de onda de luz é possível controlar a porcentagem de energia luminosa transmitida em cada ordem difrativa através da altura do degrau da rede difrativa da LIO. A Figura 11 ilustra o princípio de funcionamento de uma LIO multifocal difrativa. O feixe incidente sofrerá difração em cada um de seus degraus e de acordo com a altura dos degraus da LIO apenas algumas ordens difrativas (em destaque as ordens 0, +1 e +2) serão responsáveis pela formação dos pontos focais principais sobre o eixo óptico.

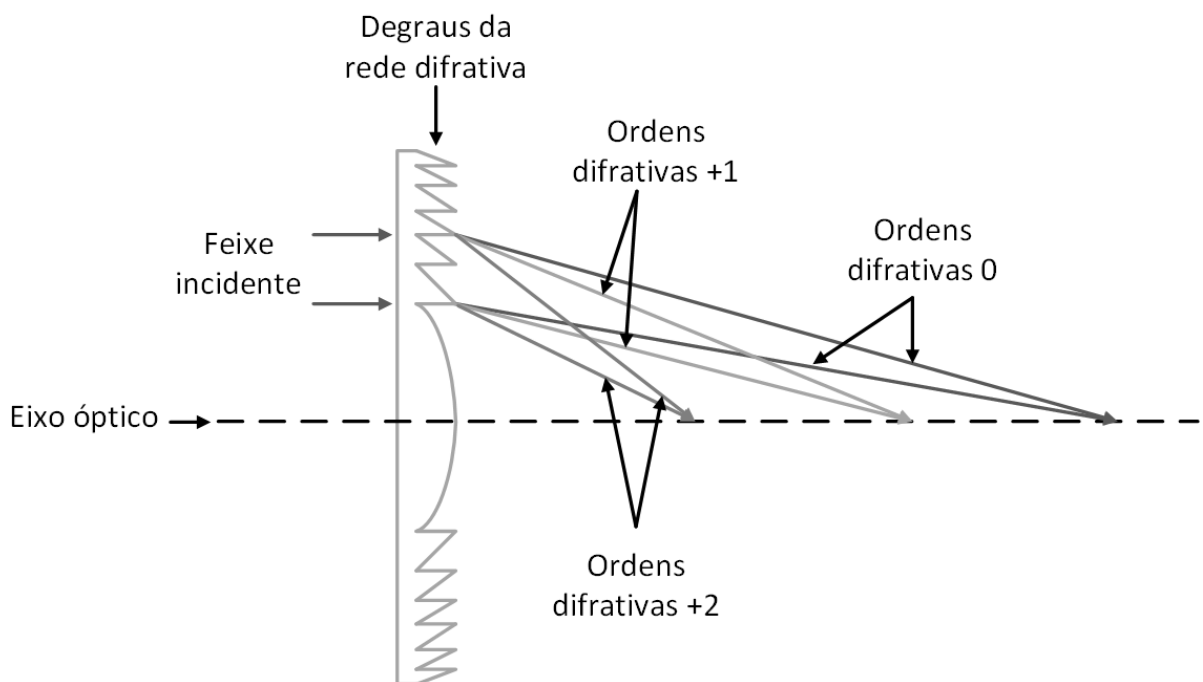


Figura 11 – LIO difrativa.

Fonte: Autoria própria.

Convém destacar que o projeto de uma LIO difrativa é realizado para um dado comprimento de onda de operação, ou seja, se a LIO for usada com um comprimento de onda  $\lambda$  diferente do comprimento de onda de projeto  $\lambda_0$ , tanto o seu comprimento focal quanto a eficiência energética atribuída a cada ordem difrativa sofrerão alterações em relação ao

projetado (O'SHEA, SULESKI, *et al.*, 2004). Como a luz visível abrange uma faixa espectral que vai de 380 a 780 nm tem-se que uma LIO difrativa, geralmente, projetada para um comprimento de onda em torno de 555 nm (cor verde), apresentará diferentes comprimentos focais e diferentes eficiências energéticas para as ordens difrativas dos diversos comprimentos de onda que compõem a luz visível. Apesar de tais efeitos estarem presentes em uma LIO difrativa não significa que a mesma será ineficaz ao trabalhar com outros comprimentos de onda. A LIO apenas não terá um desempenho tão bom para os outros comprimentos de onda quanto o comprimento de onda para o qual foi projetada. Para compreender quantitativamente essa questão é apresentado na Figura 12 o gráfico da eficiência de algumas ordens difrativas em função do comprimento de onda para uma LIO difrativa monofocal com estrutura de degraus semelhante à LIO da Figura 11. Essa LIO foi projetada para um comprimento de onda de 633 nm. Pode-se notar pela Figura 12 que para o comprimento de onda de projeto (633 nm) toda a energia incidente é transmitida para a ordem 1. Para comprimentos de onda acima e abaixo do comprimento de onda de projeto da LIO observa-se que a eficiência da ordem 1 é reduzida e a energia incidente se distribui, em menor proporção, para as outras ordens. De qualquer forma percebe-se que para toda a faixa de comprimentos de onda da luz visível a ordem difrativa predominante é a ordem 1, que é a ordem difrativa priorizada durante o projeto da LIO em questão.

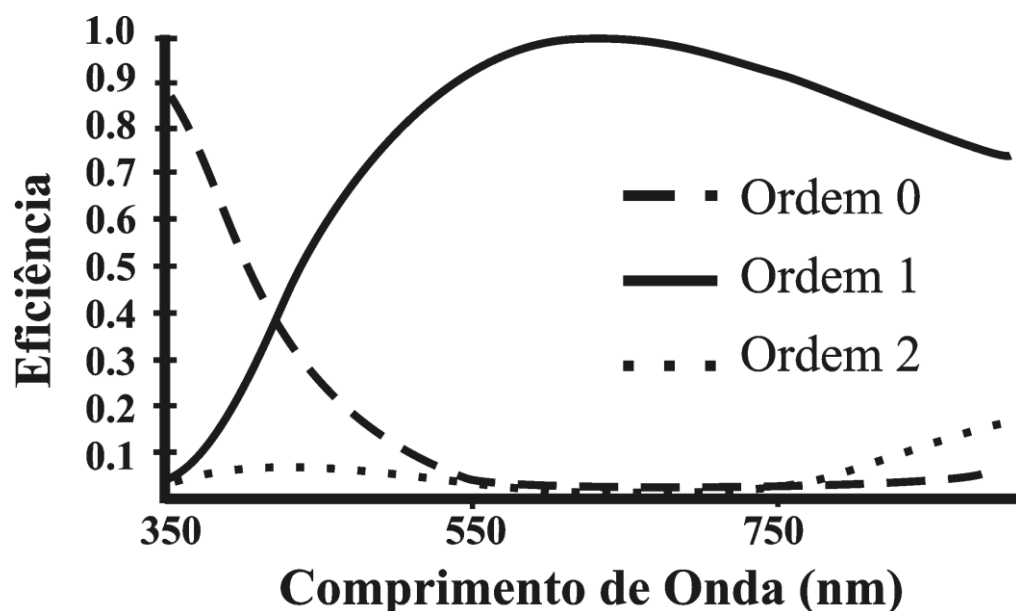


Figura 12 – Eficiência de uma LIO difrativa monofocal em função do comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de: (O'SHEA, SULESKI, *et al.*, 2004).

## 2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIOs

### 2.4.1 PSF e MTF

A resolução espacial de uma lente, ou seja, sua capacidade de distinguir dois pontos no espaço é caracterizada pela função de espalhamento de ponto (PSF – “*Point Spread Function*”). Teoricamente, a PSF é a imagem de um objeto pontual infinitesimalmente pequeno. Essa imagem não é, entretanto, perfeitamente um ponto. Ela é formada por anéis ou franjas luminosas em torno de um disco luminoso (Figura 13). Tal efeito ocorre porque o desempenho do sistema óptico (lente) é limitado por fenômenos de difração, que surgem devido à abertura finita do sistema. A PSF pode ser interpretada, portanto, como a resposta ao impulso  $h(x, y)$  do sistema óptico, correspondendo à distribuição espacial de irradiância ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) da imagem pontual formada (BOREMAN, 2001).

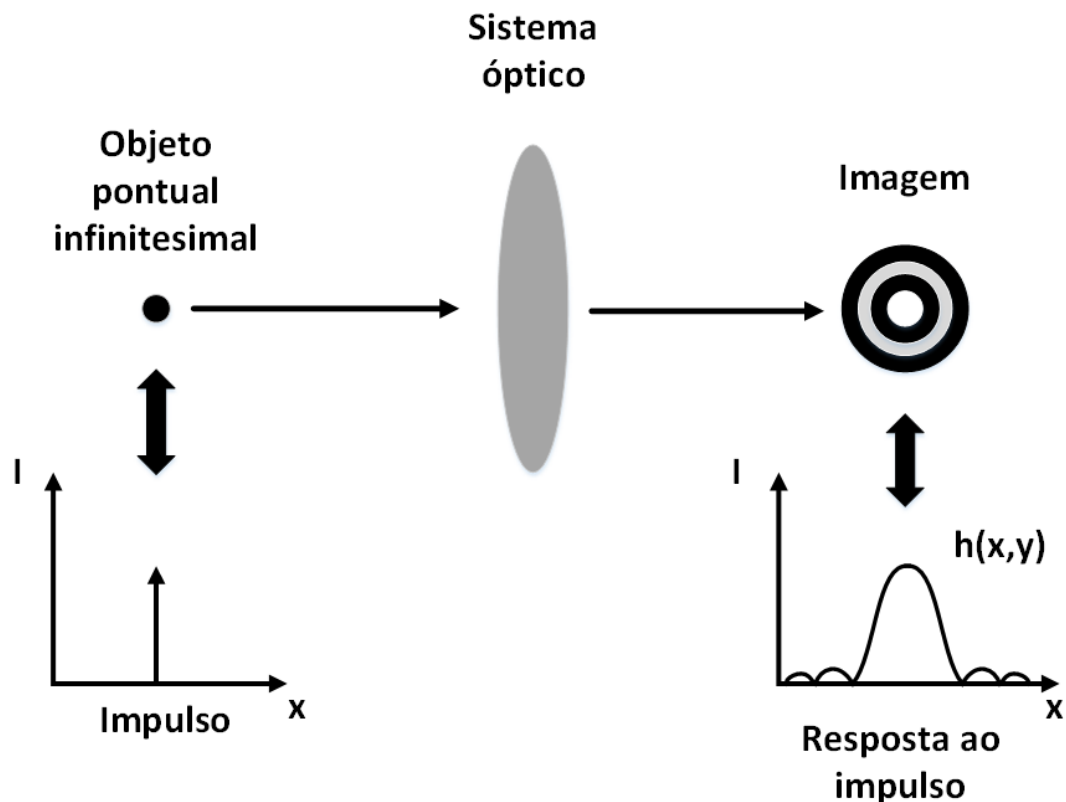


Figura 13 - Distribuição espacial do objeto e da imagem para um sistema óptico real.

Fonte: Autoria própria.

Quanto mais estreita for a distribuição de irradiância de  $h(x, y)$  mais próxima de um impulso ela se torna (e maior se torna o pico de irradiância) proporcionando uma melhor representação pontual do objeto. Isto implica, portanto, que melhor é a qualidade da imagem formada pelo sistema.

Uma forma alternativa de avaliar o desempenho óptico de um sistema consiste em analisar o processo de formação de imagem no domínio da frequência. Um método bastante utilizado cientificamente para realização de tal análise é o MTF (“*Modulation Transfer Function*”).

O MTF fornece uma medida do contraste da imagem formada. Para compreender melhor como interpretar a informação fornecida por uma curva de MTF considere-se um objeto formado por um padrão de cor claro/escuro com sua intensidade luminosa variando de forma senoidal (Figura 14.A). A intensidade luminosa do objeto apresenta o comportamento indicado na Figura 14.B onde os picos (intensidade máxima/maior brilho) correspondem à cor branca e os vales (intensidade mínima/menor brilho) correspondem à cor preta.

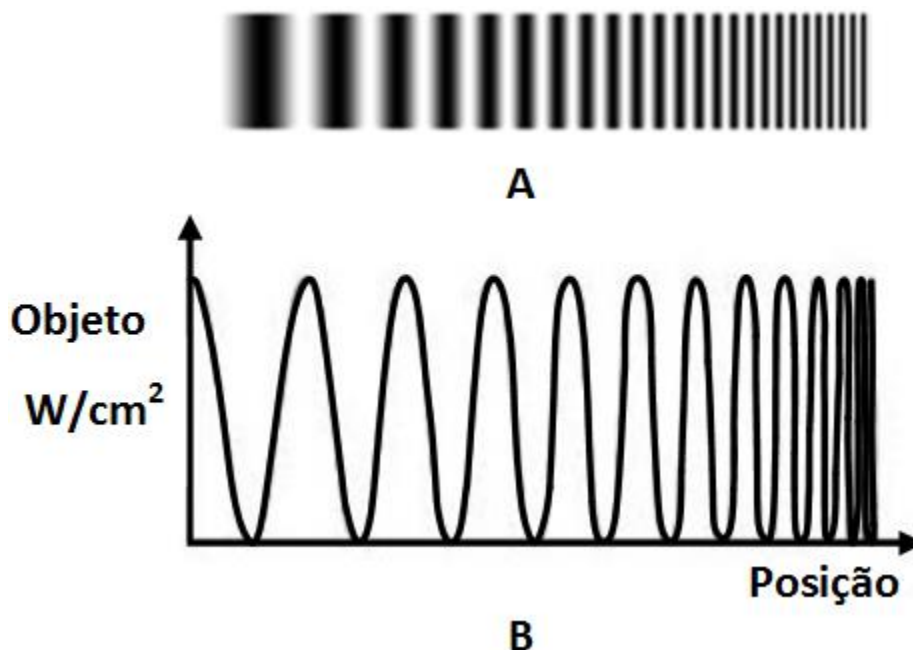


Figura 14 – A) Objeto padrão e B) sua curva de intensidade.

Fonte: <http://www.bobatkins.com/photography/technical/mtf/mtf1.html>.

Pelo objeto apresentado na Figura 14.A pode-se notar que as linhas claro/escuro se tornam cada vez mais estreitas e elas estão cada vez mais próximas. Em outras palavras pode-se dizer que a frequência espacial do objeto aumenta partindo-se da extremidade esquerda para a extremidade direita na Figura 14.A. O MTF de um sistema óptico permite avaliar o quão



fidedigna será a transferência de contraste do objeto para a imagem. Supondo que o MTF de um sistema óptico seja de 100% para todas as frequências espaciais tem-se que a imagem formada será idêntica ao objeto apresentado na Figura 14.A (veja primeira linha da Figura 15). À medida que o MTF vai decrescendo (considerando ainda que o MTF seja constante para todas as frequências espaciais do objeto) a imagem vai ficando cada vez mais embaçada devido à baixa transferência de contraste pelo sistema (Figura 15).

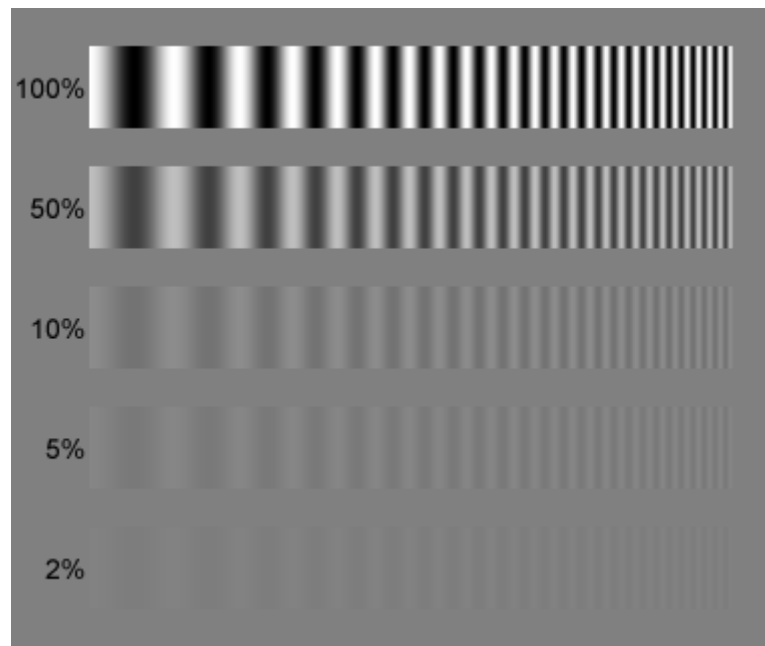


Figura 15 - Transferência de contraste para uma imagem considerando diferentes valores de MTF.

Fonte: <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html>.

A Figura 15 corresponde, na verdade, a uma aproximação teórica do que realmente acontece na realidade, afinal o MTF de qualquer sistema óptico, não importa o quão perfeito ele seja, não é constante para todas as frequências espaciais do objeto. Devido à influência de fenômenos de difração provenientes da abertura finita um sistema óptico real sempre apresentará uma curva de MTF decrescente à medida que a frequência espacial aumenta (Figura 16.C). Dessa forma, caso um objeto com distribuição de intensidade luminosa representada pela Figura 16.A seja projetado por um sistema óptico com curva de MTF dada pela Figura 16.C tem-se que a imagem formada apresentará uma distribuição de intensidade dada pela Figura 16.B. Convém notar que para altas frequências espaciais a intensidade da imagem é bastante atenuada em relação à intensidade luminosa do objeto, caracterizando, assim, uma redução no contraste.

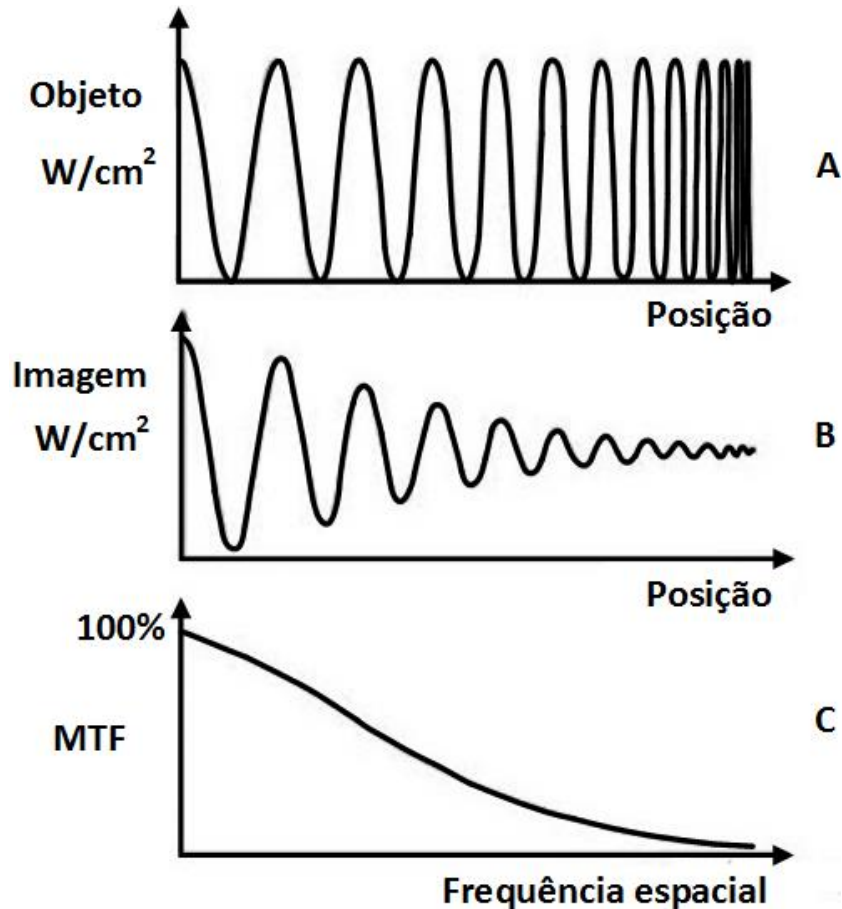


Figura 16 - Distribuição espacial da intensidade do objeto e da imagem para um sistema limitado por difração.

Fonte: Autoria própria.

Sistemas ópticos reais podem apresentar, também, aberrações que irão comprometer ainda mais seu MTF. A Figura 17 apresenta uma curva de MTF típica de um sistema óptico real (curva com círculos fechados). Pela Figura 17 pode-se notar que o MTF apresenta ordenada normalizada e sua abscissa é dada por  $\text{mm}^{-1}$  representando a frequência espacial do sistema, ou seja, o eixo x do MTF corresponde à quantidade de ciclos (linhas claro/escuro – veja Figura 14.A) por unidade de comprimento (no caso em questão mm) que é capaz de ser transmitida com algum contraste pelo sistema. A curva com triângulos é conhecida como limite de difração e corresponde a um limite superior representando, portanto, o melhor desempenho que um sistema óptico pode alcançar em termos de contraste/nitidez. Considerando as LIOs esféricas e asféricas discutidas anteriormente tem-se que a curva de MTF apresentada na Figura 17 poderia representar o MTF de uma LIO esférica, pois a presença de aberração esférica prejudica seu MTF, enquanto que uma LIO asférica poderia ter um MTF exatamente sobre a curva de limite de difração desde que a aberração esférica seja totalmente corrigida e nenhum outro tipo de aberração esteja presente na LIO.

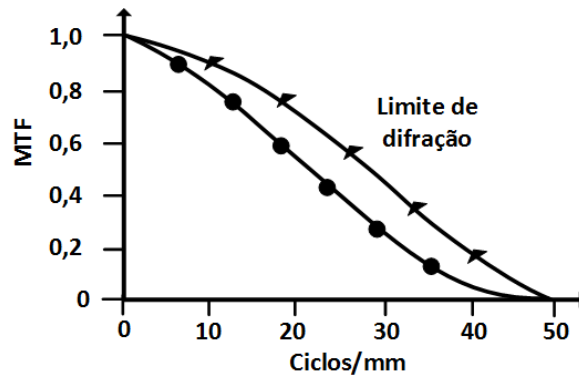


Figura 17 - MTF de um sistema óptico real e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Um sistema óptico é, portanto, capaz de atingir seu limite de difração desde que o mesmo esteja livre de aberrações. Nessa situação o desempenho do sistema é apenas limitado pelos efeitos de difração (daí o nome de limite de difração para essa curva). Para se ter uma noção qualitativa do desempenho de sistemas ópticos quanto a sua curva de MTF é apresentada na Figura 18.A a imagem projetada por sistema óptico limitado por difração e na Figura 18.B a mesma imagem projetada por um sistema óptico com MTF abaixo do seu limite de difração. Na Figura 18.B pode-se notar que as quinas e bordas da imagem (detalhes que representam frequências espaciais elevadas na imagem) se encontram embaçadas devido à baixa da transferência de contraste para altas frequências espaciais provenientes de um sistema com MTF abaixo do limite de difração.

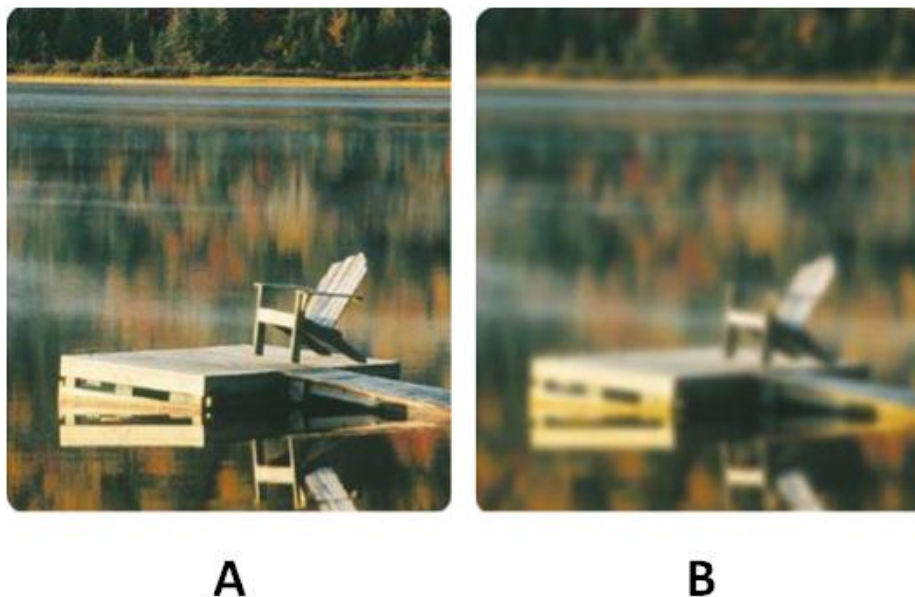


Figura 18 - Imagem projetada: A) por um sistema limitado por difração e B) por um sistema com MTF abaixo do limite de difração.

Fonte: <http://www.eyesite.org/cataract/customised-cataract-surgery/>.

Sistemas limitados por difração apresentam um valor de MTF que é apenas função do número- $f^7$  do sistema e do comprimento de onda utilizado na formação da imagem. Dessa forma, o limite de difração de qualquer sistema óptico pode ser determinado por (SMITH, 2008):

$$MTF(w) = \frac{2}{\pi} (\phi - \cos\phi \cdot \text{sen } \phi) \quad (4)$$

onde:

$$\phi = \cos^{-1}(\lambda \cdot w \cdot f/\#)$$

e  $w$  é a frequência espacial em pares de linha por milímetro,  $\lambda$  é o comprimento de onda em milímetros e  $f/\#$  é o número- $f$  do sistema.

Em sistemas ópticos gerais a curva de MTF pode ser determinada pelo módulo da transformada de Fourier em duas dimensões do PSF (MALACARA e MALACARA, 2004):

$$MTF(w_x, w_y) = \left| \iint_{\sigma} h(x, y) e^{i(w_x x + w_y y)} dx dy \right| \quad (5)$$

onde  $\sigma$  representa a área da abertura do sistema óptico,  $w_x$  corresponde à frequência espacial referente ao eixo  $x$  e  $w_y$  corresponde à frequência espacial referente ao eixo  $y$ .

O MTF determinado a partir da PSF conforme indicado na equação (5) corresponderá a uma curva tridimensional sobre o plano  $(x, y)$ , que é o plano onde se forma a imagem da PSF. É comum apresentar a curva de MTF com base em dois planos denominados tangencial e sagital (Figura 19). Dessa forma, quando o MTF é calculado com base na curva de PSF que é projetada sobre o plano sagital ele é denominado MTF sagital e quando é calculado com base na curva projetada sobre o plano tangencial ele é denominado MTF tangencial. Convém destacar que

---

<sup>7</sup> O número- $f$  de um sistema óptico corresponde à razão entre o seu comprimento focal e o diâmetro de sua abertura (SMITH, 2008).

LIOs com superfícies radialmente simétricas irão projetar PSFs radialmente simétricas sobre o plano de imagem. Isso implica que as curvas de MTF sagital e tangencial serão iguais. Entretanto, quando o sistema óptico projeta no plano de imagem uma PSF assimétrica, tem-se que as curvas de MTF sagital e tangencial serão distintas.

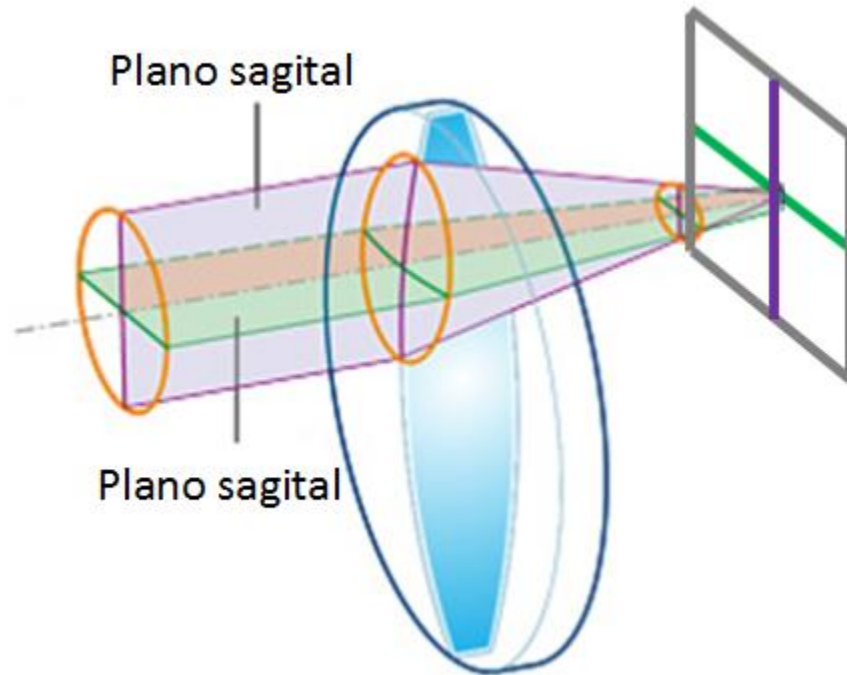


Figura 19 - Plano sagital e tangencial.

Fonte: [http://www.nikon.com/products/sportoptics/how\\_to/guide/binoculars/technologies/technologies\\_08.htm](http://www.nikon.com/products/sportoptics/how_to/guide/binoculars/technologies/technologies_08.htm)

#### 2.4.2 Strehl Ratio

O “*Strehl ratio*” é uma das métricas mais utilizadas para se avaliar o desempenho de sistemas ópticos. Ele é determinado pela razão entre o pico de intensidade do PSF medido para o sistema óptico a ser avaliado e o pico de intensidade de um PSF limitado por difração correspondente ao mesmo sistema óptico (JR., PERRIN, *et al.*, 2004):

$$S = \frac{I(x = 0)}{P(x = 0)} \quad (6)$$

onde  $x$  é o vetor de posição,  $I(x=0)$  é o maior valor da PSF medida para o sistema a ser avaliado e  $P(x=0)$  é o maior valor da PSF do sistema equivalente limitado por difração.

Existem ainda outras formas de se calcular o “*Strehl ratio*” caso não se tenha a informação direta do PSF do sistema óptico (JR., PERRIN, *et al.*, 2004), entretanto, tal análise está além do escopo deste trabalho.

### 2.4.3 Eficiência energética

A eficiência energética de uma LIO corresponde à porcentagem de energia incidente na lente que é direcionada ao seu ponto focal. No caso de LIOs monofocais, desconsiderando a dispersão do material da lente e reflexões em sua superfície, toda a energia luminosa incidente é direcionada para um único foco (Figura 20).

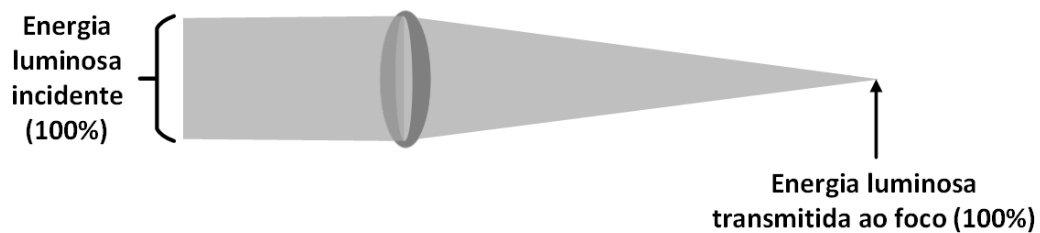


Figura 20 – Eficiência energética de uma LIO monofocal.

Fonte: Autoria própria.

Já para lente intraoculares multifocais (LIOMs) a energia incidente se distribui nos múltiplos pontos focais criados, sendo que para LIOMs refrativas toda a energia luminosa incidente em determinada região anelar da mesma é transmitida para um único foco e para LIOMs difrativas a energia luminosa incidente em determinado degrau difrativo é transmitida parcialmente para as diversas ordens difrativas, ou seja, para seus múltiplos focos (Figura 21). Convém destacar que no caso de LIOMs difrativas parte da energia incidente é perdida nas ordens difrativas que não contribuem para a formação de seus focos principais. Tal efeito é inerente a qualquer LIOM difrativa (O'SHEA, SULESKI, *et al.*, 2004).

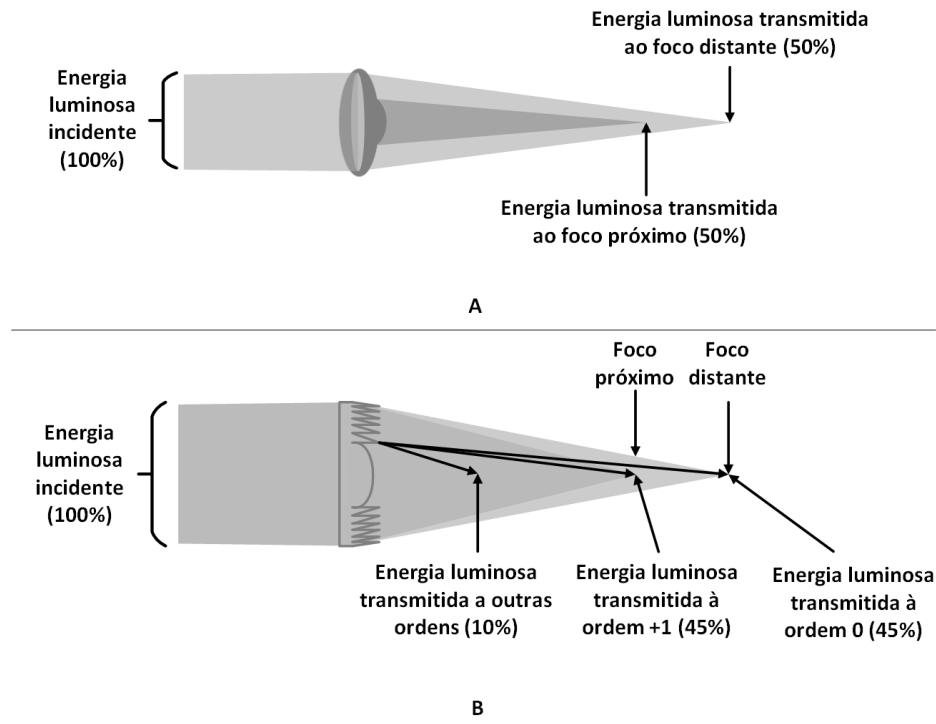


Figura 21 – Eficiência energética de LIOs multifocais: A) LIO refrativa e B) LIO difrativa.

Fonte: Autoria própria.

## 2.5 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE ZEMAX

O Zemax é uma ferramenta de simulação computacional que permite a modelagem e análise de sistemas ópticos em geral e é capaz de tratar os fenômenos ópticos através de duas abordagens: a óptica geométrica e a óptica física. No caso da óptica geométrica, utilizada majoritariamente pelo Zemax, os fenômenos ópticos são tratados pela simples noção de raio de luz, ou seja, a propagação dos raios luminosos se baseia apenas em aspectos geométricos fundamentados pela lei Snell. Já na óptica física os fenômenos ópticos são tratados considerando-se o aspecto ondulatório da luz. Este software, também, apresenta dois módulos principais de simulação: modo sequencial e modo não sequencial. No modo sequencial os feixes luminosos se propagam pelo sistema óptico de uma maneira sequencial, ou seja, interceptando cada superfície do sistema apenas uma vez (ALBUQUERQUE, 2006). Este modo é geralmente empregado em simulações de sistemas ópticos simples como, por exemplo, uma lente biconvexa monofocal (Figura 22).

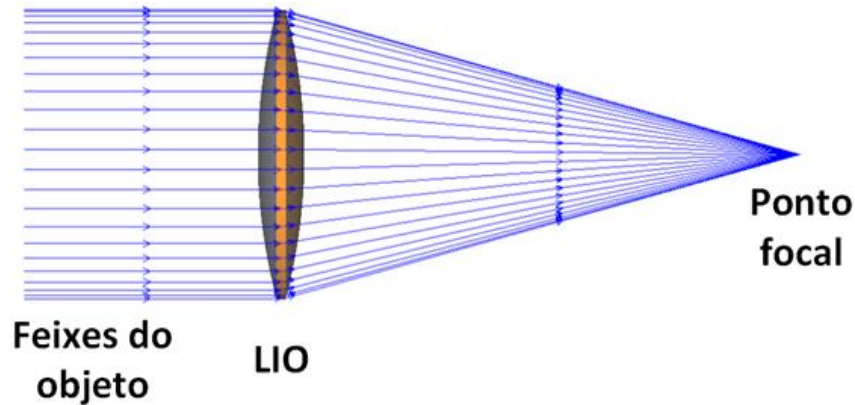


Figura 22 – Sistema óptico sequencial modelado no Zemax.

Fonte: Autoria própria.

Convém destacar na Figura 22 que o feixe luminoso parte do objeto na extremidade esquerda, vai em direção à lente e a atravessa em direção ao ponto focal de modo a interceptar cada elemento do sistema apenas uma vez e de maneira sequencial.

No modo não sequencial os feixes luminosos podem atingir as superfícies ópticas diversas vezes ao longo de qualquer caminho fisicamente possível e seguindo qualquer ordem (Figura 23). Neste modo é possível elaborar sistemas ópticos mais complexos onde as características de dispersão e difração dos raios precisam ser avaliadas e controladas como, por exemplo, interferômetros e sistemas de iluminação especular (farol de carro) (ALBUQUERQUE, 2006).

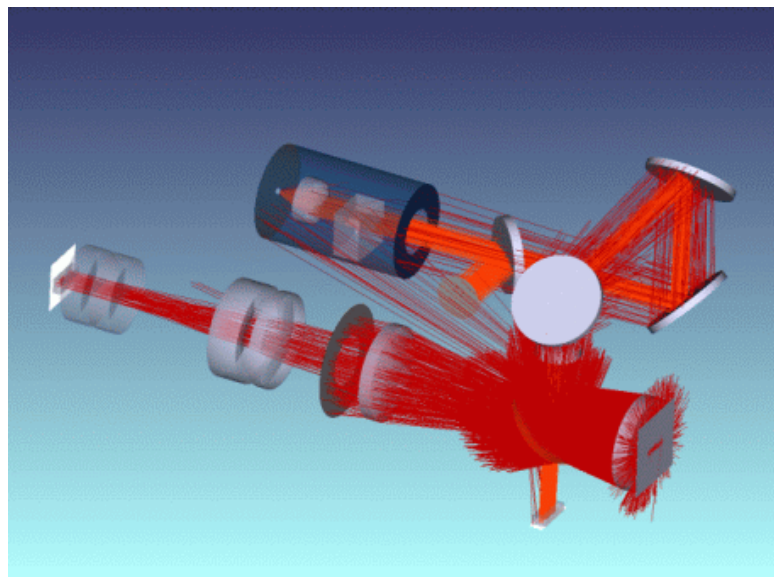


Figura 23 - Sistema óptico não sequencial modelado no Zemax.

Fonte: <http://argyle-optics.com/examples/>.



Apesar de o Zemax possuir o módulo sequencial e não sequencial de simulação, ele é mais especializado no primeiro módulo, afinal este último módulo só passou a fazer parte do pacote do software após a versão 7.0 em março de 2007 (atualmente o Zemax se encontra na versão 14.0 – março de 2014). Dessa forma o modo sequencial apresenta ferramentas avançadas de otimização, análise térmica, análise de tolerâncias e outra série de recursos que permitem uma avaliação acurada e especializada dos sistemas modelados. No que diz respeito especificamente às ferramentas de otimização, o Zemax utiliza o método de Mínimos Quadrados Amortecido<sup>8</sup> (do inglês “*Damped Least Squares - DLS*”) e o método Ortogonal de Descida<sup>9</sup> (do inglês “*Orthogonal Descent*” - *OD*) na otimização de sistemas sequenciais.

Quanto ao módulo não sequencial suas ferramentas de análise permitem apenas a avaliação da intensidade luminosa dos raios traçados e as ferramentas de otimização presentes no modo sequencial estão ausentes nesse módulo (ALBUQUERQUE, 2006; ZEMAX, 2013).

A modelagem de LIOs monofocais pode ser realizada no modo sequencial do Zemax, entretanto, sua otimização fica dependente da experiência do usuário, que é responsável por definir uma configuração inicial (definição das curvaturas, espessura, material e constantes cônicas da LIO) para o modelo. Dependendo da configuração inicial proposta pelo usuário o processo de otimização do Zemax poderá, ou não, atingir o ótimo global do sistema óptico, ou seja, poderá, ou não, atingir a configuração correspondente ao melhor desempenho do sistema. Já o desenvolvimento de LIOs multifocais apresenta uma complexidade técnica que requer modelagem computacional em modo não sequencial do Zemax. Entretanto, a escassez de

---

<sup>8</sup> O método dos Mínimos Quadrados Amortecido é uma técnica de otimização de busca local tradicionalmente empregada no design de sistemas ópticos. Conforme discutido previamente, pelo fato de ser um método de busca local, esta técnica apresenta a grande desvantagem de que a qualidade do sistema óptico otimizado depende criticamente do ponto inicial de partida do processo de otimização (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1999; VASILJEVIC, 2002).

<sup>9</sup> O método Ortogonal de Descida é comumente empregado na otimização de sistemas de iluminação (ex. LEDs e colimadores). Este método de otimização não se baseia na derivada numérica da função de mérito do problema e sim em um princípio denominado raio de borda (do inglês “*Edge-ray principle*”). Tal princípio estabelece que a propagação do raio luminoso da borda da fonte de luz deve se propagar sob o ângulo máximo do anteparo alvo. A função de mérito do sistema é definida como o desvio RMS entre o ângulo máximo do anteparo e o ângulo do raio que sai da borda da fonte (KUDAEV e SCHREIBER, 2005).

ferramentas de análise óptica presentes no Zemax para este módulo de simulação limita sua capacidade de otimização dos parâmetros de LIOs multifocais.

Para que a dependência da experiência do usuário seja eliminada na definição do ponto inicial do processo de otimização de LIOs monofocais torna-se necessário o emprego de algum algoritmo de busca global que seja capaz de encontrar soluções na região próxima do ótimo global do sistema. Com isso o algoritmo de busca local do Zemax partiria de uma configuração do sistema óptico que o levaria à solução ótima do sistema. Além disso, para que se possa otimizar uma LIO multifocal atendendo aos objetivos de se ter uma boa qualidade óptica em cada um de seus pontos focais torna-se necessário o emprego de um algoritmo capaz de lidar com problemas multiobjetivos.

Uma funcionalidade bastante útil presente no Zemax permite que programas elaborados em outros softwares (Matlab®, C++ etc.) sejam capazes de controlar, analisar e otimizar o desempenho dos sistemas ópticos projetados. Essa ferramenta é denominada “*Dynamic Data Exchange*” (DDE) e com ela pode-se usar o Zemax para traçar os raios de um dado sistema óptico complexo e em programas externos fazer análises ou cálculos que ele não tem disponíveis (ZEMAX, 2013).

## 2.6 NORMATIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIOs

A norma ISO 11979 aplica-se a lentes intraoculares de modo que sua segunda parte refere-se às LIOs monofocais (ISO 11979-2) e sua nona parte refere-se às LIOs multifocais (ISO 11979-9). Quanto à qualidade óptica essa norma estabelece como requisito os níveis mínimos de MTF que uma LIO deve apresentar. Para uma LIO monofocal a norma ISO 11979-2 estabelece que o MTF (ISO, 1999)]:

- Deve ser medido com luz monocromática de  $546 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ .
- Deve ser medido com uma abertura de  $3,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  de diâmetro.
- Deve ser superior a 0,43 para a frequência espacial de 100 pares de linha por milímetro.

Para uma LIO multifocal a norma ISO 11979-9 estabelece que o MTF (ISO, 2006b):

- Deve ser medido com luz monocromática de  $546 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ .
- Deve ser medido para a frequência espacial de 50 ciclos/mm para aberturas de  $(2 \text{ a } 3 \pm 0,25) \text{ mm}$  e de  $(4 \text{ a } 5 \pm 0,25) \text{ mm}$  de diâmetro.

- A especificação mínima do MTF que uma LIOM deve apresentar (para cada ponto focal criado) é tal que permita uma qualidade visual aceitável e verificável por dados clínicos. Tais dados clínicos consistem em testes biométricos da LIOM implantada (descentração da LIO, pressão intraocular etc.) e testes psico-físicos com um grupo de pacientes para analisar a acuidade visual nos múltiplos focos (ISO, 2006a).

Além disso, a norma ISO 11979-9 exige que sejam reportados os valores de MTF para as seguintes condições:

- Para pequenas aberturas (2–3 mm de diâmetro) nas frequências espaciais de 25 ciclos/mm e 100 ciclos/mm para o foco distante.
- Para pequenas aberturas (2–3 mm de diâmetro) nas frequências espaciais de 25 ciclos/mm e 100 ciclos/mm para o foco próximo.
- Para grandes aberturas (4-5 mm) nas frequências espaciais de 25 ciclos/mm e 50 ciclos/mm para o foco distante.

A avaliação do MTF das LIOs deve ser realizada em um modelo de olho cujo design pode ser observado na Figura 24.

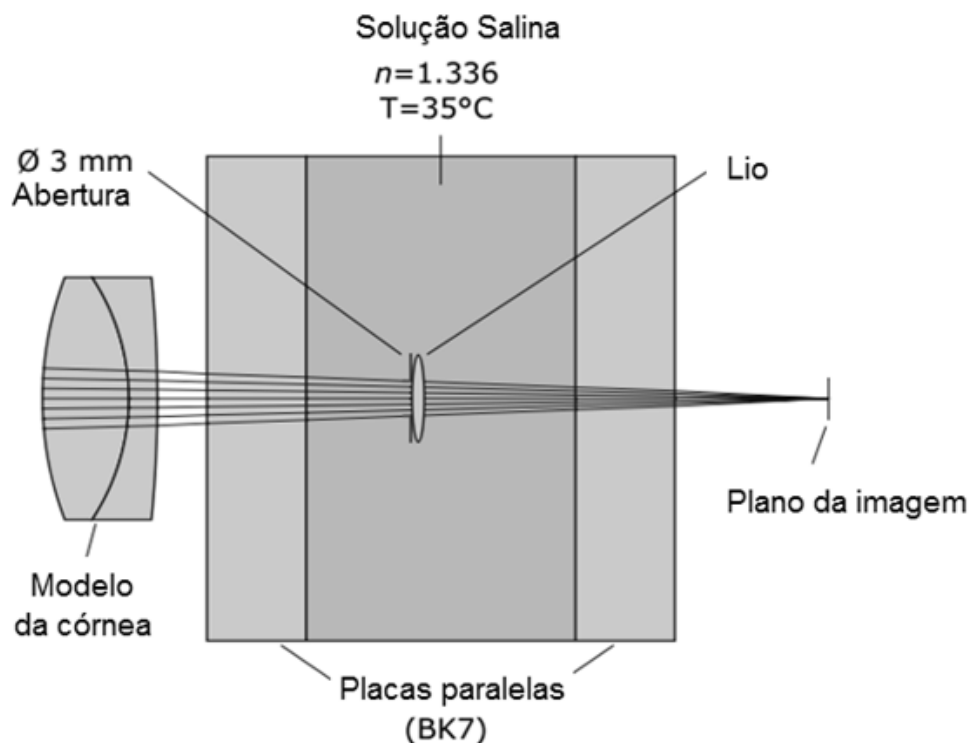


Figura 24 - Modelo de olho definido pela norma ISO 11979.

Fonte: Adaptado de: [http://www.trioptics.com/pdfs/ISO\\_11979\\_Intraocular\\_Lens\\_Testing.pdf](http://www.trioptics.com/pdfs/ISO_11979_Intraocular_Lens_Testing.pdf).

## 2.7 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE LIOs

O design de LIOs com bom desempenho óptico requer a otimização de diversos parâmetros: curvaturas, espessura, cônica, entre outros. A interação não linear entre esses parâmetros da LIO resulta em problemas complexos não lineares, com múltiplos mínimos e descontinuidades (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1999).

Tradicionalmente métodos de busca local ou métodos determinísticos têm sido aplicados na otimização de lentes. Os métodos determinísticos se baseiam na informação do gradiente da função objetivo<sup>10</sup> para a escolha de uma direção busca que irá minimizá-la (considerando um problema de minimização) (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1998; TAKAHASHI, 2007a). Quando um design óptico implica em um problema multimodal<sup>11</sup> o processo de otimização determinístico não garante a convergência para a solução ótima global do sistema (Figura 25). Sua convergência para o ótimo global se torna dependente do ponto de partida da otimização. O ponto de partida é definido a partir da configuração inicial do sistema (determinada pelo usuário) e é representado na Figura 25 pelos pontos  $P_1$  e  $P_2$ . Caso o ponto de partida para um processo de otimização baseado na minimização da função objetivo ( $f$ ) seja representado pelo ponto  $P_1$ , pode-se notar pela Figura 25 que a informação do gradiente de  $f$  levará o processo ao mínimo global. Entretanto, caso o ponto de partida para o mesmo processo de otimização seja representado pelo ponto  $P_2$  pode-se perceber que o método determinístico convergirá para um mínimo local.

---

<sup>10</sup> Função objetivo ou função de mérito é a grandeza do problema a ser minimizada/maximizada dependendo do escopo do processo de otimização: minimização ou maximização, respectivamente. Para o caso de LIOs uma função objetivo pode ser, por exemplo, o MTF, o “*Strehl ratio*”, entre outros parâmetros que têm impacto na qualidade óptica da lente.

<sup>11</sup> Problemas multimodais são caracterizados pela existência de diversas soluções ótimas restritas a uma vizinhança, mas com aptidão inferior à solução ótima global do problema.

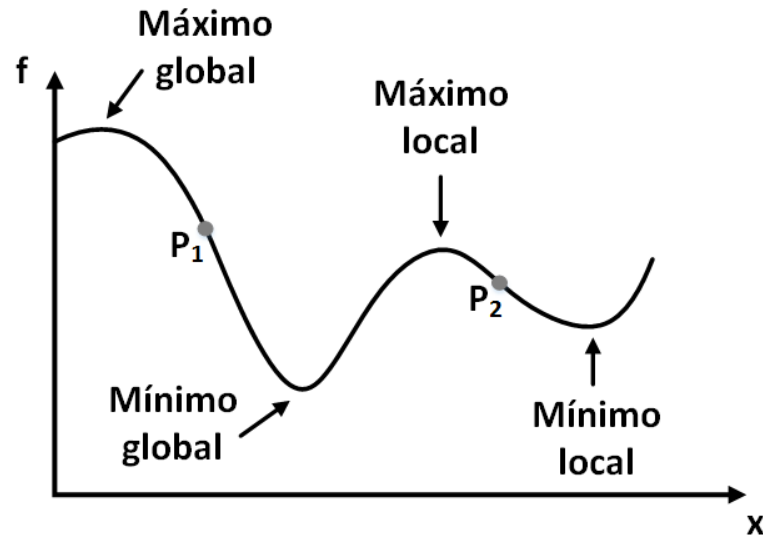


Figura 25 - Função multimodal ilustrando máximo/mínimo local/global.

Fonte: Autoria própria.

O fato dos métodos determinísticos dependerem da experiência do usuário na escolha da configuração inicial do sistema para que o processo de otimização convirja para o ótimo global torna seu emprego ineficaz. Dessa forma, torna-se viável o emprego de métodos estocásticos para otimização do design de lentes (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1998; CHEN e YAMAMOTO, 1996). Os algoritmos evolutivos são uma classe de métodos estocásticos com base em populações que são capazes de alcançar o ótimo global de funções multimodais, descontínuas e não lineares, embora, não seja garantido que essa solução seja encontrada (VASILJEVIC, 2002).

Os algoritmos genéticos são algoritmos evolutivos que buscam simular o processo genético de evolução natural na busca de soluções ótimas de um problema de otimização. Nele cada possível solução do problema é considerada um indivíduo. O conjunto de indivíduos propostos inicialmente forma uma população e os indivíduos dessa população sofrem seleção natural através de operadores de cruzamento e mutação para gerar as populações futuras. O processo se repete até que se alcance os melhores indivíduos (melhores soluções) de acordo com o critério de parada estipulado. Neste trabalho o foco será dado ao algoritmo NSGA-II por ser um dos mais populares e por apresentar os melhores resultados reportados na literatura quando comparado com outros algoritmos (ZITZLER, LAUMANNNS e THIELE, 2001). Em linhas gerais o funcionamento básico do NSGA-II segue os seguintes passos (Figura 26): inicialmente uma população  $P_0$  de tamanho  $N$  é criada aleatoriamente. Cada indivíduo dessa população é alocado em seu devido ranking, ou seja, os melhores indivíduos da população são alocados no ranking  $F_1$  e assim sucessivamente. Através de uma seleção por torneio e

operadores de cruzamento e mutação é criada uma nova população  $Q_0$  de tamanho  $N$ . Essas duas populações ( $P_0$  e  $Q_0$ ) formam, portanto, a população inicial do algoritmo ( $R_t$ ). A partir dessa população inicial de tamanho  $2N$  os melhores indivíduos são selecionados até que se alcance um total de  $N$  indivíduos. Essa seleção é composta pelos indivíduos do primeiro ranking ( $F_1$ ) da população inicial. Caso a quantidade de indivíduos desse ranking seja inferior a  $N$  selecionam-se os indivíduos do próximo ranking ( $F_2$ ) e assim sucessivamente até que se tenham  $N$  indivíduos para a próxima população. Supondo que os últimos indivíduos a integrarem essa população estejam contidos em um ranking  $F_L$ , é provável que o total de indivíduos que compõem os rankings de  $F_1$  até  $F_L$  seja maior que  $N$ . Com isso, torna-se necessário realizar uma seleção de indivíduos dentro do ranking  $F_L$  para que a população tenha um tamanho  $N$ . Essa seleção é realizada com base no operador de dominância denominado “*Crowded-Comparison Operator*”. A partir desse ponto a nova população gerada  $P_{t+1}$  de tamanho  $N$  é usada para gerar uma nova população  $Q_{t+1}$  de mesmo tamanho que juntas formarão a população seguinte através dos mesmos processos de seleção relatados previamente (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002).

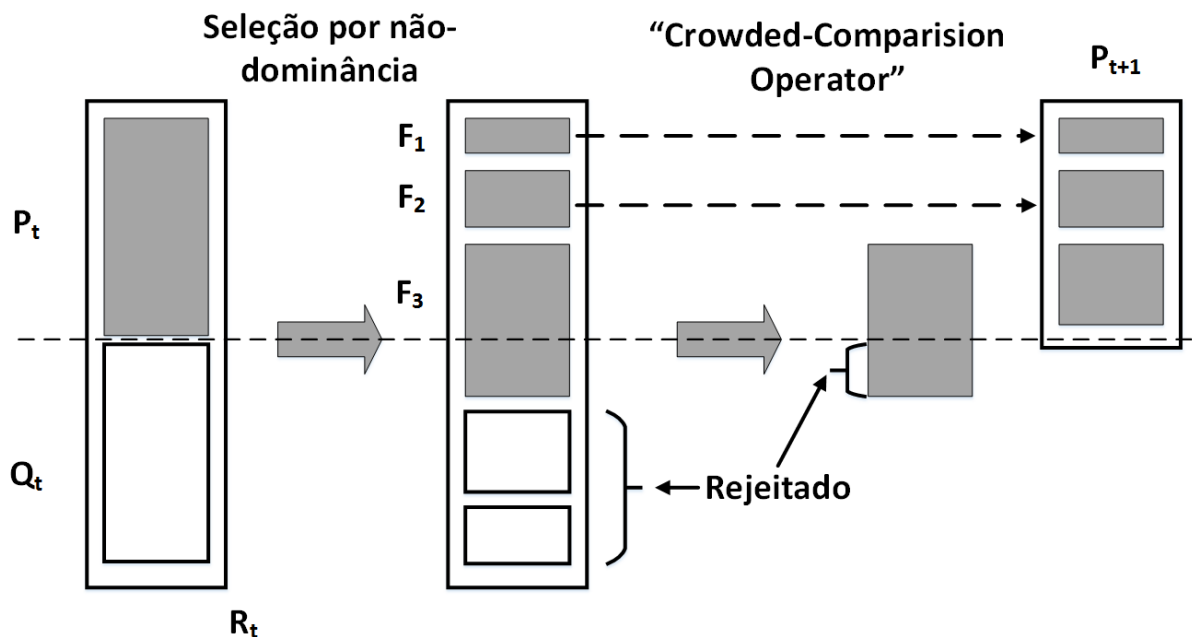


Figura 26 – Evolução das populações no NSGA-II.

Fonte: Autoria própria.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo irá apresentar a metodologia empregada durante o processo de otimização das LIOs propostas.

#### 3.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

O algoritmo empregado na otimização das LIOs deste trabalho será o NSGA-II, que conforme descrito previamente é um algoritmo evolutivo genético de busca global. O NSGA-II foi implementado no Matlab e se comunica com o Zemax através da ferramenta DDE. O objetivo do processo de otimização das LIOs monofocais e multifocais deste trabalho será maximizar o MTF dos pontos focais criados pelas mesmas. Como o algoritmo implementado se baseia na minimização de problemas, será utilizado como função de mérito o módulo da diferença entre o MTF da LIO e seu limite de difração (Equação (7)).

$$\Delta MTF = |MTF_{LIO} - MTF_{limite}| \quad (7)$$

em que  $\Delta MTF$  é a função de mérito do processo de otimização,  $MTF_{LIO}$  corresponde ao MTF da LIO em seu ponto focal (LIO monofocal) ou em seus pontos focais (LIO multifocal) para uma frequência espacial específica (por norma é considerado uma frequência espacial de 100 lp/mm para LIOs monofocais e 50 lp/mm para LIOs multifocais) e  $MTF_{limite}$  é o valor do limite de difração da LIO na frequência espacial considerada para o  $MTF_{LIO}$ . Como o limite de difração corresponde ao melhor desempenho que uma LIO pode alcançar em termos de contraste tem-se que o valor do termo  $MTF_{LIO}$  sempre será menor ou igual ao termo  $MTF_{limite}$  da equação (7). Com isso, minimizar o a função de mérito  $\Delta MTF$  da equação (7), que é o que o algoritmo busca, é o mesmo que maximizar o MTF da LIO, que é o objetivo da otimização deste trabalho.

No que se refere às LIOs monofocais o NSGA-II é empregado para encontrar a região de mínimo global do sistema, ou seja, a região a partir da qual será possível, através de um método de otimização de busca local, alcançar o ótimo global do sistema. Para ilustrar essa situação considere a Figura 27. A Figura 27.A representa a função de mérito de uma LIO

monofocal, onde o eixo  $x$  corresponde aos parâmetros da LIO (curvaturas e constante cônica) e o eixo  $f$  corresponde ao módulo da diferença entre o MTF da LIO e seu limite de difração, ou seja, sua função de mérito. Como é desejável que a LIO apresente o maior MTF possível deve-se buscar os valores de parâmetros que minimizem a função de mérito. Logo se deve buscar o mínimo global do sistema conforme indicado na Figura 27.A. Com base nesse propósito ao se empregar o algoritmo NSGA-II na otimização da LIO ele encontrará como solução pontos na vizinhança do mínimo global do sistema (ponto  $P_1$  na Figura 27.B p.e.), afinal este método de otimização não garante que a solução encontrada seja o ótimo global do sistema devido à sua metodologia estocástica de busca das soluções. Usando-se os parâmetros do ponto  $P_1$  como ponto de partida para se iniciar um processo de otimização de busca local (método DLS do Zemax) chega-se ao mínimo global do sistema óptico (ponto  $P_2$  na Figura 27.B). Portanto, empregando-se um método de busca global implementado externamente ao Zemax e utilizando a solução encontrada como ponto de partida para o processo de otimização de busca local presente nesse software é possível alcançar o mínimo global do sistema. Tal metodologia evita a necessidade da experiência do usuário para a definição de um ponto de partida para o processo de otimização.

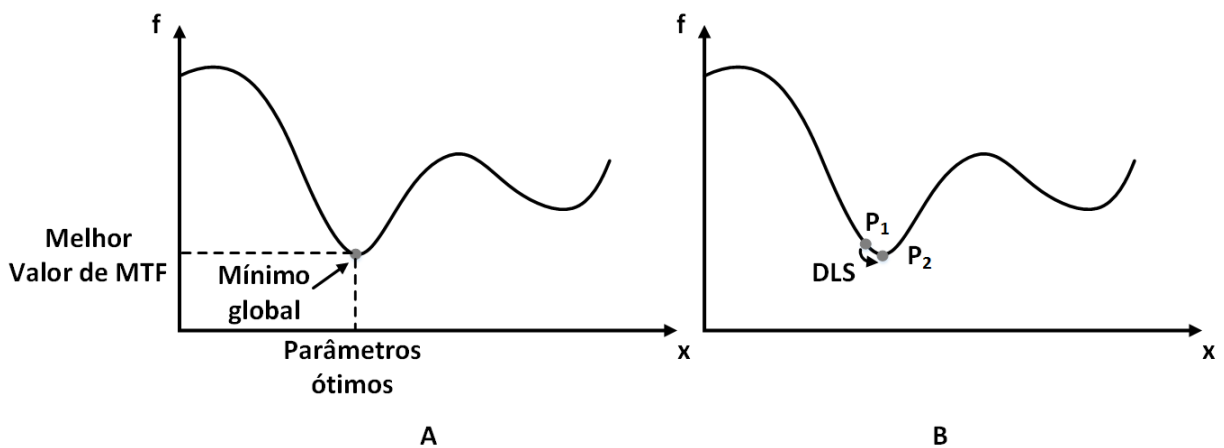


Figura 27 – Otimização de uma LIO monofocal: A) mínimo global do sistema óptico e B) soluções encontradas.

Fonte: Autoria própria.

No processo de otimização das LIOs monofocais foram considerados como parâmetros de entrada as curvaturas posterior e anterior da LIO e a constante cônica da superfície anterior. Tais parâmetros constituem um indivíduo do algoritmo NSGA-II. A função objetivo considerada foi o módulo da diferença entre o MTF da LIO e seu limite de difração no plano focal (Figura 28).



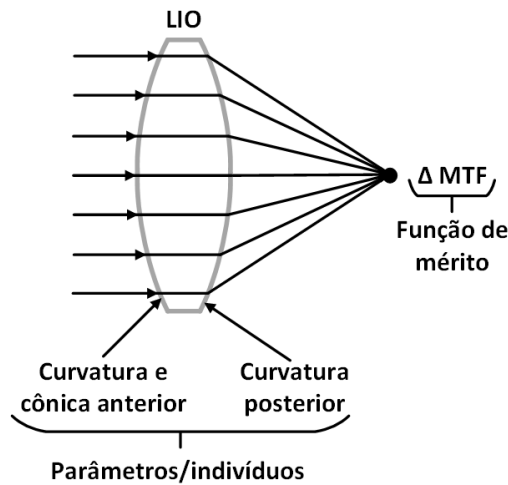


Figura 28 - Parâmetros de otimização e função de mérito da LIO monofocal.

Fonte: Autoria Própria.

O processo de otimização se inicia pela definição de uma população inicial de indivíduos (denominados pais). Foi considerada uma população inicial composta por 50 indivíduos definidos aleatoriamente dentro de uma faixa de valores, ou seja, LIOs com diferentes curvaturas e constantes cônicas são propostas inicialmente. A faixa de valores dentro da qual cada parâmetro varia foi definida de acordo com a dioptria da LIO otimizada. Primeiramente definiu-se o diâmetro de todas as LIOs como sendo de 6 mm, afinal as LIOs comercializadas possuem, em geral, esta dimensão de região óptica (MATHEN, 2010). O tipo de material utilizado em todas as LIOs foi o PMMA<sup>12</sup> e a espessura de cada faixa de dioptria das LIOs foi definida considerando valores de LIOs comerciais. Dessa forma, considerando a equação que define a dioptria da LIO (2) que está transcrita na equação (8), tem-se que apenas as curvaturas anterior ( $R_1$ ) e posterior ( $R_2$ ) se tornam variáveis (todas as outras variáveis já estão definidas).

---

<sup>12</sup> O PMMA (polimetil meta-acrilato) é um polímero transparente e incolor que foi utilizado nas primeiras LIOs desenvolvidas e ainda vem sendo empregado até os dias de hoje. Seu índice de refração é de 1,494 considerando um comprimento de onda de 546 nm. (BASS, 2010).

$$D = \left( \frac{n_{lio}}{n_{meio}} - 1 \right) \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t[(n_{lio}/n_{meio}) - 1]}{n_{lio}R_1R_2} \right\} \quad (8)$$

Fixando-se uma faixa de variação para a curvatura anterior chega-se, portanto, através da equação (8), na faixa de variação da curvatura posterior. A Tabela 1 indica as dioptrias de LIOs monofocais que foram otimizadas e a faixa de valores com que cada um de seus parâmetros pôde variar. A faixa de variação da cônica, assim como a faixa de variação da curvatura anterior, foi mantida a mesma para todas as dioptrias e essas faixas abrangem os valores que são encontrados em LIOs comercializadas atualmente.

Tabela 1 – Faixa de variação dos parâmetros das LIOs monofocais.

Dioptria da LIO	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Faixa de raio de curvatura anterior (mm)	Faixa de raio de curvatura posterior (mm)	Faixa de cônica
5	6	0,35	5 a 100	-585 a -30	0 a -20
15	6	0,71	5 a 100	-195 a -8	0 a -20
20	6	0,90	5 a 100	-146 a -6	0 a -20
25	6	1,00	5 a 100	-60 a -5	0 a -20
30	6	1,28	5 a 100	-16 a -4	0 a -20

Fonte: Autoria própria.

Cada uma dessas LIOs/indivíduos é simulada no Zemax e então obtém-se o valor da função de mérito correspondente a cada uma delas. Os valores da função de mérito são analisados para se identificar aqueles indivíduos que obtiveram o melhor ajuste, ou seja, os indivíduos que apresentaram os melhores valores de função de mérito. Após ordenação dos indivíduos, segundo a qualidade do seu ajuste, os melhores dentre eles são escolhidos por um processo de seleção para que novos indivíduos (denominados filhos) sejam gerados por meio dos operadores de cruzamento e mutação. A operação de cruzamento empregada no NSGA-II é definida por:

$$filho = pai_1 + rand \cdot taxa_{cruz} \cdot (pai_2 - pai_1) \quad (9)$$

onde  $rand$  é um número aleatório na faixa  $[0, 1]$ ,  $taxa_{cruz}$  é um valor percentual definido como 90% (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002) e  $pai_1$  e  $pai_2$  são dois indivíduos selecionados aleatoriamente com base em seu ajuste, de modo que os indivíduos com melhor ajuste apresentam maior

probabilidade de serem selecionados. Já a operação de mutação empregada no NSGA-II é definida por:

$$filho = pai + S \cdot rand \cdot (limite_{sup} - limite_{inf}) \quad (10)$$

onde  $rand$  é um número aleatório na faixa  $[0, 1]$ ,  $S$  é um parâmetro correspondente ao desvio padrão do número aleatório gerado,  $limite_{sup}$  é o valor máximo que os parâmetros podem assumir e  $limite_{inf}$  é o valor mínimo que os parâmetros podem assumir. Após gerar uma população de filhos do mesmo tamanho que a população de pais, todos os indivíduos (pais e filhos) são comparados entre si de modo que os melhores indivíduos entre eles componham a próxima geração. O processo se repete continuamente até que o número máximo de gerações seja alcançado. A Figura 29 ilustra de forma esquemática os passos executados pelo NSGA-II.

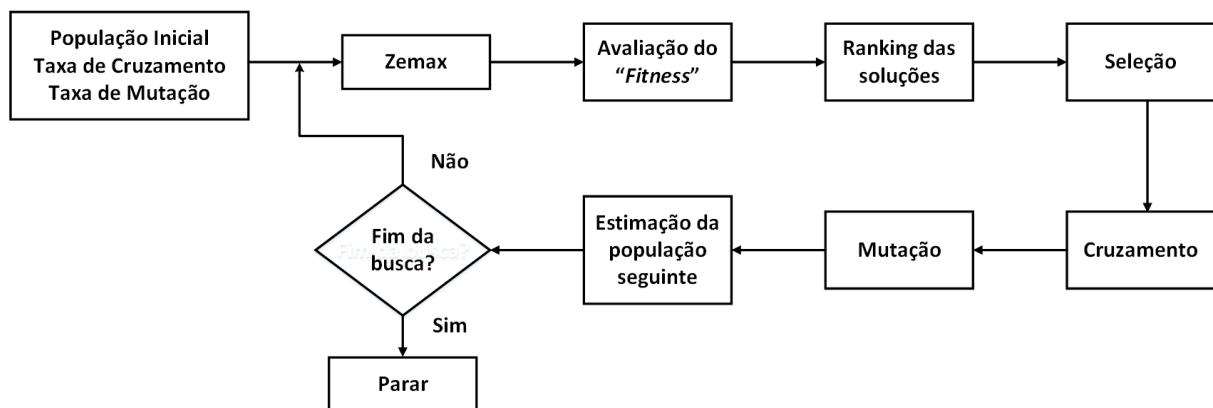


Figura 29 - Fluxograma de otimização do NSGA-II para uma LIO monofocal.

Fonte: Autoria própria.

Ao final da otimização realizada pelo NSGA-II o melhor indivíduo encontrado é selecionado e seus parâmetros são inseridos no Zemax como ponto inicial do processo de otimização de busca local. A partir dessa configuração o algoritmo de Mínimos Quadrados Amortecido do Zemax otimiza os mesmos parâmetros (curvaturas anterior e posterior e cônica anterior) para que, finalmente, seja encontrado o ótimo global do sistema óptico. Convém destacar que o NSGA-II apresenta uma restrição para aqueles indivíduos (curvaturas e constante cônica) que se constituirão em LIOs com dimensões de diâmetro e espessura diferentes daquelas fixadas na Tabela 1. Tal restrição faz com que esses indivíduos não sobrevivam no processo evolutivo do algoritmo. Desse modo, as soluções apresentadas serão

apenas de LIOs que atendam aos requisitos de espessura central e diâmetro fixados na Tabela 1.

Apesar de o processo de fabricação de uma LIO monofocal ser altamente preciso e rigoroso de modo que a LIO, ao final do processo de fabricação, apresenta desempenho óptico próximo dos obtidos em simulação, convém considerar na modelagem alguns casos extremos presentes no processo de fabricação. Uma LIO monofocal é comumente fabricada por meio de tornos de comando numérico computadorizado<sup>13</sup> (CNC). Caso exista durante a fresagem da LIO algum desalinhamento entre a mesma e o eixo do torno, a superfície da lente não será perfeitamente esférica ou asférica (dependendo do tipo de LIO a ser fabricada) em relação ao eixo do torno. A superfície almejada poderá ser fabricada em relação a um plano inclinado. Com o objetivo de simular tal situação insere-se no modelo da LIO implementada no Zemax uma aberração do tipo Coma. Essa aberração terá a função de distorcer a superfície da LIO simulada de maneira a ocasionar uma frente de onda correspondente à gerada pela superfície da LIO fresada por um torno desalinhado (tal implementação será discutida com mais detalhes no capítulo 4). O procedimento de otimização desse caso específico segue a mesma metodologia do processo de otimização de uma LIO monofocal já descrito previamente. Ao final do processo de otimização busca-se encontrar quais os parâmetros que permitirão que a LIO, ainda que apresente alguma distorção na sua superfície óptica, tenha o melhor desempenho óptico.

O algoritmo NSGA-II foi empregado também na otimização de uma LIO multifocal refrativa com 6 zonas, onde cada zona converge os feixes para um dos dois focos: distante ou próximo. Os parâmetros de entrada foram os raios correspondentes a cada região anelar da LIO e as funções-objetivo foram o módulo da diferença entre o MTF da LIO para o foco distante e seu limite de difração e o módulo da diferença entre o MTF da LIO para o foco próximo e seu limite de difração (Figura 30). Tal configuração caracteriza um problema de otimização multiobjetivo (dois objetivos) e o NSGA-II, conforme discutido previamente, é capaz de apresentar boas soluções para este tipo de problema.

---

<sup>13</sup> Os tornos CNC realizam seu processo de usinagem através de um arquivo de entrada que possui as coordenadas X (vertical) e Z (longitudinal) da peça (FISCHER, TADIC-GALEB e YODER, 2008).

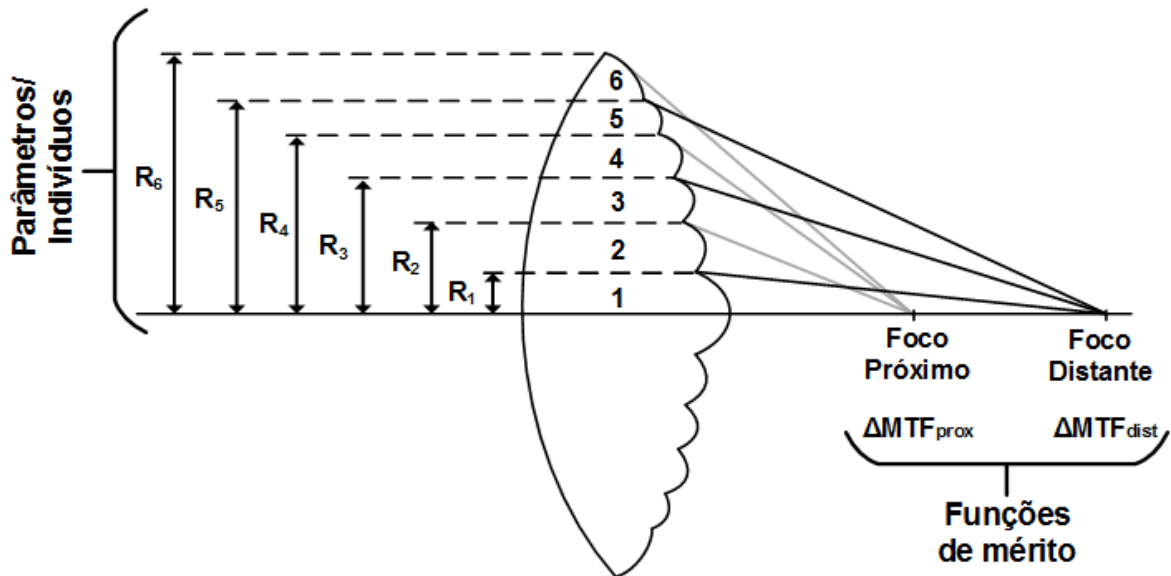


Figura 30 – Parâmetros de otimização e funções de mérito da LIO multifocal refrativa.

Fonte: Autoria própria.

O processo de otimização da LIO multifocal refrativa realizado pelo NSGA-II segue o mesmo procedimento da otimização da LIO monofocal. Uma população inicial (população pai) de 50 indivíduos é definida de forma aleatória, ou seja, LIOs com diferentes tamanhos de regiões anelares refrativas são propostas inicialmente. Cada uma dessas LIOs/indivíduos são simuladas no Zemax e então obtém-se o valor das funções de mérito correspondente a cada uma delas. As soluções são analisadas quanto aos valores de suas funções-objetivo a fim de se verificar a relação de dominância<sup>14</sup> entre elas para que sejam distribuídas em *rankings*. Os indivíduos cujas soluções são Pareto-ótimas compõem o *ranking*  $F_1$ . As soluções restantes que são dominantes compõem o *ranking*  $F_2$  e assim sucessivamente até que todas as soluções estejam alocadas em algum *ranking*. Através de uma seleção estocástica de indivíduos com base em seus *rankings*, onde os indivíduos dos primeiros *rankings* têm maior probabilidade de serem selecionados, gera-se uma nova população (população filha) de indivíduos por meio de

<sup>14</sup> Diz-se que um determinado indivíduo  $x_1$  (conjunto de parâmetros) domina outro indivíduo  $x_2$ , quando a avaliação do primeiro não é pior que a avaliação do segundo em nenhum dos objetivos e é melhor em pelo menos um. Se um indivíduo  $x_1$  não é dominado por nenhum indivíduo  $x_2$  qualquer, em todo o espaço de parâmetros viável, diz-se que  $x_1$  é uma solução eficiente, não dominada ou Pareto-ótima (TAKAHASHI, 2007b).

operações de cruzamento e mutação (equações (9) e (10)) sobre os indivíduos selecionados. Ambas as populações (pai e filha) serão analisadas por meio de um operador denominado “*Crowded- Comparison Operator*” cuja função é selecionar os melhores indivíduos das duas populações de modo que eles estejam distribuídos o mais uniformemente possível sobre o espaço de soluções. Os novos indivíduos selecionados irão compor a população pai da nova geração e o processo descrito anteriormente irá se repetir até que o número máximo de gerações seja alcançado. A Figura 31 apresenta de forma esquemática o processo de otimização do NSGA-II para a LIO multifocal refrativa.

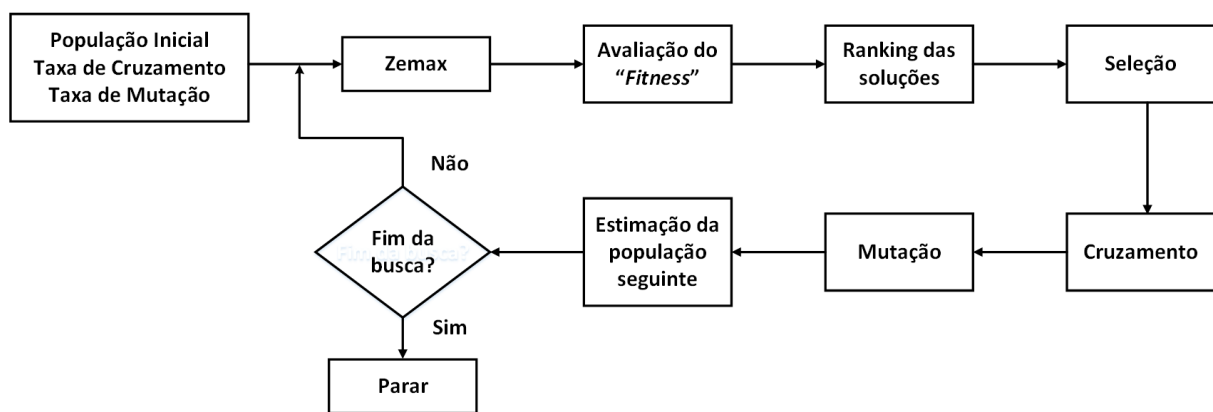


Figura 31 – Fluxograma de otimização do NSGA-II para uma LIO multifocal refrativa.

Fonte: Autoria própria.

Como a norma ISO 11979-9 estabelece valores mínimos de MTF para duas faixas de abertura (1,5 mm e 2,5 mm de raio), a otimização da LIO multifocal refrativa é realizada em duas etapas: na primeira é considerado uma abertura de 1,5 mm de raio e os parâmetros  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  (veja Figura 30) serão os parâmetros de entrada do algoritmo e na segunda etapa é considerado uma abertura de 2,5 mm de raio e os parâmetros  $R_4$ ,  $R_5$  e  $R_6$  (veja Figura 30) serão os parâmetros de entrada do algoritmo, levando-se em consideração os parâmetros ( $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ) já otimizados na primeira etapa. Dessa forma, para uma abertura de 2,5 mm de raio, as regiões  $R_4$ ,  $R_5$  e  $R_6$  variam (são otimizadas) e as regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são fixas e têm o valor definido pela otimização da primeira parte. Ao final de cada uma dessas etapas será obtido como resultado um gráfico no espaço de funções-objetivo com todas as soluções encontradas (Figura 32).

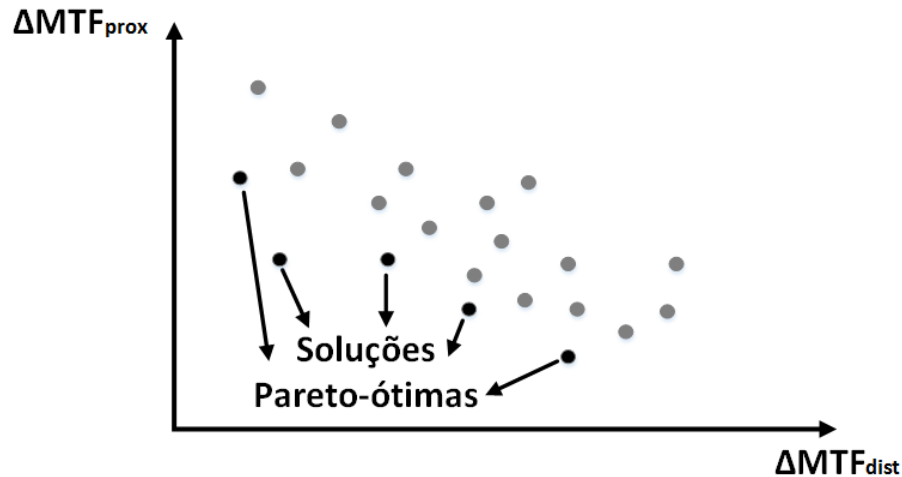


Figura 32 - Espaço de soluções resultante da otimização da LIO multifocal refrativa.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar pela Figura 32 que existirão várias soluções Pareto-ótimas como soluções viáveis ao problema. A escolha da solução referente à abertura de 3 mm de diâmetro será baseada no fato de que para aberturas pequenas de pupila (entre 2 – 3 mm de diâmetro) busca-se para LIOs multifocais boa acuidade visual tanto para objetos próximos quanto para objetos distantes (DAVISON e SIMPSON, 2006). Dessa forma, será escolhida aquela solução cuja razão entre os objetivos seja a mais próxima de uma unidade (Figura 33).

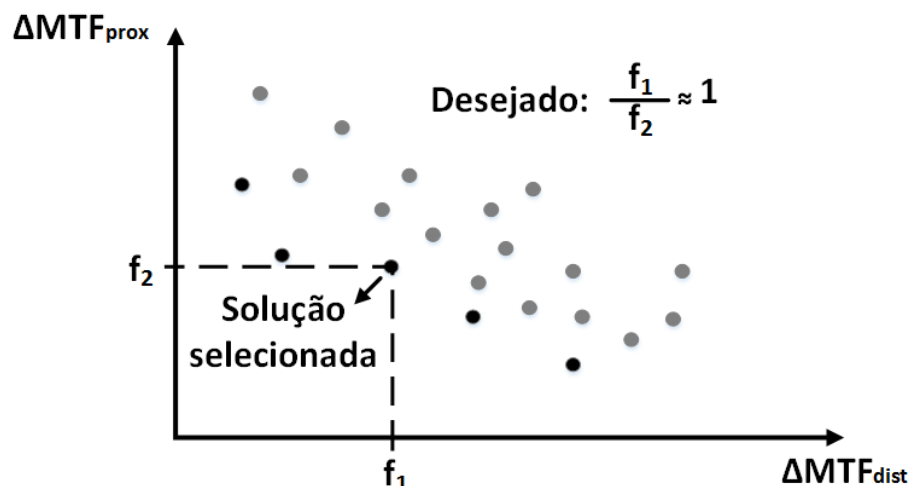


Figura 33 - Solução selecionada para uma abertura de 3 mm de diâmetro.

Fonte: Autoria própria.

Quanto à escolha da solução referente à abertura de 5 mm de diâmetro ter-se-á como base o fato de que para grandes aberturas (entre 5 – 6 mm de diâmetro) busca-se para LIOs multifocais uma boa acuidade visual para objetos distantes em detrimento da acuidade visual

para objetos próximos. Dessa forma prioriza-se a qualidade de imagem para o foco distante, pois em situações em que a pupila humana está nessa faixa de abertura o observador está, geralmente, observando objetos distantes (DAVISON e SIMPSON, 2006). Algumas LIOs multifocais comercializadas que possuem esse comportamento (Tecnis, Restor e Rezoom p.e.) apresentam uma razão entre o MTF do foco distante para o MTF do foco próximo de aproximadamente 1,3 (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013). Diante disso será escolhida ao final do processo de otimização aquela solução em que o foco distante apresente um melhor MTF em relação ao MTF do foco próximo na razão de aproximadamente 1,3 entre os objetivos (Figura 34).

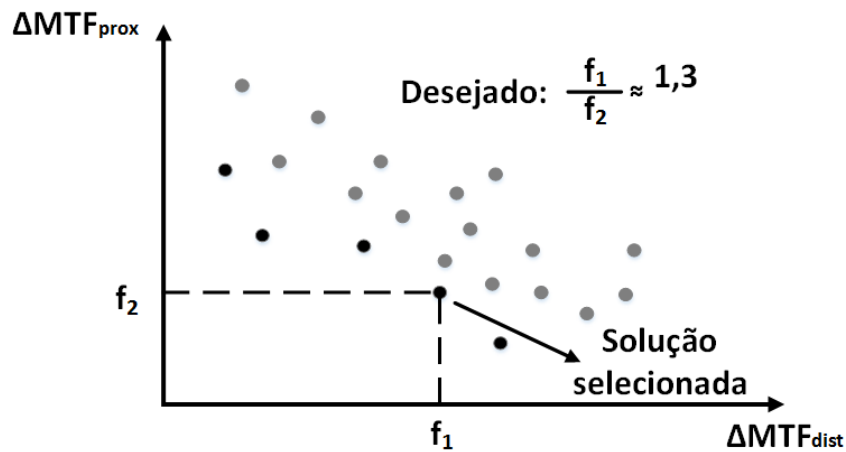


Figura 34 - Solução selecionada para uma abertura de 5 mm de diâmetro.

Fonte: Autoria própria.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à otimização de LIOs monofocais com 5 dioptrias diferentes e um caso particular em que a LIO monofocal apresenta aberração coma para modelagem de um processo de torneamento onde existe desalinhamento. Além disso, serão apresentados os resultados referentes a uma LIO multifocal refrativa.

### 4.1 LIOs MONOFOCAIS

Foram otimizadas 5 LIOs monofocais esféricas com dioptrias definidas em: + 5 D, + 15 D, + 20 D, + 25 D e + 30 D, afinal as LIOs comumente comercializadas se encontram dentro da faixa de + 5 D a + 30 D. A abertura considerada durante a otimização de todas as LIOs monofocais foi de 3 mm de diâmetro (ISO, 1999). Além disso, com o intuito de simular uma possível descentralização do torno CNC em relação ao eixo óptico da LIO torneada pelo mesmo foi considerada, também, a modelagem de uma LIO esférica com aberração coma. Tal aberração, correspondente a uma distorção na frente de onda formada por um sistema óptico que recebe uma incidência luminosa oblíqua, com ângulo  $\theta$ , faz com que a imagem formada seja deslocada do eixo óptico do sistema (Figura 35) (SMITH, 2008). Nesse tipo de aberração o caminho óptico percorrido por feixes equidistantes do eixo óptico são diferentes. O mesmo resultado apresentado na Figura 35 poderia ser obtido se o feixe incidente fosse paralelo ao eixo óptico e a lente estivesse inclinada pelo mesmo ângulo.

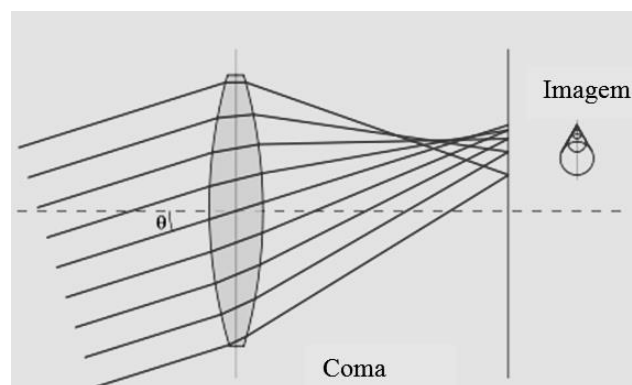


Figura 35 – Aberração coma gerada por uma lente perfeita sujeita à incidência oblíqua do feixe de luz.

Fonte: Adaptado de: [http://en.wikipedia.org/wiki/Coma\\_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coma_(optics)).

Caso o torno responsável pela fabricação da LIO apresente algum desalinhamento  $\theta$  a superfície da lente seria fabricada conforme apresentado na Figura 36. Pode-se notar que a seção inferior da LIO é mais espessa que a seção superior devido ao desalinhamento. Dessa forma, considerando uma incidência paralela ao eixo óptico, pode-se observar que os feixes equidistantes em relação ao eixo óptico percorrerão na LIO caminhos ópticos mais longos (na metade inferior) ou mais curtos (na metade superior). Tal efeito é similar à distorção na imagem causada por uma aberração coma.

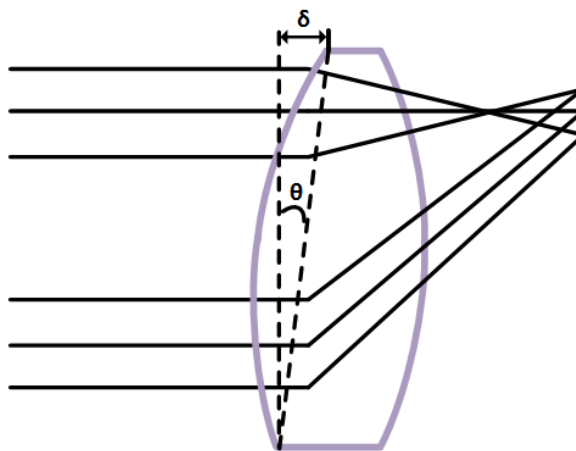


Figura 36 - LIO fabricada por meio de um torno desalinhado.

Fonte: Autoria própria.

A modelagem do desalinhamento do torno foi realizada, portanto, considerando a presença de aberração coma na superfície da LIO. Com isso, torna-se possível encontrar, durante o processo de otimização, a lente que apresentará maior tolerância, em termos de desempenho óptico, a um possível desalinhamento no torno durante seu processo de fabricação. Além disso, pode-se utilizar exatamente os mesmos resultados de desalinhamento para se avaliar o desempenho de uma LIO perfeitamente fabricada, porém com inclinação em seu posicionamento quando implantada no olho. A tolerância da LIO a tal inclinação tem impacto

direto na acuidade visual do paciente, afinal a mesma é implantada no saco capsular<sup>15</sup>. Portanto, dependendo da sua posição no saco capsular<sup>16</sup>, a LIO pode ficar inclinada em relação ao eixo óptico do olho do paciente (Figura 37).

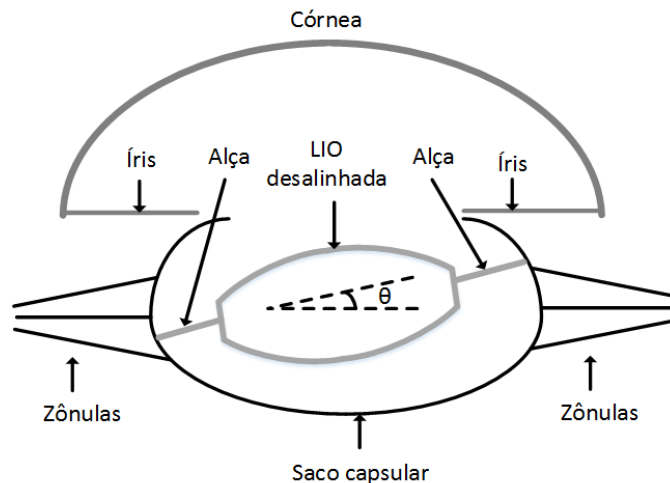


Figura 37 - LIO implantada com desalinhamento no saco capsular.

Fonte: Autoria própria.

Foram consideradas 4 amplitudes diferentes de coma:  $\lambda/2$ ,  $\lambda/8$ ,  $\lambda/14$ ,  $\lambda/20$  e apenas uma dioptria de LIO (+ 30 D). A faixa de amplitudes de coma selecionadas abrangem os casos tênues ( $\lambda/20$ ) e extremos ( $\lambda/2$ ) (tais valores estão dentro da faixa de tolerância de fabricação de lentes (HECHT, 2006)) e sua magnitude se baseia no comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ) utilizada nas simulações (546 nm). A relação entre a amplitude de aberração (unidade em “waves”, ou seja, unidade de comprimento de onda empregado no projeto: 546 nm) aplicada no modelo da LIO no Zemax® e a amplitude de desalinhamento equivalente do torno (parâmetro  $\delta$  apresentado na Figura 36) pode ser observada na Figura 38. Essa relação foi obtida simulando-se as amplitudes de aberração coma citadas acima na superfície da LIO no Zemax® e observando-se o impacto dessas distorções na imagem formada (por meio da avaliação dos termos de

<sup>15</sup> O saco capsular consiste na camada mais externa do cristalino que não é removida durante a extração cirúrgica do mesmo.

<sup>16</sup> O posicionamento de uma LIO no saco capsular depende de diversos fatores como: estabilidade da LIO no saco capsular devido a suas alças, experiência do médico durante o seu implante etc.

aberração). Após isso removia-se a aberração da superfície da LIO e inclinava-se a mesma sob um ângulo que iria provocar a mesma distorção do caso anterior na imagem. Com esse ângulo é possível inferir a amplitude do desalinhamento do torno, alcançando, portanto, os pares de coordenadas do gráfico da Figura 38. Convém destacar que os tornos atuais apresentam uma elevada precisão de fabricação (precisão micrométrica), chegando a apresentar tolerância de desalinhamento da ordem de 5  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, é apresentado na Figura 38 resultados que correspondem à distorções na superfície da LIO que são comercialmente aceitáveis, mas, na prática, dependendo da precisão do torno que se utiliza, pode-se notar que a faixa de interesse na Figura 38 fica reduzida a uma pequena faixa à direita da curva (entre amplitudes de coma de  $\lambda/16$  a  $\lambda/20$ ).

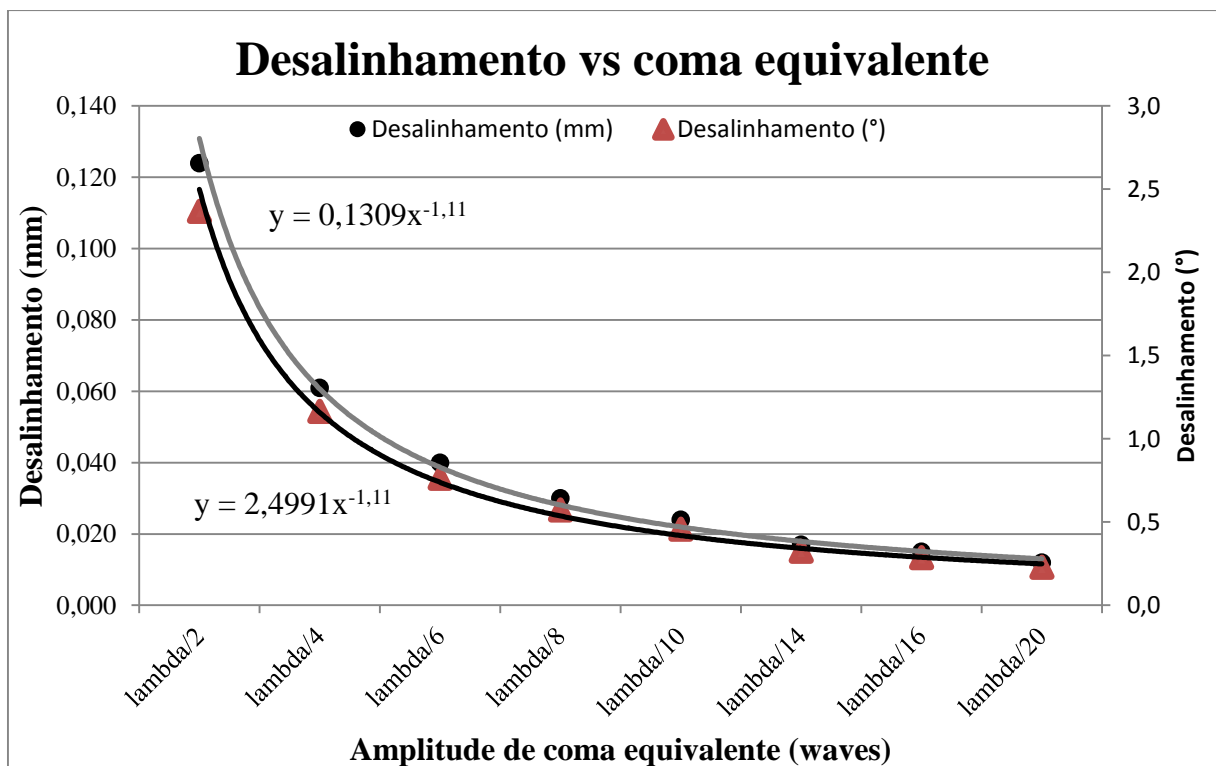


Figura 38 - Gráfico do desalinhamento do torno versus amplitude de aberração coma na LIO.

Fonte: Autoria própria.

A LIO com dioptria de + 30 D foi selecionada, pois sua superfície é a que possui maior influência de aberração esférica dentre as LIOs simuladas e, portanto, corresponderá a um caso extremo de presença de aberrações. Os resultados referentes a cada dioptria são apresentados separadamente a seguir.

#### 4.1.1 LIO de + 30 D

Os parâmetros da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 39, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO. O gráfico de MTF da Figura 39, assim como todos os outros gráficos de MTF apresentados para as LIOs monofocais nessa dissertação, apresentam uma notação característica do software Zemax em seu canto superior esquerdo. Nessa notação o termo “TS DIFF. LIMIT” corresponde às curvas de MTF tangencial (T) e sagital (S) do limite de difração da LIO; o termo “TS” logo abaixo do termo anterior corresponde às curvas de MTF tangencial (T) e sagital (S) da lente e o termo “0.0000 0.0000 DEG” corresponde ao ângulo em graus (“DEG”) que o feixe incidente na LIO faz com o eixo óptico. Em todos os gráficos de MTF esse termo é 0, pois os feixes incidem na LIO paralelamente ao eixo óptico.

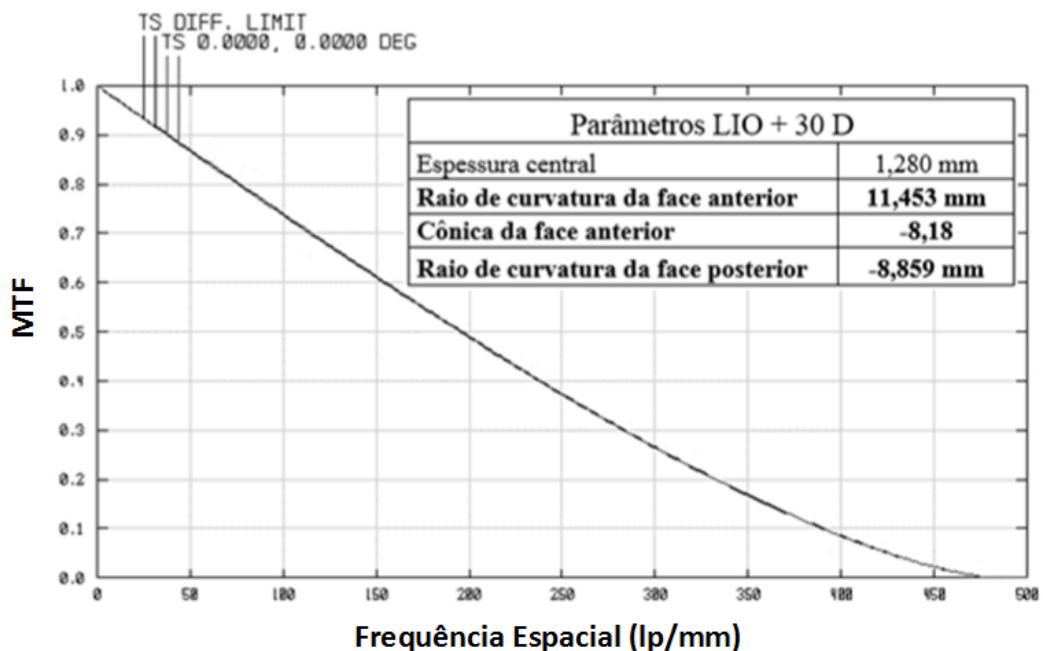


Figura 39 – MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 30 D otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 39 pode-se notar que o MTF da LIO e seu limite de difração estão bem próximos, mas o limite de difração do sistema ainda não foi atingido. Para visualizar melhor o quão próximo o MTF da LIO está de seu limite de difração é apresentado na Figura 40 a diferença

entre essas duas curvas em função da frequência espacial. Observa-se que a diferença máxima entre o MTF da LIO e seu limite de difração é inferior a 0,5 %, sendo seu valor de  $4,41E-03$ .

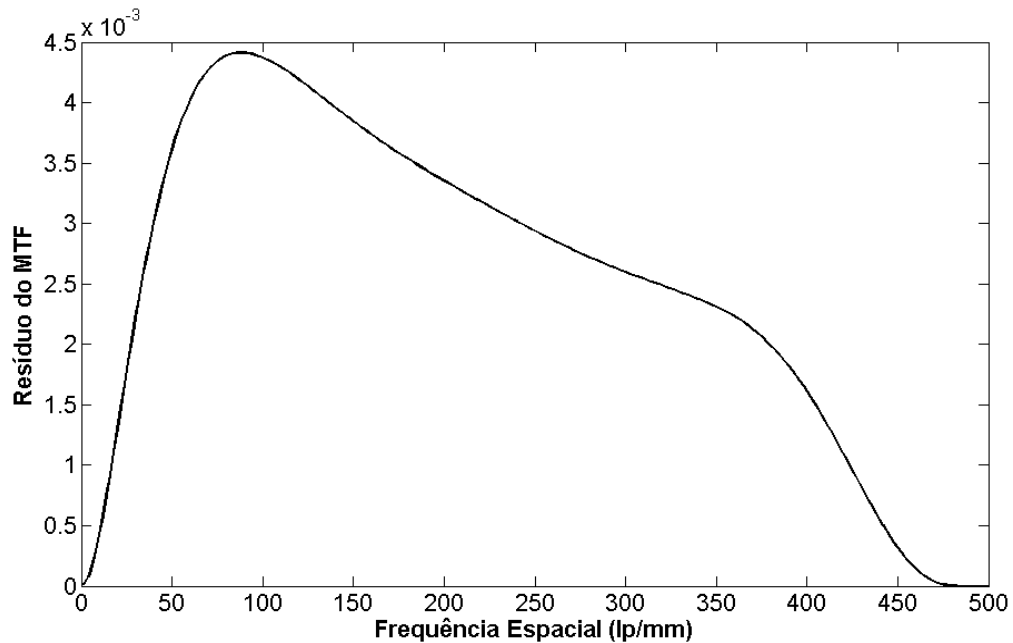


Figura 40 - Diferença entre o MTF da LIO de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 apresenta o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo, configurando-se como uma lente esférica. Pode-se notar que para este caso a LIO sem cônica (LIO esférica) apresenta uma curva de MTF com desempenho inferior ao da LIO com cônica (Figura 39). Tal comportamento será observado, também, nas LIOs de + 25 D, + 20 D, +15 D e + 5 D apresentadas nos próximos tópicos deste trabalho.

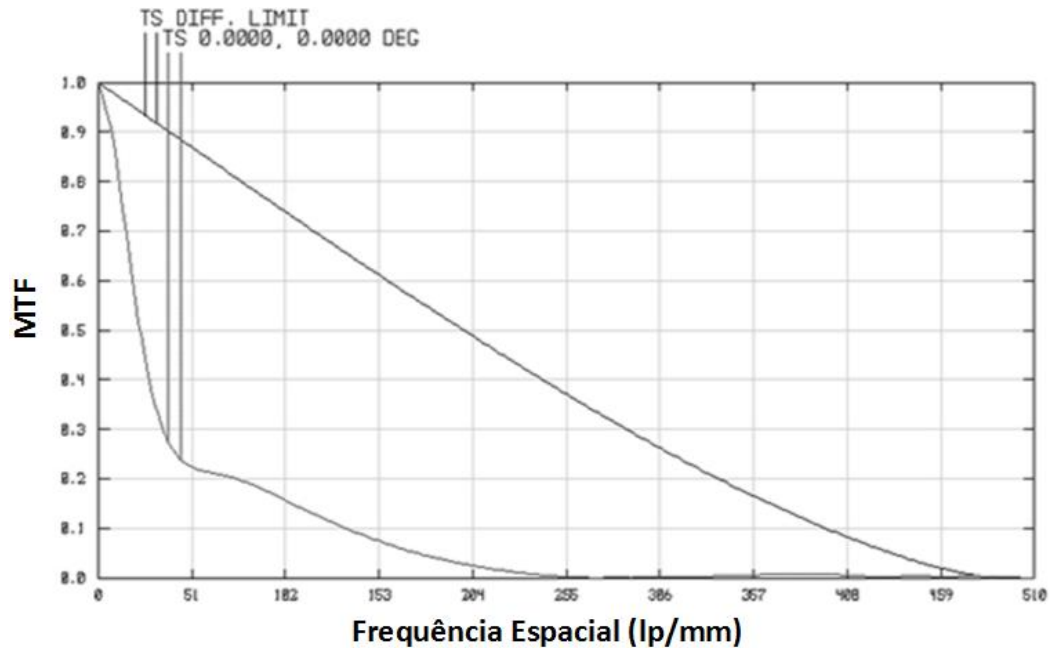


Figura 41 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica, ou seja, uma LIO com curvaturas correspondentes às de uma lente esférica encontrada no mercado de + 30 D. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura. Pela Figura 42 pode-se notar que a escolha adequada das curvaturas de uma LIO esférica garante um MTF que atenda aos requisitos da norma ISO 11979-2 ( $MTF > 0,43$  para 100 pares de linha por milímetro), entretanto, esse MTF não é tão bom quanto o MTF de uma LIO asférica (Figura 39). Tal comportamento também será observado nas LIOs de + 25 D, + 20 D e + 15 D apresentadas nos próximos tópicos deste trabalho. A LIO de + 5 D irá fugir a essa tendência e os motivos desse comportamento serão descritos no item 4.1.6 deste trabalho.

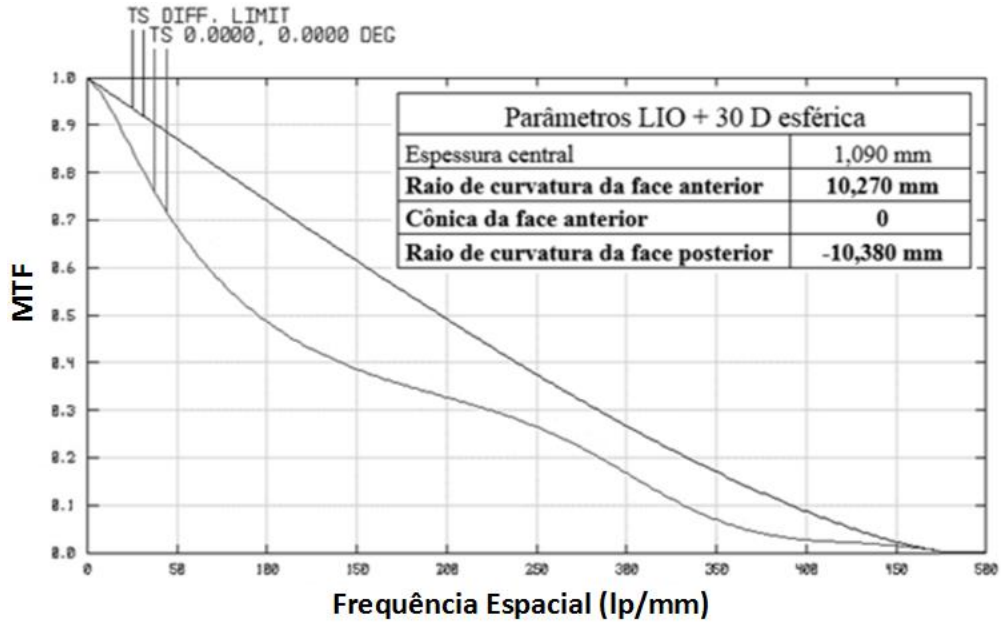


Figura 42 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 apresenta o MTF da LIO de + 30 D asférica após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros alcançados ao final da otimização juntamente com os parâmetros encontrados pela otimização através do NSGA-II estão presentes no Quadro 1.

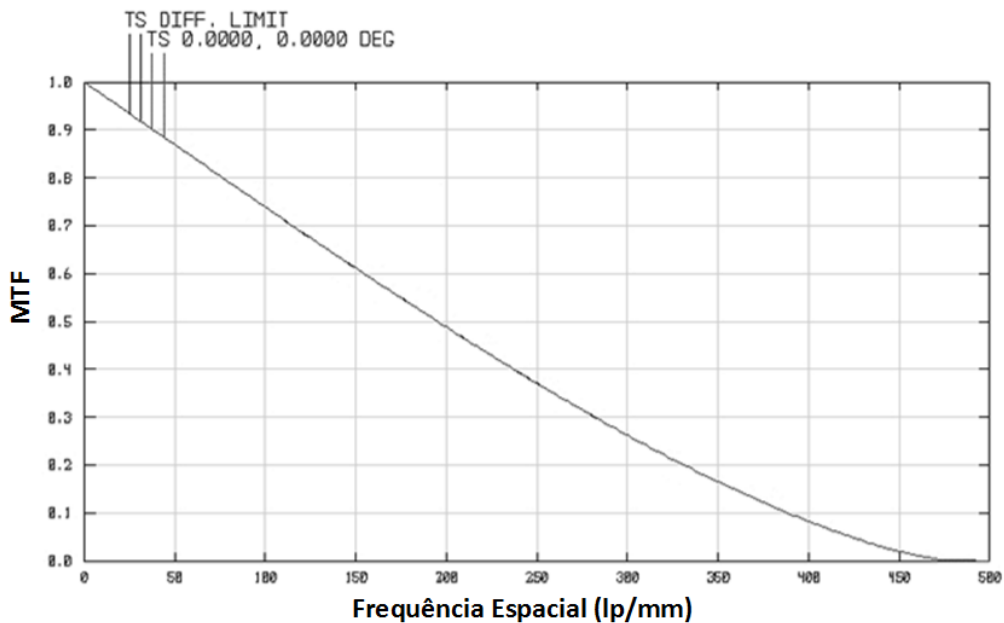


Figura 43 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.



Quadro 1 - Parâmetros da LIO + 30 D/DLS/NSGA-II.

Parâmetros LIO + 30 D		
Parâmetros	DLS	NSGA-II
Espessura central	1,280 mm	1,280 mm
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	<b>7,021 mm</b>	<b>11,453 mm</b>
<b>Cônica da face anterior</b>	<b>-0,78</b>	<b>-8,18</b>
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	<b>-19,635 mm</b>	<b>-8,859 mm</b>

Fonte: Autoria própria.

O MTF da LIO apresentado na Figura 43 está exatamente sobre sua curva de limite de difração. Isso implica que a otimização de busca local realizada após a otimização de busca global permitiu que o ótimo global do sistema óptico fosse alcançado para a LIO de + 30 D. Tal resultado também é alcançado para todas as outras dioptrias de LIOs monofocais sem distorção (sem presença de aberração coma) otimizadas nos tópicos seguintes. Para se ter uma noção quantitativa do impacto de se empregar a solução encontrada pelo NSGA-II como parâmetro inicial do processo de otimização pelo método DLS do Zemax é apresentado na Figura 44 o MTF obtido pela otimização do método DLS diretamente sobre os parâmetros de curvatura da face anterior e posterior e cônica da face anterior da LIO. O MTF obtido se encontra bem abaixo do limite de difração o que indica que o método DLS encontrou um ótimo local como solução.

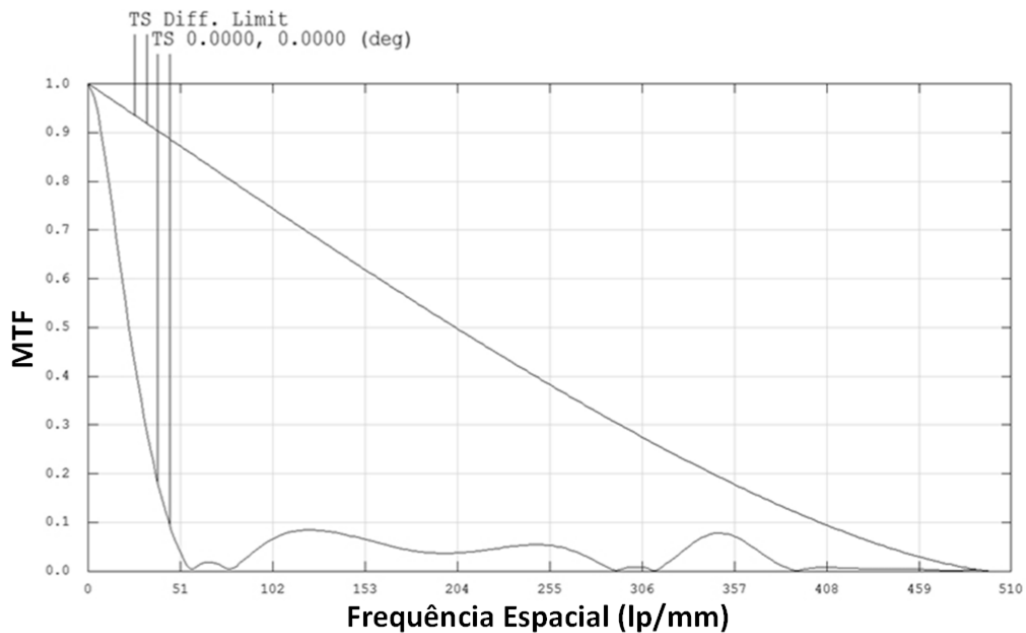


Figura 44 - LIO de +30 D otimizada diretamente pelo método DLS.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2 LIO de + 25 D

Os parâmetros da LIO de + 25 D ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 45, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.

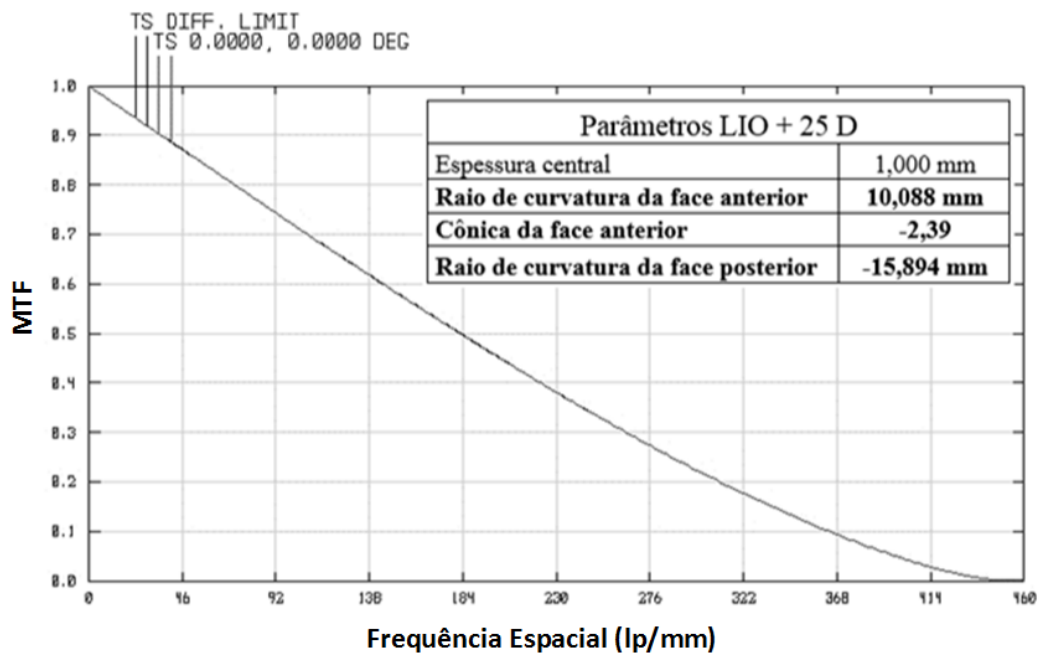


Figura 45 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 25 D otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 45 pode-se notar que o MTF da LIO e seu limite de difração estão bem próximos. Para visualizar melhor o quão próximo o MTF da LIO está de seu limite de difração é apresentado na Figura 46 a diferença entre essas duas curvas em função da frequência espacial. Observa-se que a diferença máxima entre o MTF da LIO e seu limite de difração é inferior a 0,14 %, sendo seu valor de 1,26E-03.

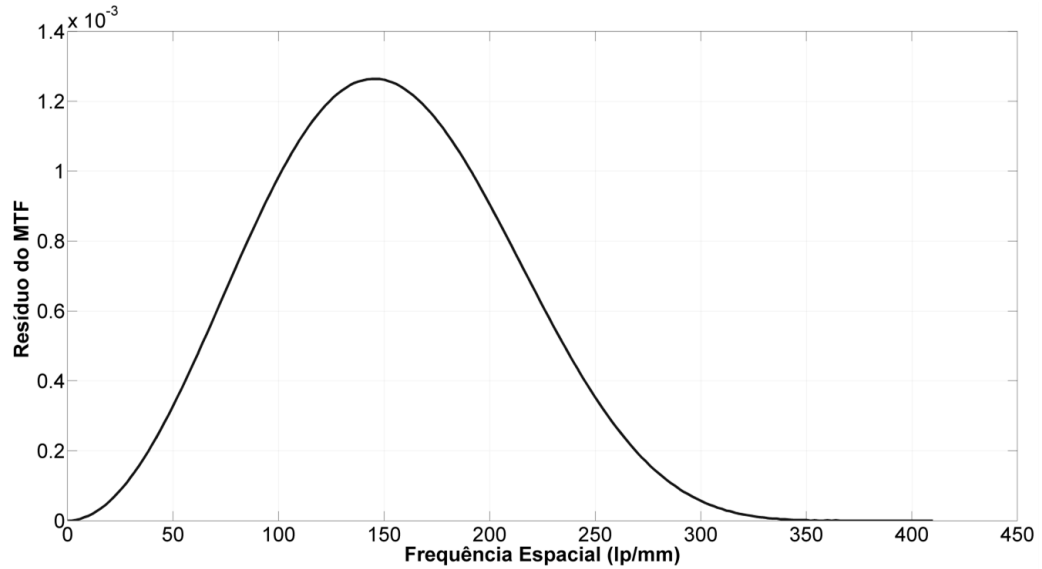


Figura 46 - Diferença entre o MTF da LIO de + 25 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 47 apresenta o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

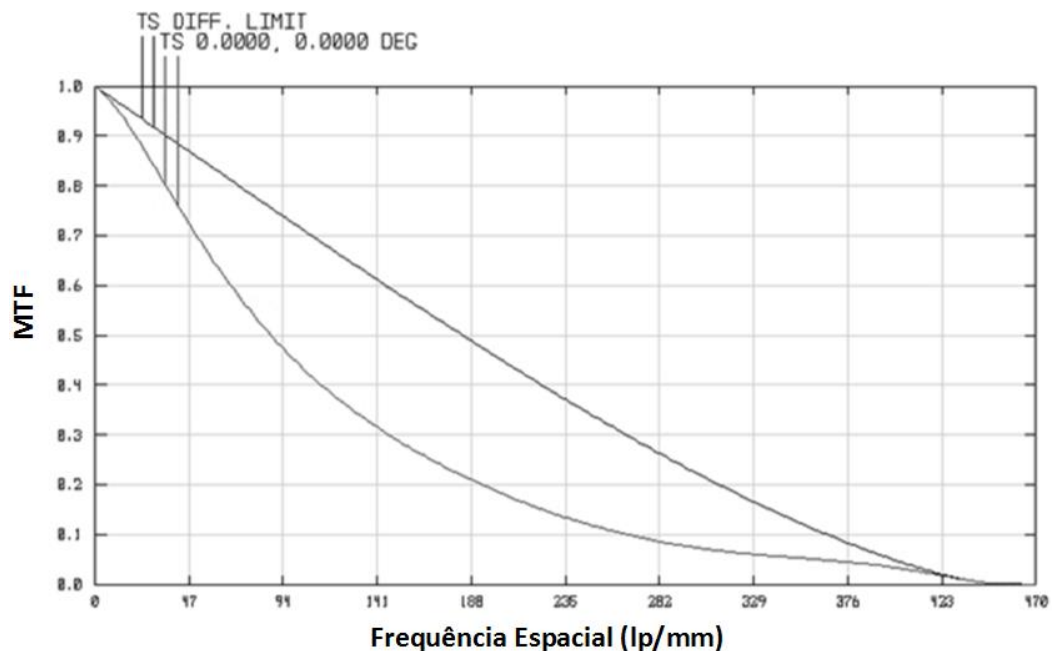


Figura 47 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 25 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 48 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 25 D. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura.

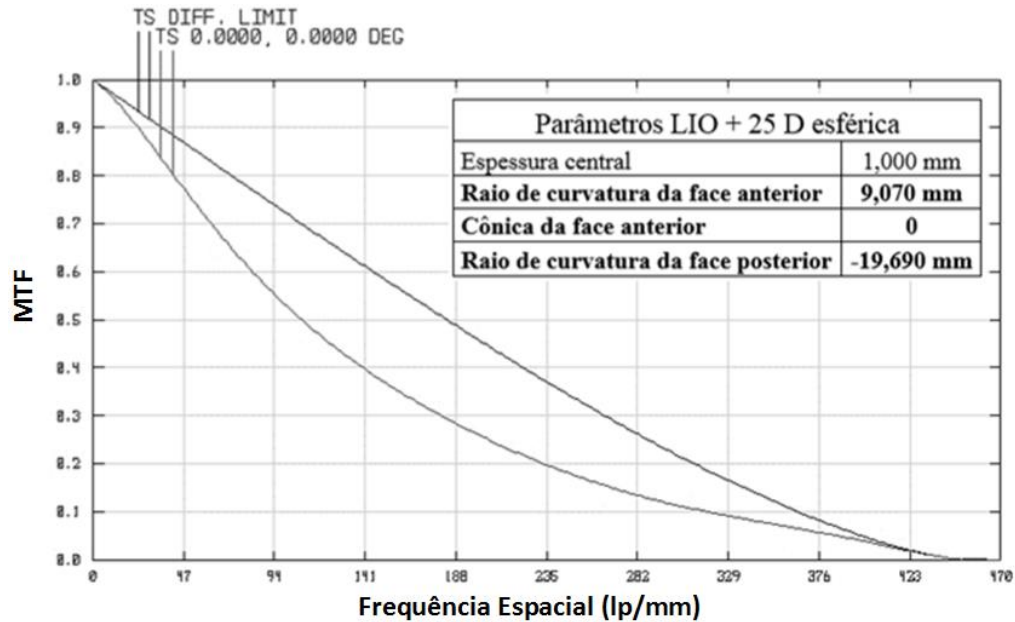


Figura 48 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 25 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 49 apresenta o MTF da LIO de + 25 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização juntamente com os parâmetros encontrados pela otimização através do NSGA-II estão presentes no Quadro 2.

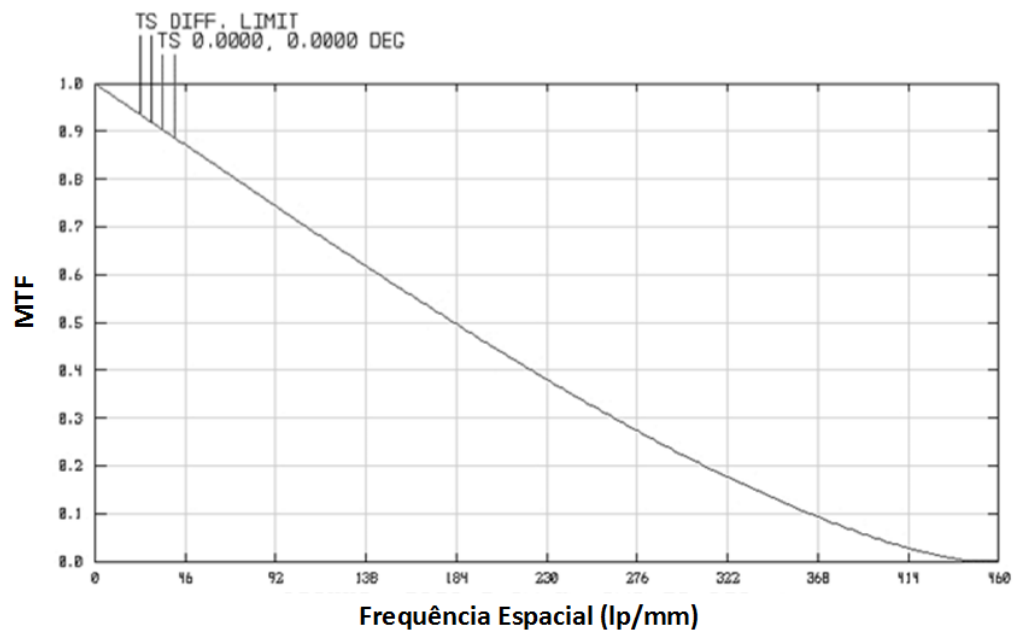


Figura 49 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 25 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Quadro 2 - Parâmetros da LIO + 25 D/DLS/NSGA-II.

Parâmetros LIO + 25 D		
Parâmetros	DLS	NSGA-II
Espessura central	1,000 mm	1,000 mm
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	<b>8,951 mm</b>	<b>10,088 mm</b>
<b>Cônica da face anterior</b>	<b>-1,23</b>	<b>-2,39</b>
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	<b>-20,412 mm</b>	<b>-15,894 mm</b>

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.3 LIO de + 20 D

Os parâmetros da LIO de + 20 D ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 50, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.

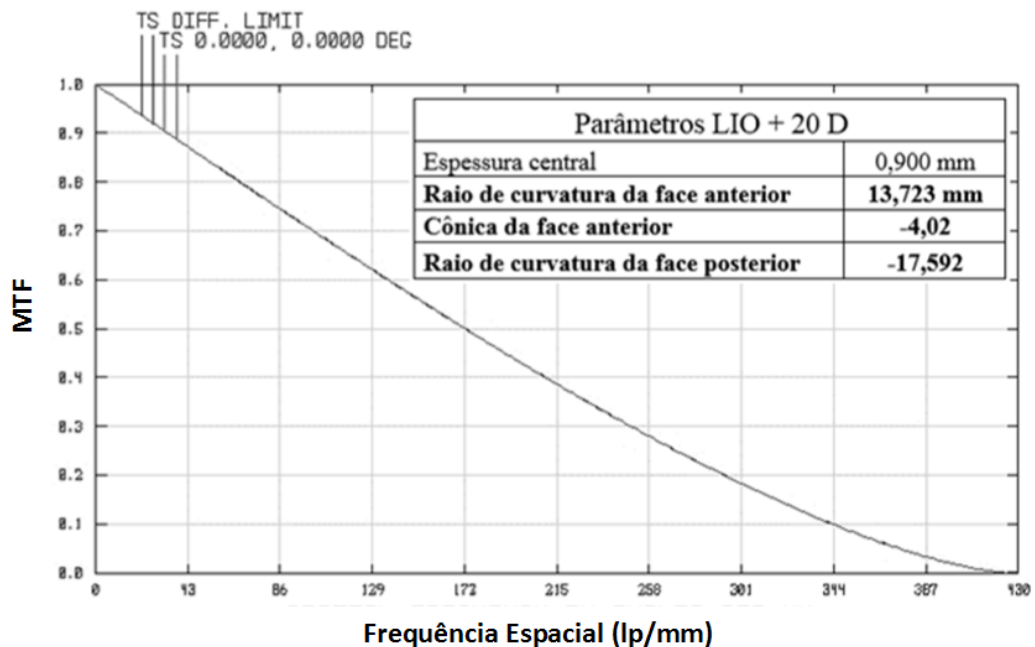


Figura 50 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 20 D otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 50 pode-se notar que o MTF da LIO e seu limite de difração estão bem próximos. Para visualizar melhor o quão próximo o MTF da LIO está de seu limite de difração é apresentado na Figura 51 a diferença entre essas duas curvas em função da frequência espacial. Observa-se que a diferença máxima entre o MTF da LIO e seu limite de difração é inferior a 0,028 %, sendo seu valor de  $2,44E-04$ .

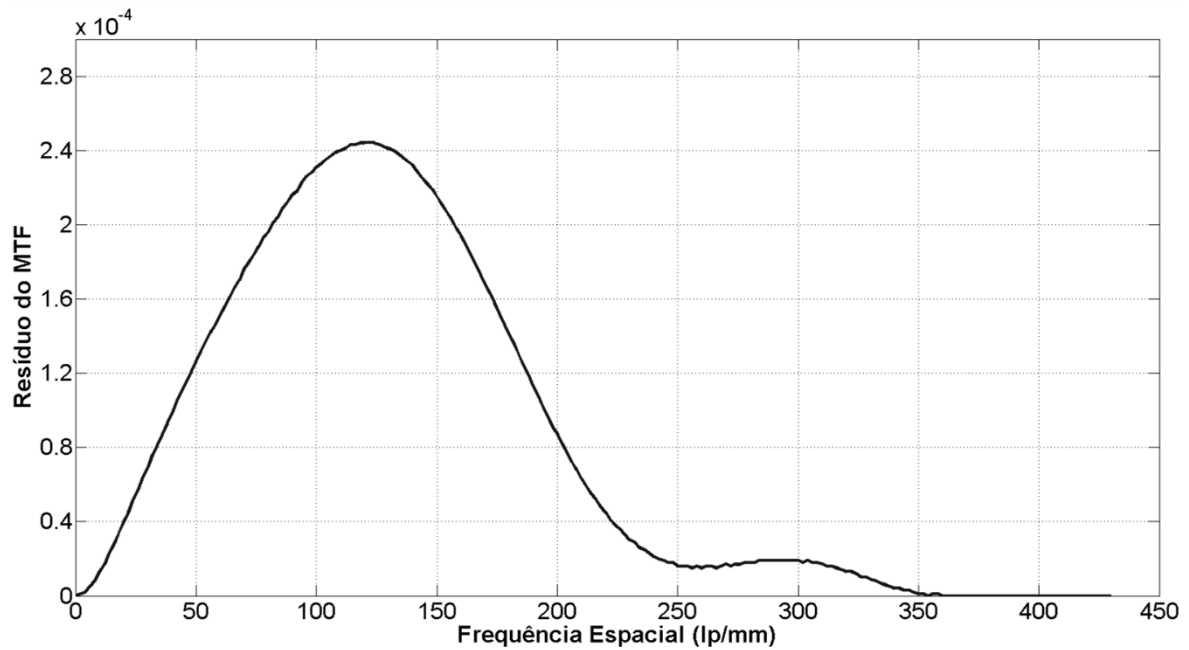


Figura 51 - Diferença entre o MTF da LIO de + 20 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 52 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

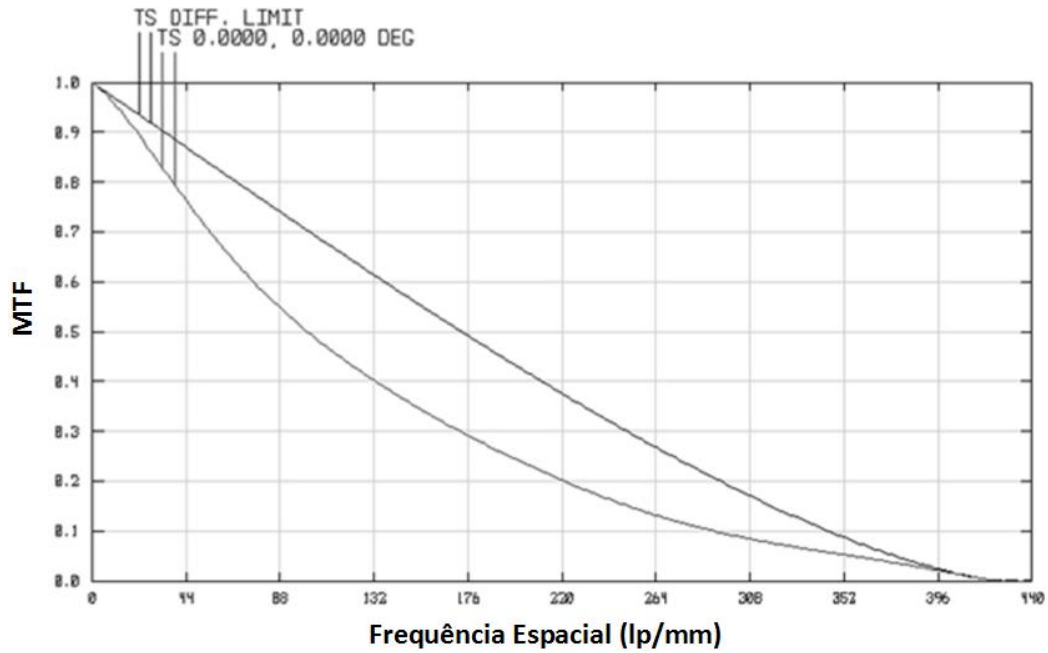


Figura 52 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 20 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 53 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 20 D. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura. Pode-se notar que a LIO otimizada pelo NSGA-II apresenta, sob ausência de constante cônica, um MTF (Figura 52) superior ao MTF de uma LIO esférica típica para a dioptria de + 20 D (Figura 53). Tal fato indica que a LIO otimizada apresenta parâmetros de curvaturas que modelam uma LIO esférica com desempenho superior ao MTF de LIOs esféricas já comercializadas no mercado. O mesmo comportamento pode ser observado para a LIO esférica de + 15 D apresentada no tópico seguinte.

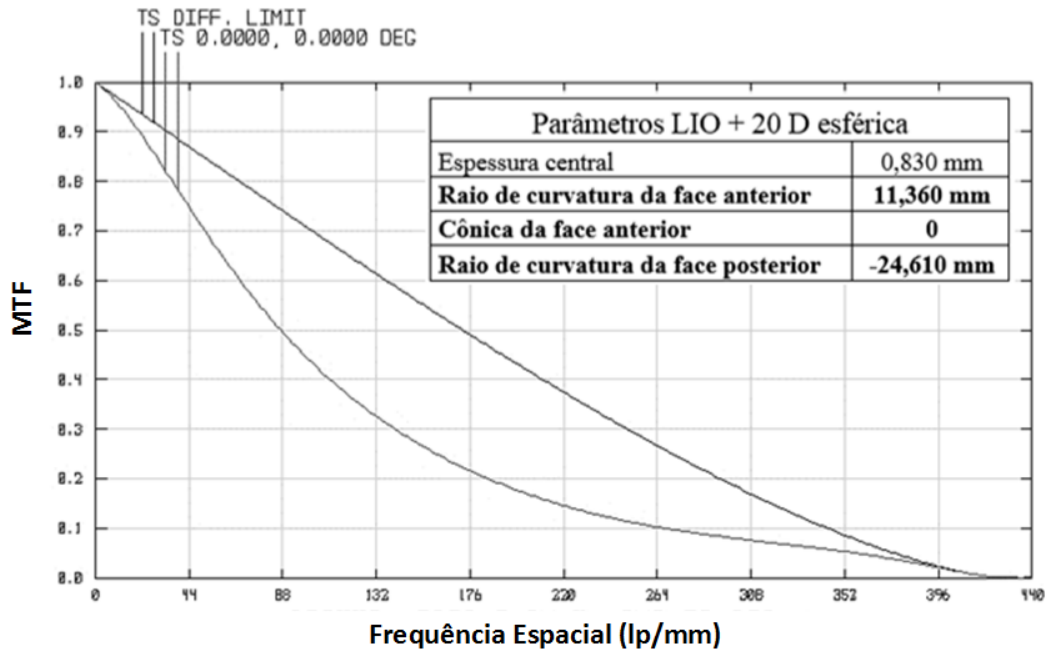


Figura 53 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 20 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 54 apresenta o MTF da LIO de + 20 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização juntamente com os parâmetros encontrados pela otimização através do NSGA-II estão presentes no Quadro 3.

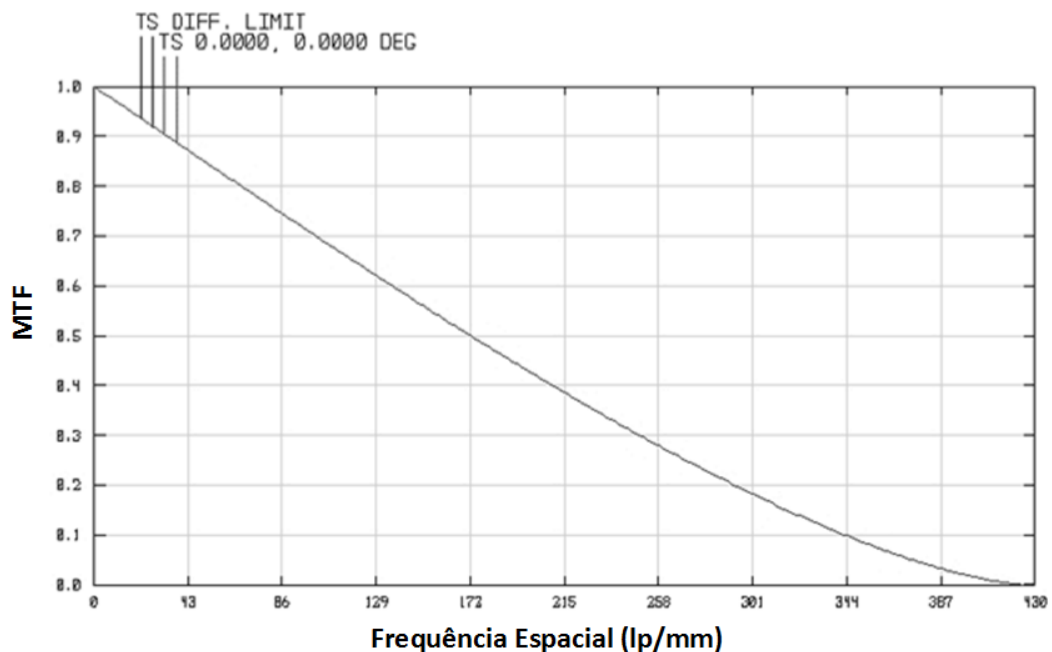


Figura 54 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 20 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.



Quadro 3 - Parâmetros da LIO + 20 D/DLS/NSGA-II.

Parâmetros LIO + 20 D		
Parâmetros	DLS	NSGA-II
Espessura central	0,900 mm	0,900 mm
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	<b>12,179 mm</b>	<b>13,723 mm</b>
<b>Cônica da face anterior</b>	<b>-2,55</b>	<b>-4,02</b>
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	<b>-21,272 mm</b>	<b>-17,592</b>

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4 LIO de + 15 D

Os parâmetros da LIO de + 15 D ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 55, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.

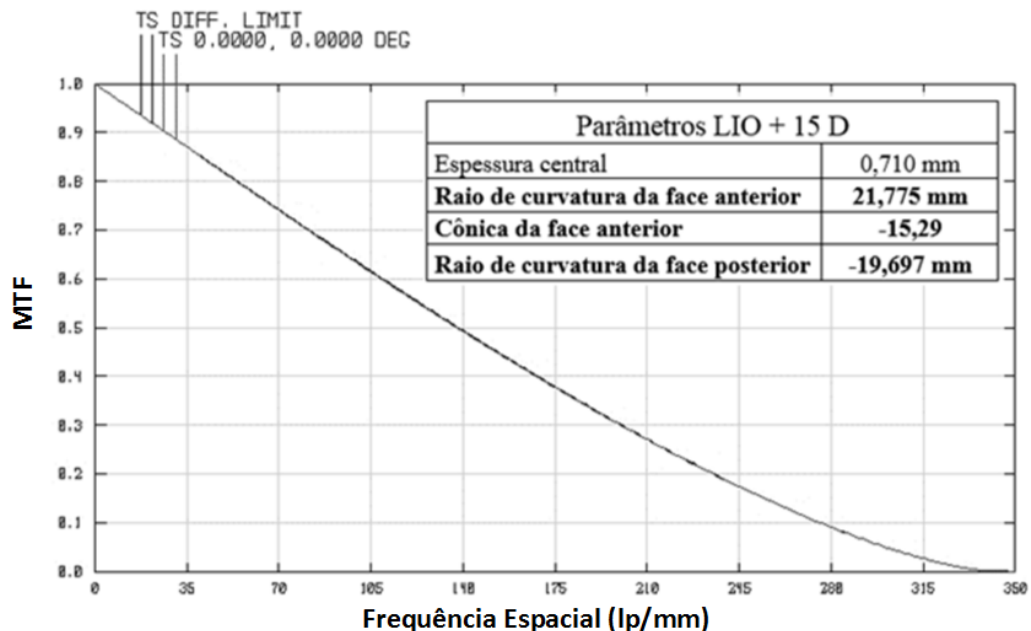


Figura 55 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 15 D otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 55 pode-se notar que o MTF da LIO e seu limite de difração estão bem próximos. Para visualizar melhor o quão próximo o MTF da LIO está de seu limite de difração

é apresentado na Figura 56 a diferença entre essas duas curvas em função da frequência espacial. Observa-se que a diferença máxima entre o MTF da LIO e seu limite de difração é inferior a 0,25 %, sendo seu valor de 2,35E-03.

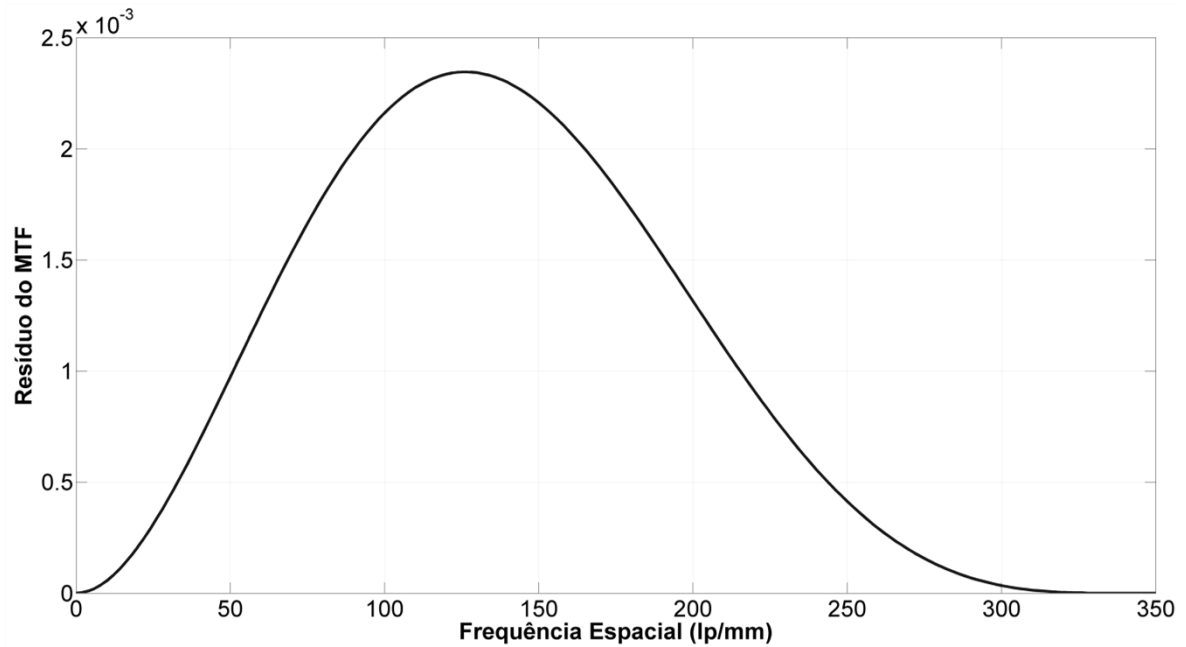


Figura 56 - Diferença entre o MTF da LIO de + 15 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 57 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

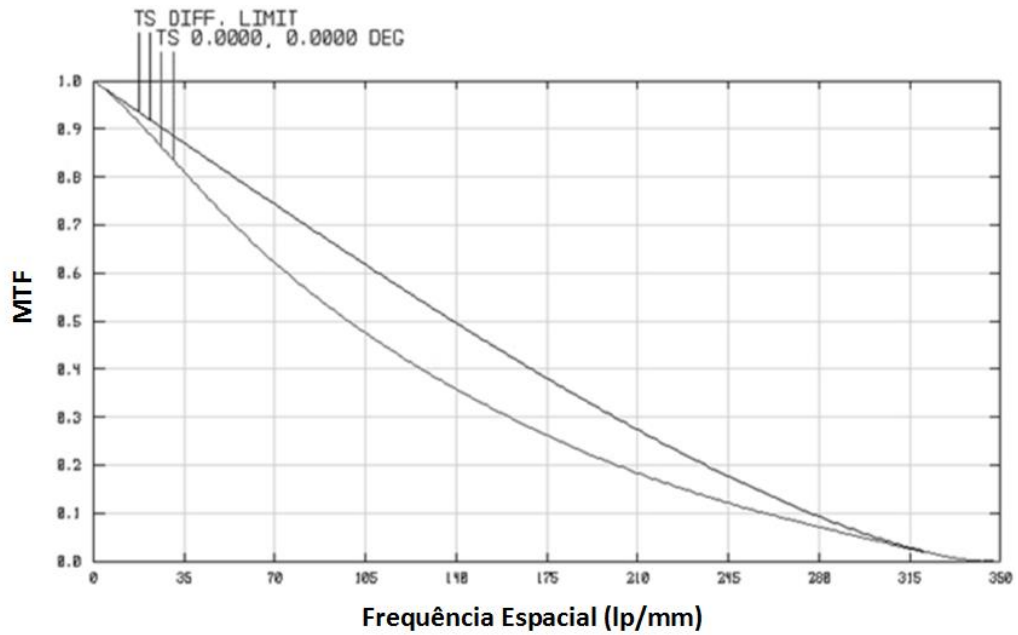


Figura 57 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 15 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 58 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 15 D. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura.

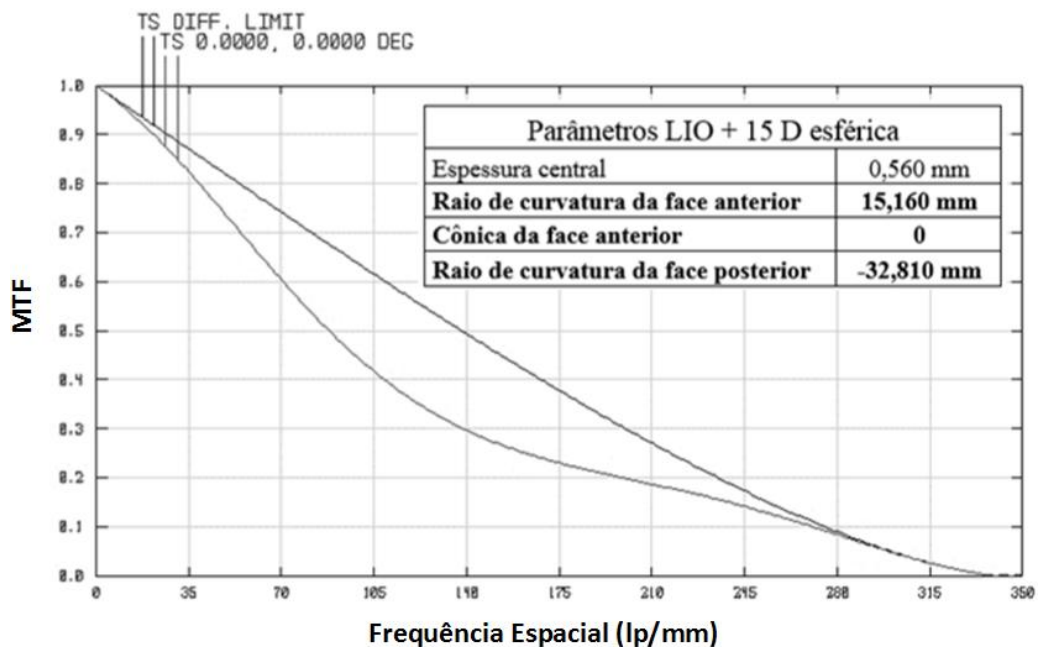


Figura 58 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 15 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 59 apresenta o MTF da LIO de + 15 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização juntamente com os parâmetros encontrados pela otimização através do NSGA-II estão presentes no Quadro 4.

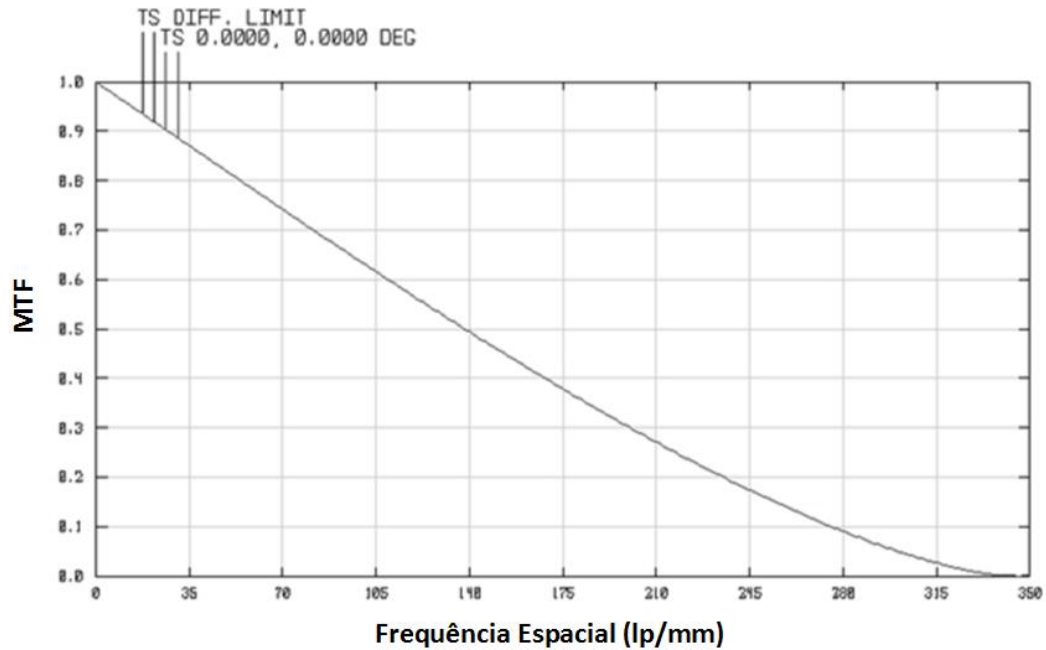


Figura 59 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 15 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4 - Parâmetros da LIO + 15 D/DLS/NSGA-II.

Parâmetros LIO + 15 D		
Parâmetros	DLS	NSGA-II
Espessura central	0,710 mm	0,710 mm
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	<b>18,512 mm</b>	<b>21,775 mm</b>
<b>Cônica da face anterior</b>	<b>-7,40</b>	<b>-15,29</b>
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	<b>-23,759 mm</b>	<b>-19,697 mm</b>

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.5 LIO de + 5 D

Os parâmetros da LIO de + 5 D ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 60, onde os parâmetros otimizados estão destacados em

negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração.

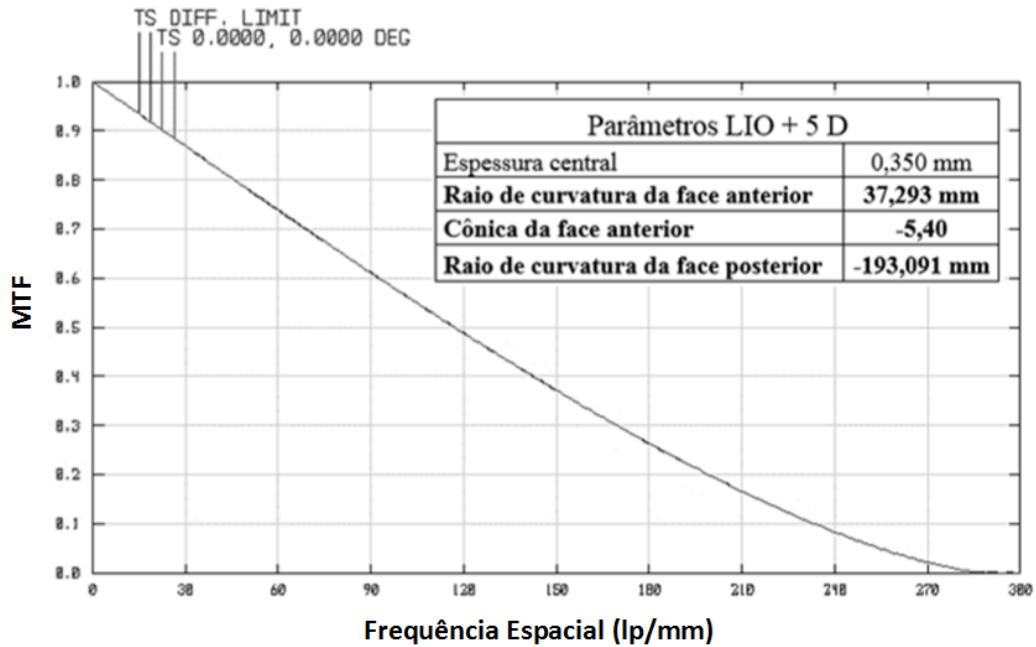


Figura 60 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 5 D otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 60 pode-se notar que o MTF da LIO e seu limite de difração estão bem próximos. Para visualizar melhor o quão próximo o MTF da LIO está de seu limite de difração é apresentado na Figura 61 a diferença entre essas duas curvas em função da frequência espacial. Observa-se que a diferença máxima entre o MTF da LIO e seu limite de difração é inferior a 0,06 %, sendo seu valor de 5,17E-04.

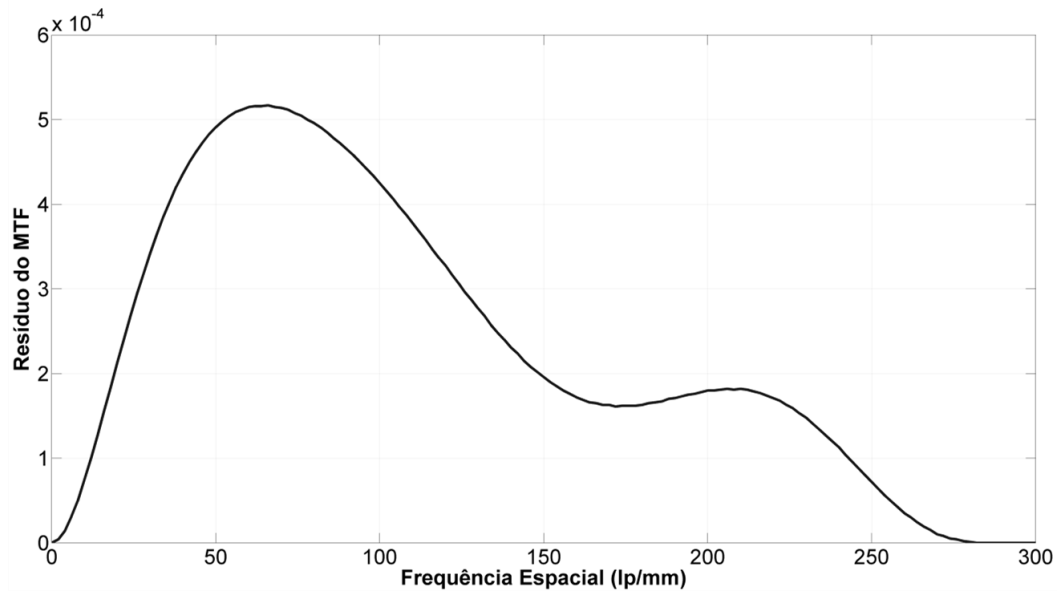


Figura 61 - Diferença entre o MTF da LIO de + 5 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 62 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo. Pode-se notar para este caso que a LIO sem cônica (LIO esférica) apresenta uma curva de MTF com desempenho próximo do MTF da LIO com cônica. Dessa forma, a correção da aberração esférica por meio de uma LIO asférica proporciona pouca melhoria para uma LIO nessa faixa de dioptria.

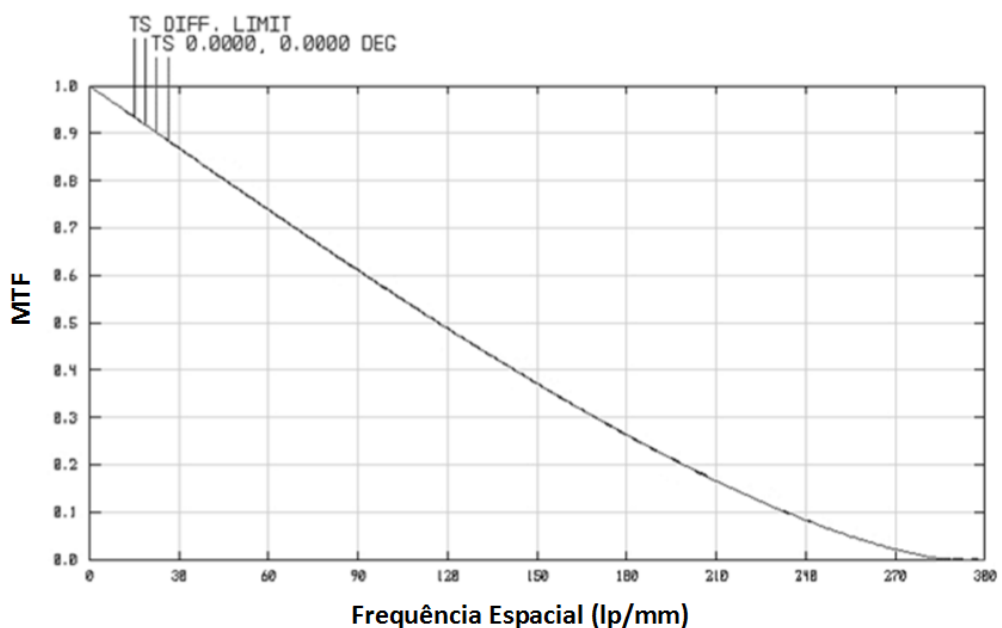


Figura 62 – MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 5 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 63 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 5 D. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura. Pode-se notar que a LIO otimizada pelo NSGA-II apresenta, com e sob a ausência de constante cônica, valores de MTF (Figura 60 e Figura 62) semelhantes ao MTF de uma LIO esférica típica para a dioptria de + 5 D (Figura 63), afinal a aberração esférica é tênue para essa faixa de dioptria.

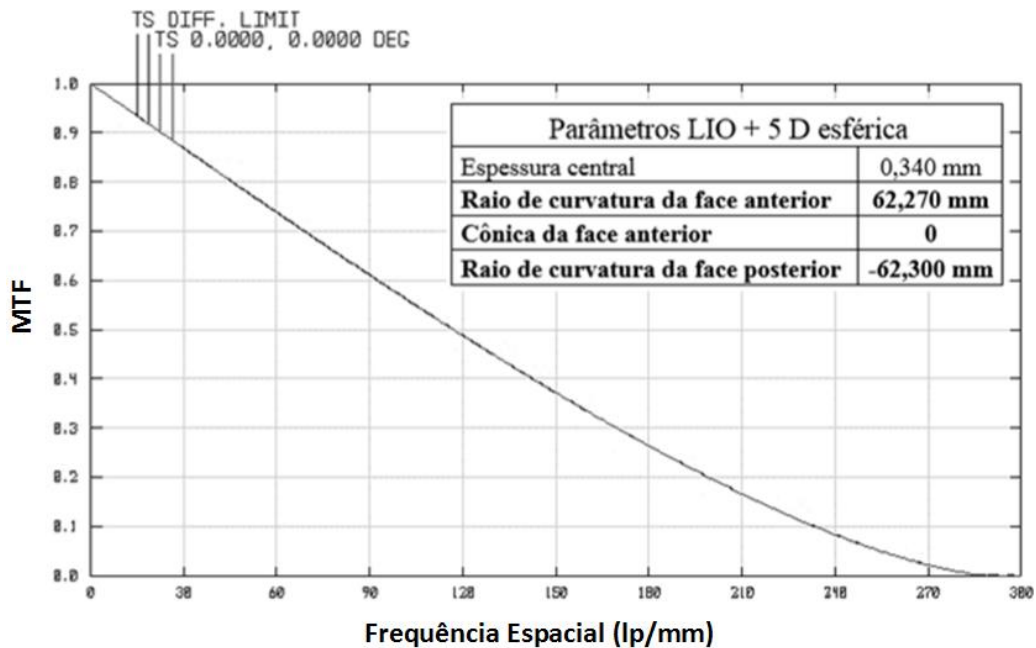


Figura 63 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 5 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 64 apresenta o MTF da LIO de + 5 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização juntamente com os parâmetros encontrados pela otimização através do NSGA-II estão presentes no Quadro 5.

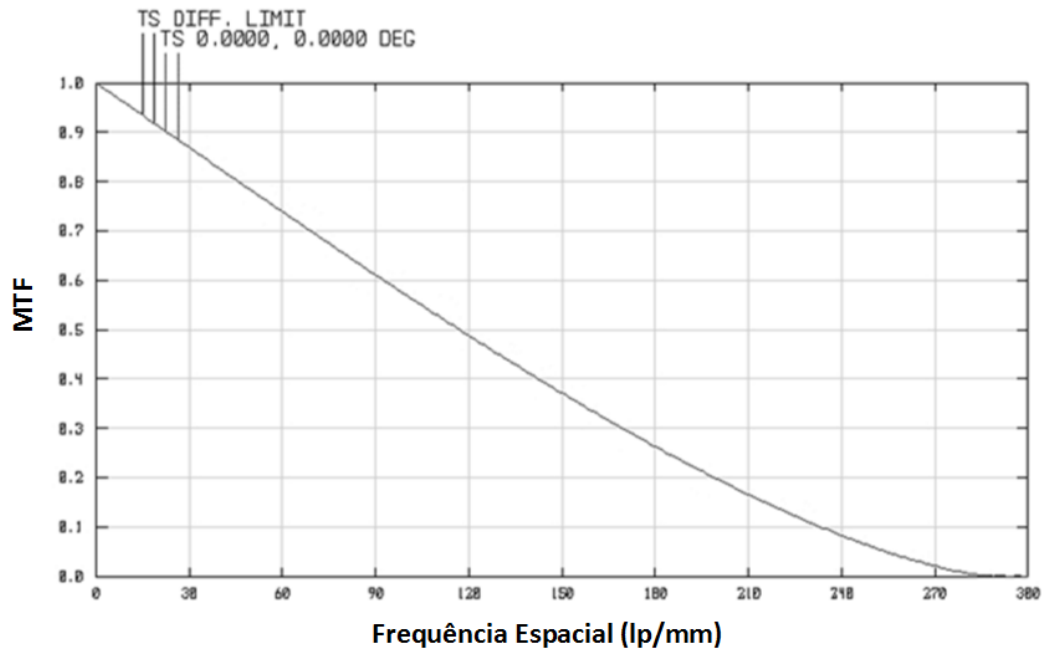


Figura 64 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 5 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Quadro 5 - Parâmetros da LIO + 5 D/DLS/NSGA-II.

Parâmetros LIO + 5 D		
Parâmetros	DLS	NSGA-II
Espessura central	0,350 mm	0,350 mm
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	<b>36,812 mm</b>	<b>37,293 mm</b>
<b>Cônica da face anterior</b>	<b>-20,00</b>	<b>-5,40</b>
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	<b>-201,254 mm</b>	<b>-193,091 mm</b>

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.6 Síntese dos resultados das LIOs monofocais

A Figura 65 apresenta as curvas de MTF sagital referentes às LIOs monofocais cujas dioptrias foram simuladas anteriormente. Para cada dioptria foram considerados três tipos de LIOs: a LIO esférica (linhas tracejadas com marcadores triangulares), LIO otimizada a partir do NSGA-II (linhas contínuas) e LIO final otimizada a partir do método DLS (linhas pontilhadas com marcadores circulares). Convém destacar que as curvas para a LIO de +5 D estão bem próximas, o que torna difícil a identificação das mesmas. A razão sobre tal comportamento será tratada durante a discussão dos resultados a seguir.



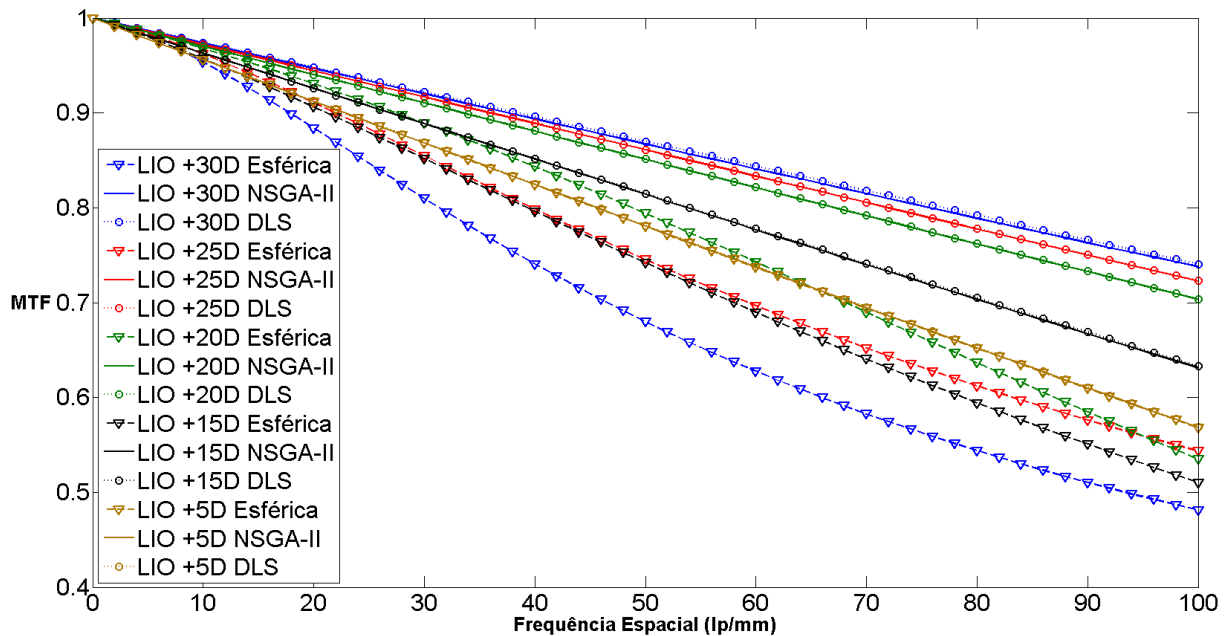


Figura 65 – MTF das LIOs monofocais.

Fonte: Autoria própria.

Primeiramente convém destacar pela análise da Figura 65 que o limite de difração das LIOs com dioptria mais elevada é sempre superior ao limite de difração das LIOs com dioptria menos elevada. Isso ocorre, pois conforme discutido no capítulo 2 (seção 2.4.1) a amplitude da curva de limite de difração (como, também, a frequência de corte) de qualquer sistema óptico é inversamente proporcional ao número-f do sistema. Dessa forma, como a abertura de todas as LIOs otimizadas foi mantida constante (3 mm de raio), tem-se que quanto menor for o comprimento focal de uma LIO, ou seja, quanto maior a sua dioptria maior serão as amplitudes e a frequência de corte do limite de difração da mesma em relação a uma LIO com menor dioptria. Tal análise pode ser ainda considerada sobre o ponto de vista do PSF. Como o limite de difração representa a melhor resolução espacial que um sistema pode alcançar tem-se que tal grandeza está relacionada com o tamanho do ponto focal formado (“spot”), ou seja, quanto menor o tamanho do “spot” formado maior é a resolução do sistema óptico. Como o tamanho do “spot” também tem relação diretamente proporcional com o número-f do sistema tem-se que as LIOs com maior dioptria formam “spots” menores.

Pela Figura 65, também, pode-se notar que, com exceção da LIO de +5 D (cor bege), existe uma diferença significativa entre o MTF das lentes esféricas (linhas tracejadas com triângulos) e esféricas, de modo que é possível perceber o quão melhor são as LIOs esféricas em relação àsquelas LIOs esféricas no que diz respeito à transferência de contraste. A pequena

diferença entre o MTF da LIO esférica e asférica observada para a LIO de +5 se deve ao fato de que uma LIO com baixa dioptria (menor que +10D) é pouco afetada pela aberração esférica (afinal a curvatura de suas superfícies são pequenas). Isso faz com que a cônica da LIO asférica tenha um impacto pequeno na melhora do MTF da LIO, pois esta cônica corrige uma aberração esférica que não afeta significativamente o MTF da mesma. Além disso, torna-se difícil a distinção entre as curvas da LIO asférica otimizada pelo NSGA-II e a LIO otimizada pelo método DLS para cada dioptria, pois o primeiro método de otimização (NSGA-II) fornece parâmetros de LIOs que já se encontram próximo do limite de difração, limite este que é alcançado após a aplicação subsequente do método DLS.

A Figura 66 mostra os resíduos entre o limite de difração e o MTF das LIOs com os parâmetros otimizados pelo NSGA-II. Tal figura permite notar que o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II se encontra próximo do limite de difração sendo que o resíduo máximo foi encontrado para a LIO de +30D e ele é inferior a 0,45%. Essa amplitude de resíduo é desprezível em termos de MTF, o que indica que apenas o emprego do NSGA-II na otimização de LIOs monofocais seria suficiente para ser ter uma LIO com desempenho próximo do limite de difração. (Luciana) Entretanto, o método DLS foi aplicado utilizando-se o resultado otimizado pelo NSGA-II com o intuito de se validar a capacidade do NSGA-II de encontrar uma solução na região de ótimo global do sistema (fato que é comprovado quando o método DLS faz o sistema alcançar o limite de difração). Apesar das LIOs otimizadas apresentarem valores de dioptria decrescentes (de +30D à +5D), observa-se pela Figura 66 que a variação dos resíduos das LIOs não segue um comportamento decrescente ou crescente. Isso se deve ao fato de que o método de otimização de busca global realizado pelo NSGA-II é estocástico e, portanto, as soluções encontradas apresentarão certa aleatoriedade não só entre as diferentes dioptrias de LIOs otimizadas como, também, existirão diferenças nos resultados para uma LIO de mesma dioptria a cada processo de otimização realizado. Apesar disso, é possível observar uma tendência na diminuição do resíduo à medida que a dioptria da LIO diminui, pois a influência da aberração esférica se torna menor com esse decréscimo de dioptria.

Em síntese pode-se notar que o NSGA-II foi capaz de encontrar parâmetros de LIOs monofocais que garantiram um desempenho em termos de MTF próximo ao limite de difração e que esse limite de difração foi capaz de ser alcançado após a subsequente otimização pelo método determinístico DLS do software Zemax®. Tais resultados indicam que parte dos objetivos desse trabalho foi alcançada, ou seja, o método de otimização global empregado em modo não sequencial do Zemax® e implementado no Matlab® foi capaz de encontrar

parâmetros de LIOs monofocais cujo desempenho se situava na bacia de ótimo global do sistema (o que tornou possível encontrar o ótimo global do sistema a partir do método DLS).

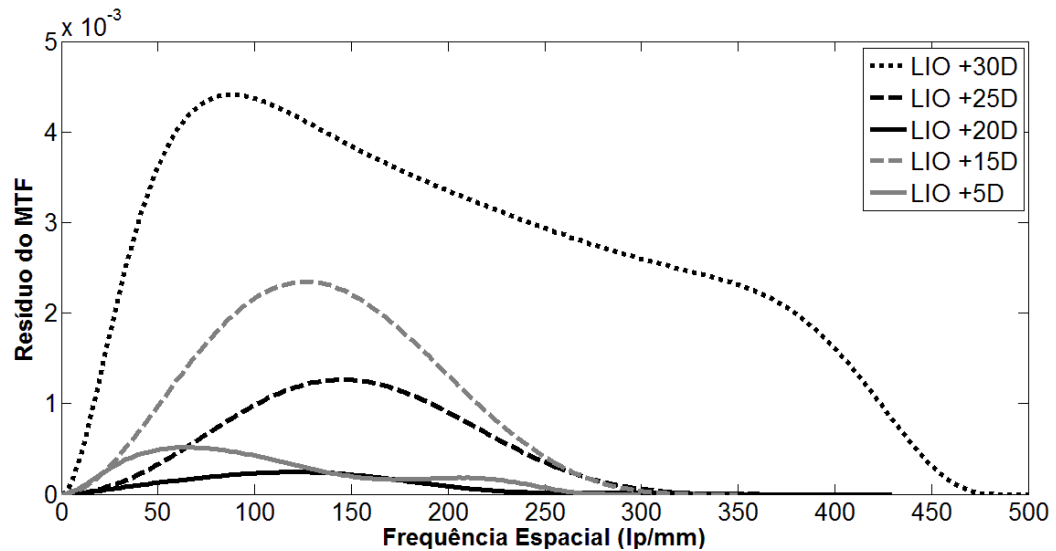


Figura 66 - Resíduo entre o limite de difração e o MTF das LIOs monofocais otimizadas pelo NSGA-II.

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 6 apresenta os parâmetros das LIOs monofocais esféricas típicas e das LIOs esféricas otimizadas pelo método DLS.

Quadro 6 – Parâmetros das LIOs monofocais esféricas e esféricas otimizadas.

	Dioptria	Espessura Central (mm)	Raio de curvatura da face anterior (mm)	Cônica da face anterior	Raio de curvatura da face posterior (mm)	MTF (100lp/mm)
LIO esférica	30	1,090	10,270	0	-10,380	0,481
LIO esférica	30	1,280	7,021	-0,78	-19,635	0,741
LIO esférica	25	1,000	9,070	0	-19,690	0,543
LIO esférica	25	1,000	8,951	-1,22	-20,412	0,723
LIO esférica	20	0,830	11,360	0	-24,610	0,441
LIO esférica	20	0,900	12,179	-2,54	-21,272	0,704
LIO esférica	15	0,560	15,160	0	-32,810	0,510
LIO esférica	15	0,710	18,512	-7,40	-23,759	0,633
LIO esférica	5	0,340	62,270	0	-62,300	0,568
LIO esférica	5	0,350	36,812	-20,00	-201,254	0,569

Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar quantitativamente pelo Quadro 6 a melhora obtida no MTF das LIOs asféricas em relação às esféricas para a frequência de 100 pares de linha por milímetros (frequência espacial de referência utilizada pela norma ISO 11979-2), com exceção da LIO de +5D cuja diferença é pequena (0,001 de diferença entre o MTF da LIO asférica e o da esférica).

#### 4.1.7 LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/2$

Os parâmetros da LIO ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 67, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.

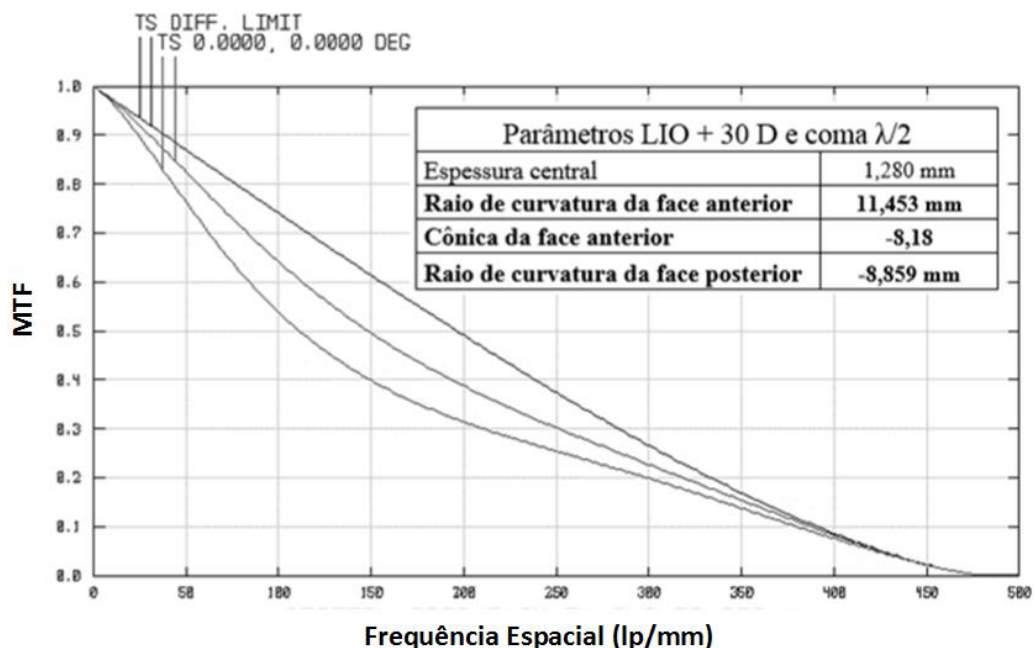


Figura 67 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 30 D e coma  $\lambda/2$  otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 67 pode-se notar que o MTF sagital e tangencial da LIO são diferentes. O desalinhamento do torno faz com que a superfície da LIO seja assimétrica axialmente e com isso o PSF formado no plano da imagem deixa de ser axialmente simétrico, resultando em valores de MTF diferentes em relação ao plano sagital e tangencial. Para ilustrar essa diferença

podem-se observar as curvas de PSF sagital e tangencial na Figura 68 referente a tal LIO. O eixo x corresponde à posição das curvas em relação aos píxeis do plano de imagem, sendo que a distância entre dois píxeis adjacentes é de  $0,5 \mu\text{m}$ . Pode-se notar que tanto o formato das curvas de PSF quanto sua posição em relação ao centro do plano de imagem são diferentes (o valor máximo do PSF sagital passa pelo centro do plano de imagem ao contrário do valor máximo do PSF tangencial). Isso faz com que o MTF sagital e tangencial calculado sobre cada uma dessas curvas de PSF seja diferente.

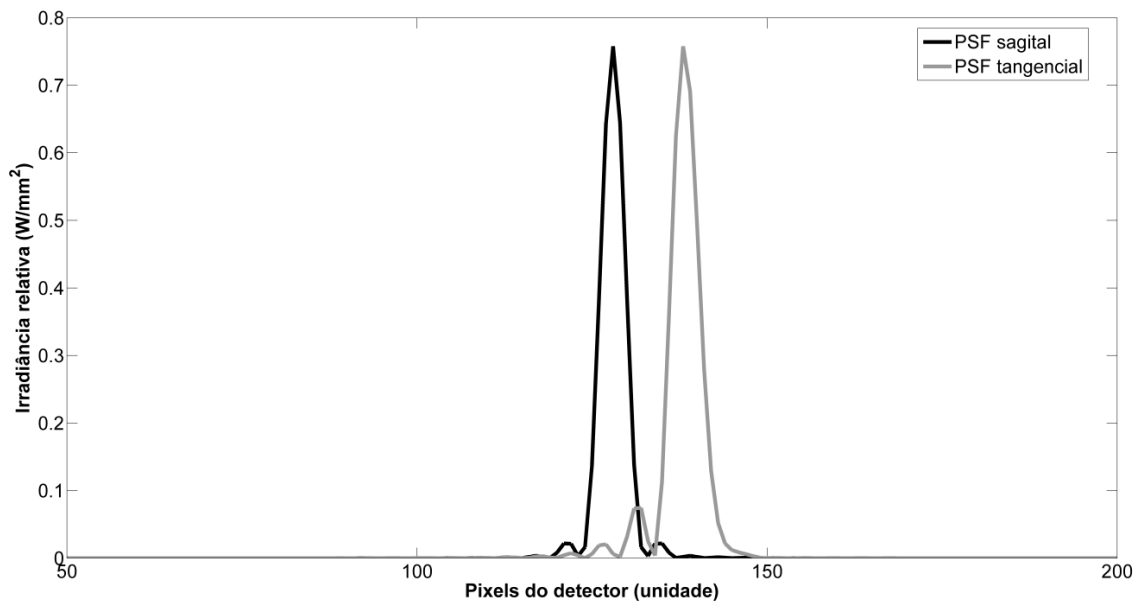


Figura 68 – PSF sagital e tangencial da LIO de +30D com coma de  $\lambda/2$  de amplitude.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 69 apresenta o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo. Pode-se notar para este caso que a LIO sem cônica (LIO esférica) apresenta curvas de MTF (sagital e tangencial) com desempenho inferior ao do MTF da LIO com cônica.

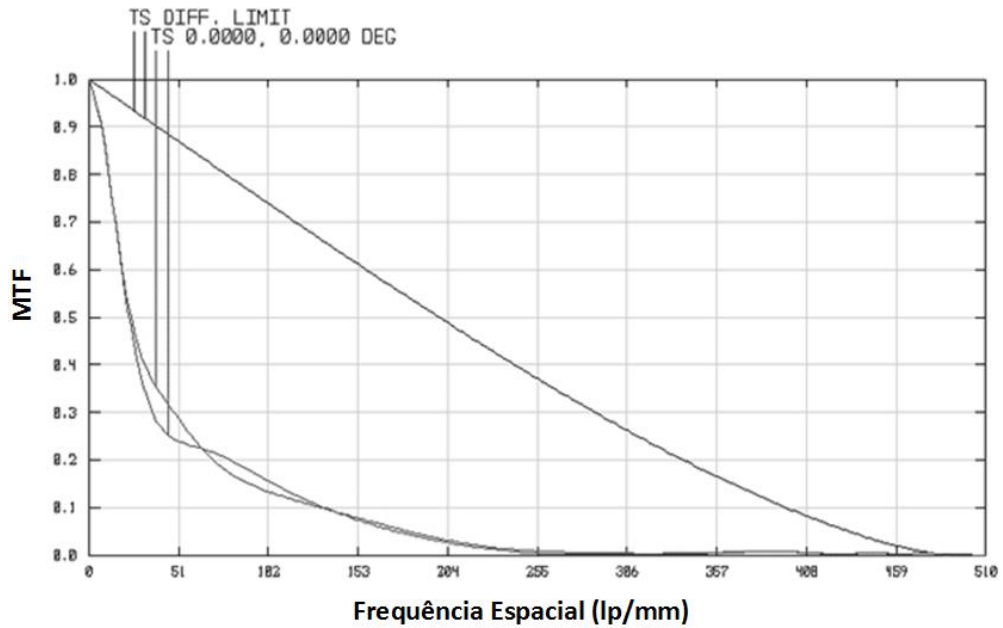


Figura 69 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 70 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 30 D com a presença da aberração coma. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura. Pode-se notar que o MTF da LIO esférica típica (Figura 70) apresenta desempenho inferior ao MTF da LIO com cônica (Figura 67). Tal comportamento pode ser observado também nas LIOs com amplitude de aberração coma de  $\lambda/8$ ,  $\lambda/14$  e  $\lambda/20$ .

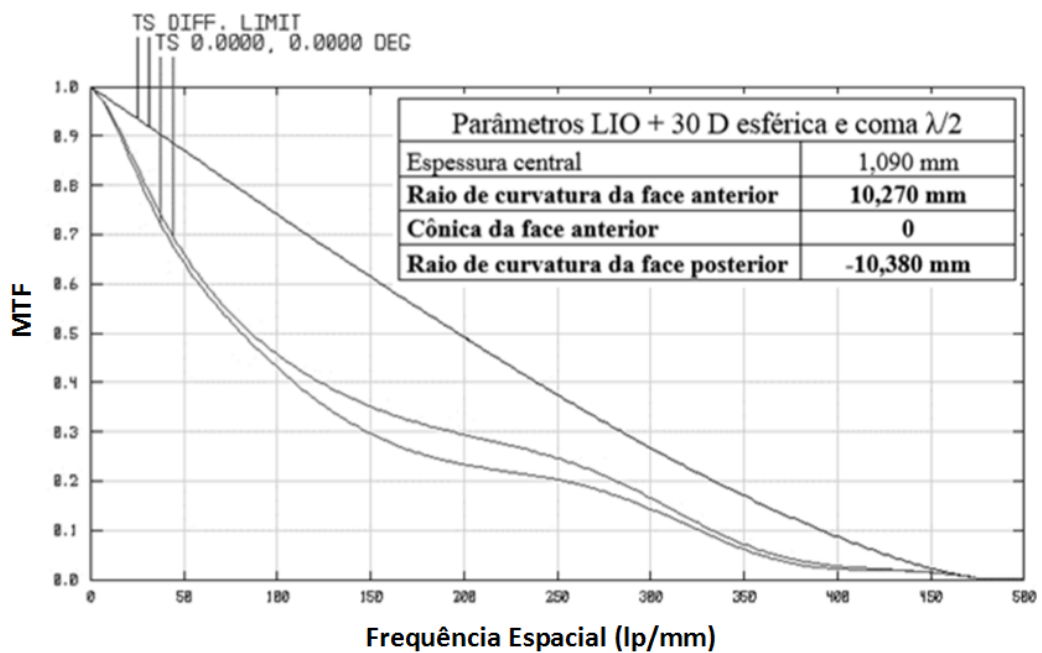


Figura 70 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 71 apresenta o MTF da LIO de + 30 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização estão presentes na mesma figura.

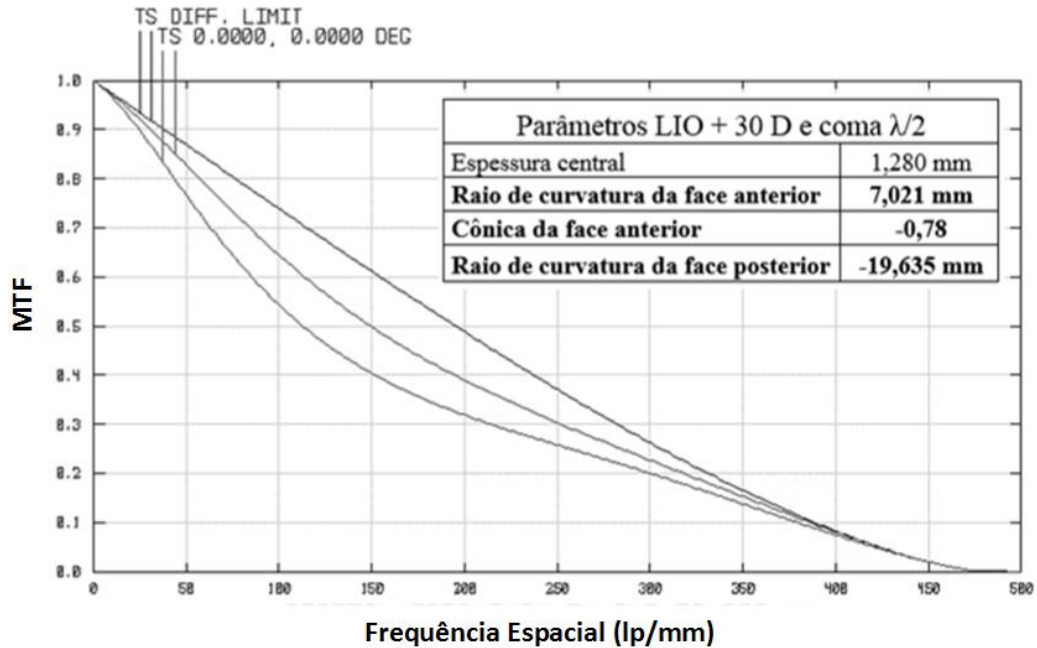


Figura 71 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

A presença de aberração coma na superfície da LIO faz com que o sistema óptico não seja capaz de atingir seu limite de difração. Apesar disso, pode-se notar que o MTF da LIO otimizada atende aos critérios estabelecidos pela norma ISO 11979-2 ( $MTF > 0,43$  para a frequência espacial de 100 pares de linha por milímetro). Tal comportamento também poderá ser notado nas LIOs com amplitude de aberração coma de  $\lambda/8$ ,  $\lambda/14$  e  $\lambda/20$ .

Com o intuito de analisar o quão distante o MTF da LIO se encontra de seu limite de difração é apresentado na Figura 72 o gráfico da diferença dos MTFs sagital e tangencial em relação ao limite de difração.

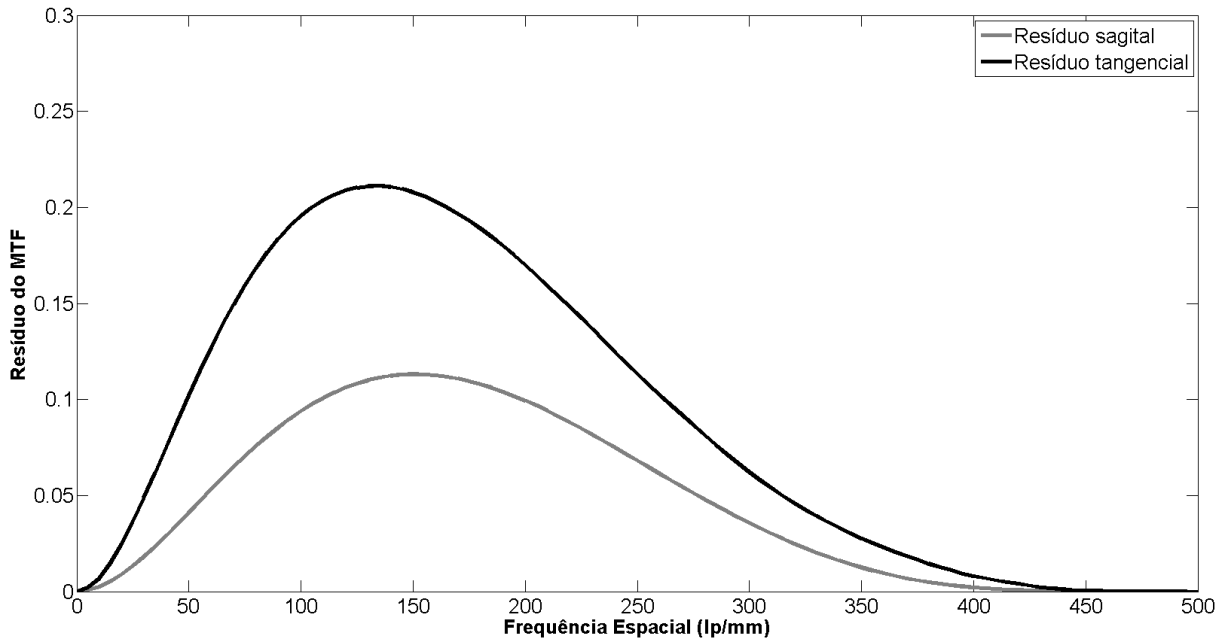


Figura 72 - Diferença entre o MTF sagital e tangencial da LIO de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 72 nota-se que o MTF da LIO em seu eixo sagital é superior ao MTF tangencial sendo o primeiro MTF inferior a 15% e o segundo inferior a 25% do seu limite de difração.

#### 4.1.8 LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/8$

Os parâmetros da LIO ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 73, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.



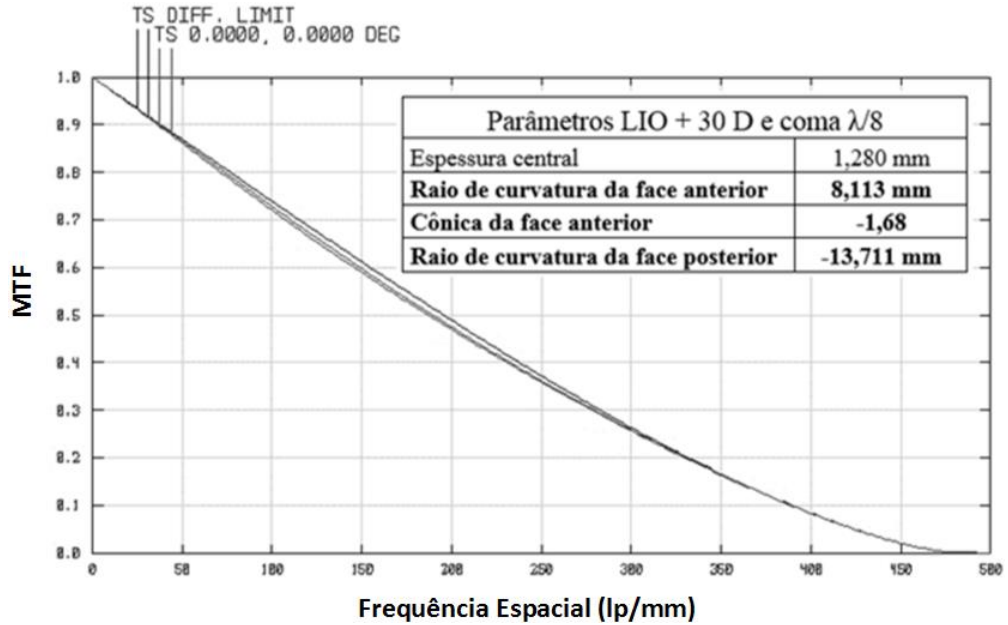


Figura 73 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 30 D e coma  $\lambda/8$  otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 73 pode-se notar que a redução da amplitude de coma fez com que o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II se aproximasse do seu limite de difração em relação ao MTF da Figura 67.

A Figura 74 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

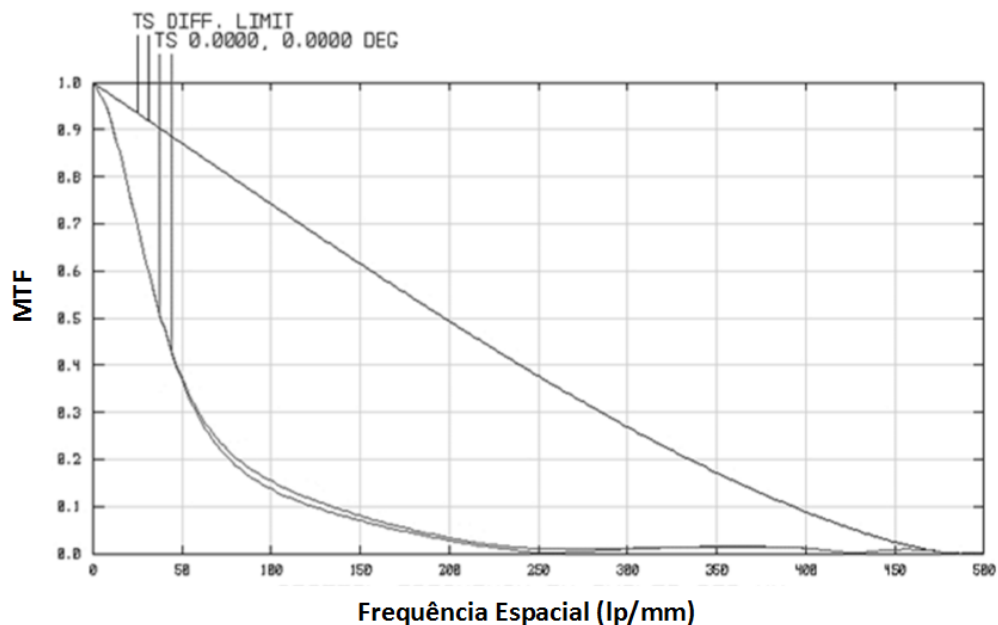


Figura 74 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 75 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 30 D com a presença de aberração coma. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura.

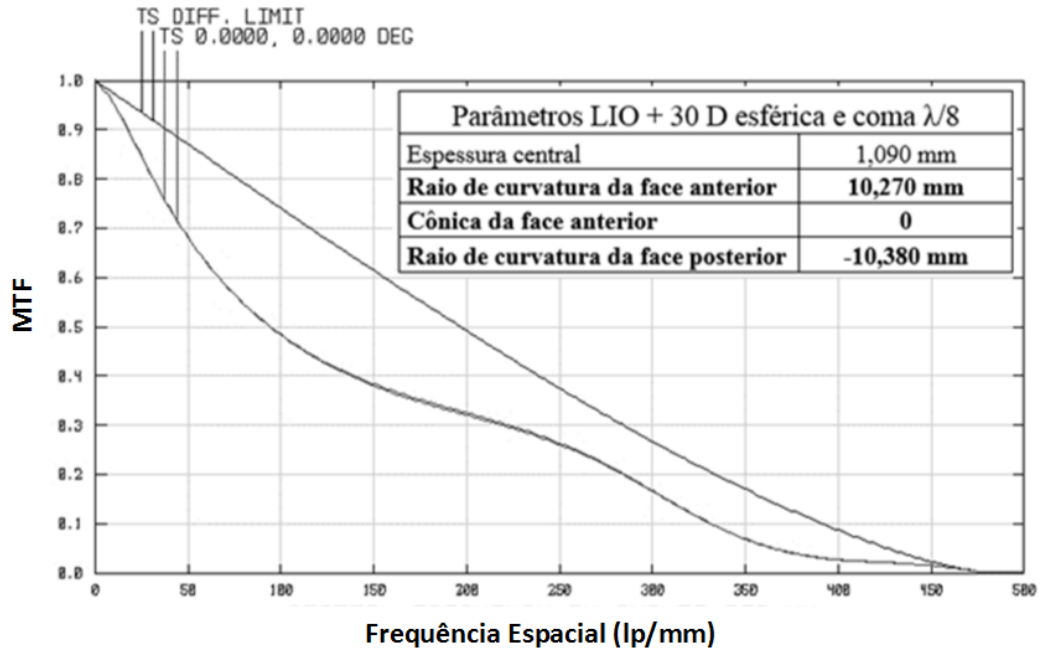


Figura 75 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 76 apresenta o MTF da LIO de + 30 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização estão presentes na Figura 76.

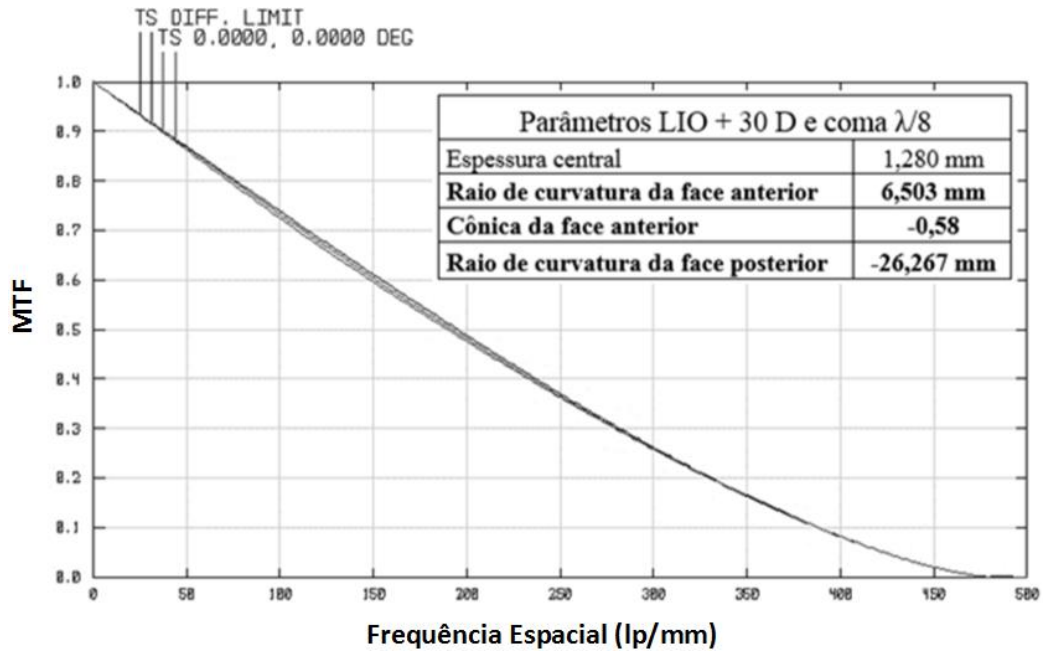


Figura 76 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de analisar o quão distante o MTF da LIO se encontra de seu limite de difração é apresentado na Figura 77 o gráfico da diferença dos MTFs sagital e tangencial em relação ao limite de difração.

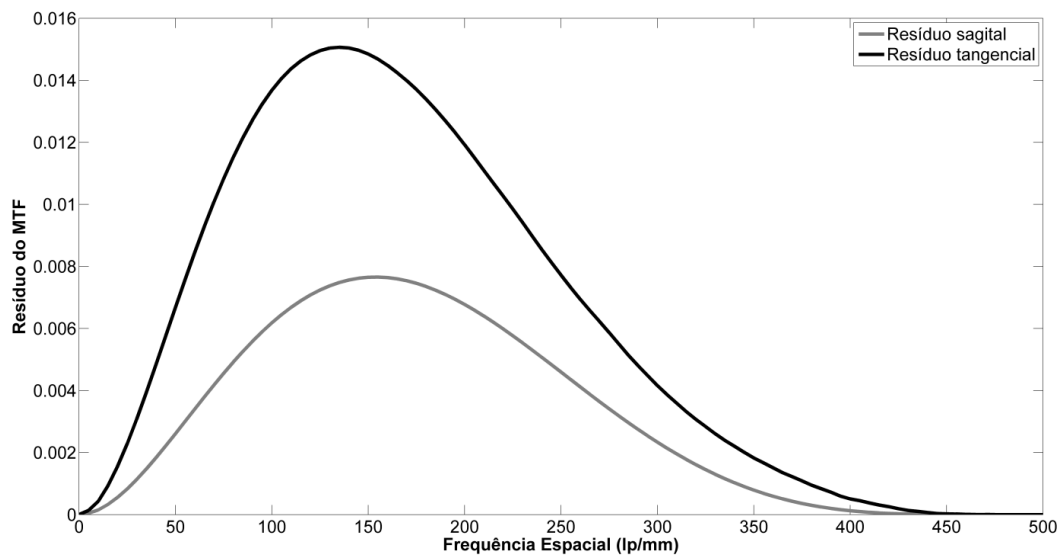


Figura 77 - Diferença entre o MTF sagital e tangencial da LIO de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 77 nota-se que o MTF da LIO em seu eixo sagital é superior ao MTF tangencial sendo o primeiro MTF inferior a 0,8% e o segundo inferior a 1,6% do seu limite de difração.

#### 4.1.9 LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/14$

Os parâmetros da LIO ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 78, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração.

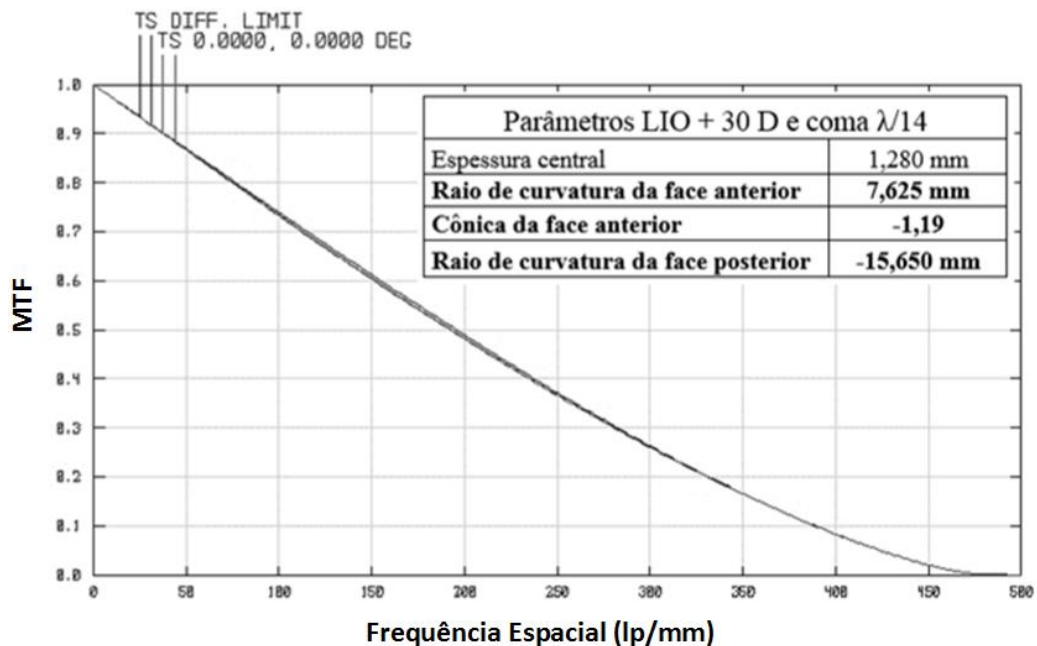


Figura 78 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 30 D e coma  $\lambda/14$  otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 78 pode-se notar que a pequena amplitude de coma fez com que o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II se aproximasse do seu limite de difração.

A Figura 79 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

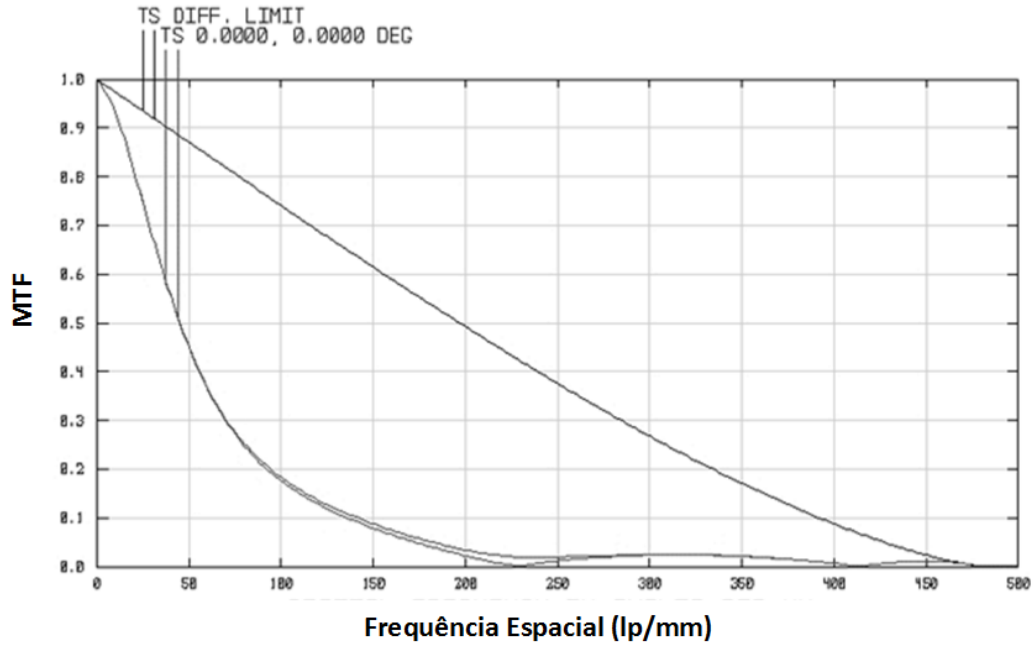


Figura 79 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 80 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 30 D com a presença da aberração coma. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura.

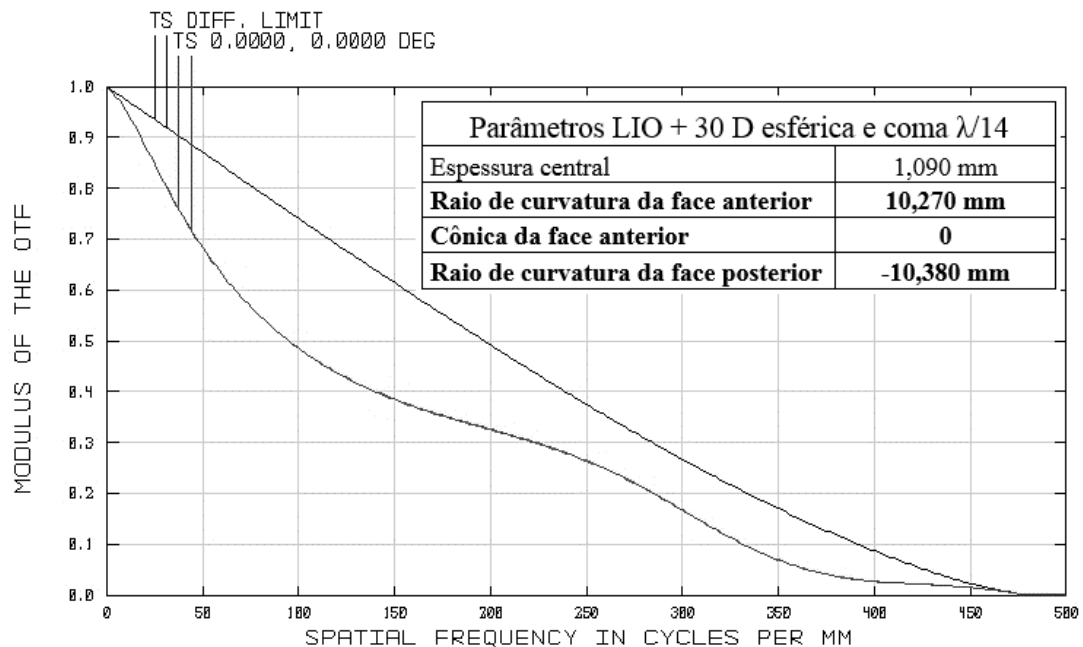


Figura 80 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 81 apresenta o MTF da LIO de + 30 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela

otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização estão presentes na Figura 81.

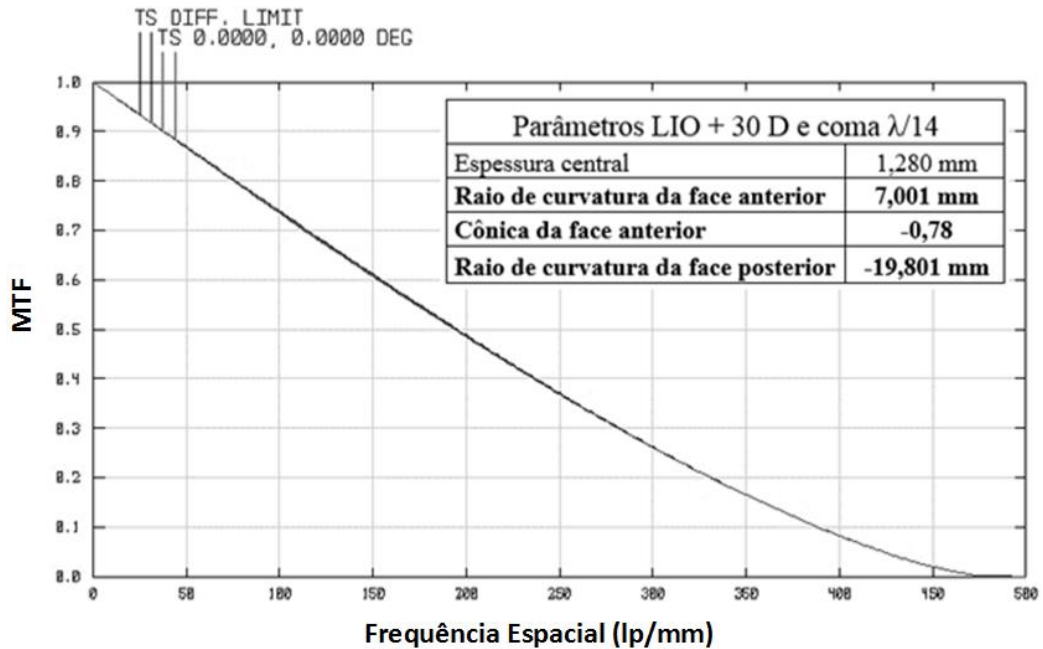


Figura 81 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de analisar o quão distante o MTF da LIO se encontra de seu limite de difração é apresentado na Figura 82 o gráfico da diferença dos MTFs sagital e tangencial em relação ao limite de difração.

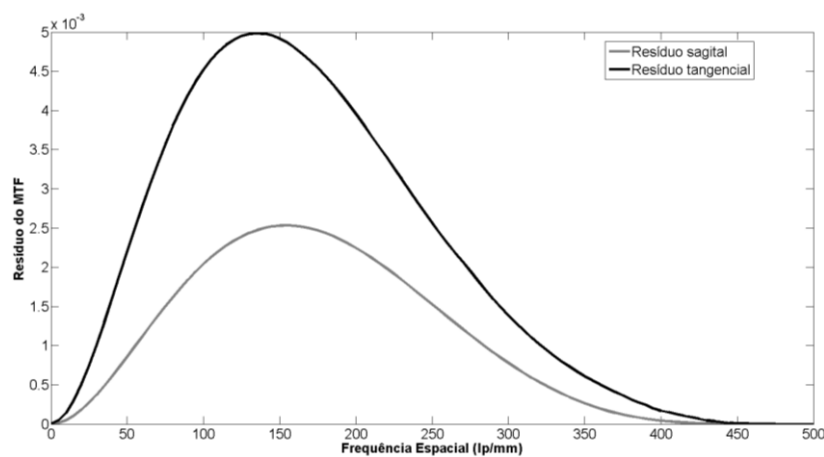


Figura 82 - Diferença entre o MTF sagital e tangencial da LIO de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 82 nota-se que o MTF da LIO em seu eixo sagital é superior ao MTF tangencial sendo o primeiro MTF inferior a 0,3% e o segundo inferior a 0,5% do seu limite de difração.

#### 4.1.10 LIO de + 30 D com amplitude de aberração coma de $\lambda/20$

Os parâmetros da LIO ao final do processo de otimização realizado pelo NSGA-II se encontram na Figura 83, onde os parâmetros otimizados estão destacados em negrito e a mesma figura apresenta o MTF sagital e tangencial encontrado para essa configuração de LIO.

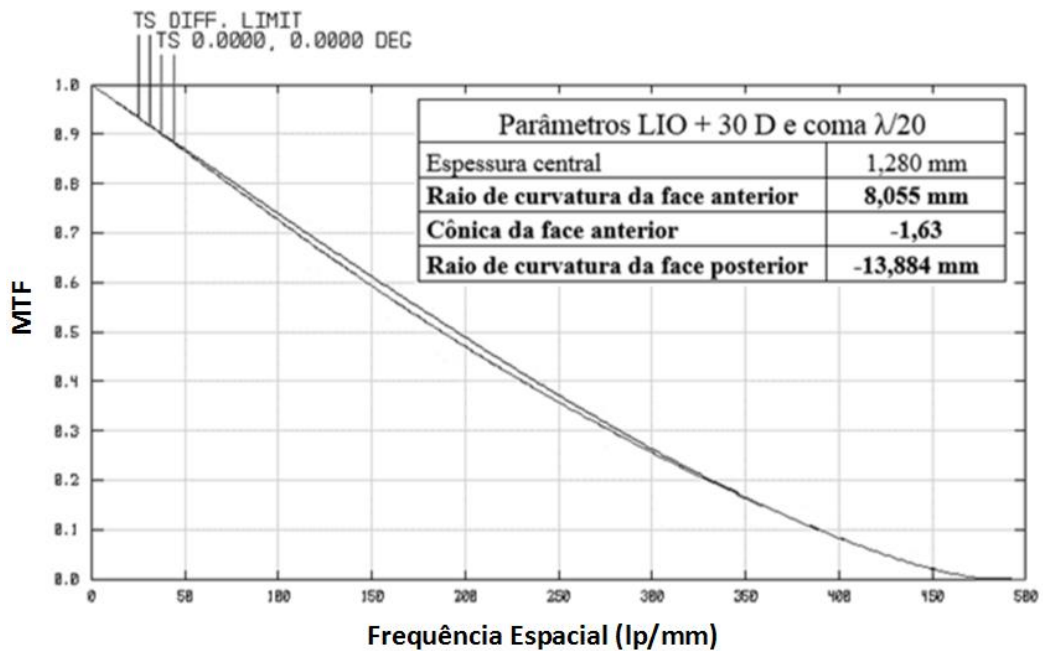


Figura 83 - MTF sagital (S) e tangencial (T) para LIO de + 30 D e coma  $\lambda/20$  otimizada pelo NSGA-II e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 83 pode-se notar que a redução da amplitude de coma fez com que o MTF da LIO otimizada pelo NSGA-II se aproximasse do seu limite de difração.

A Figura 84 apresenta o MTF da LIO otimizada sem sua constante cônica, ou seja, considera-se a LIO modelada apenas com as curvaturas otimizadas e a constante cônica com valor nulo.

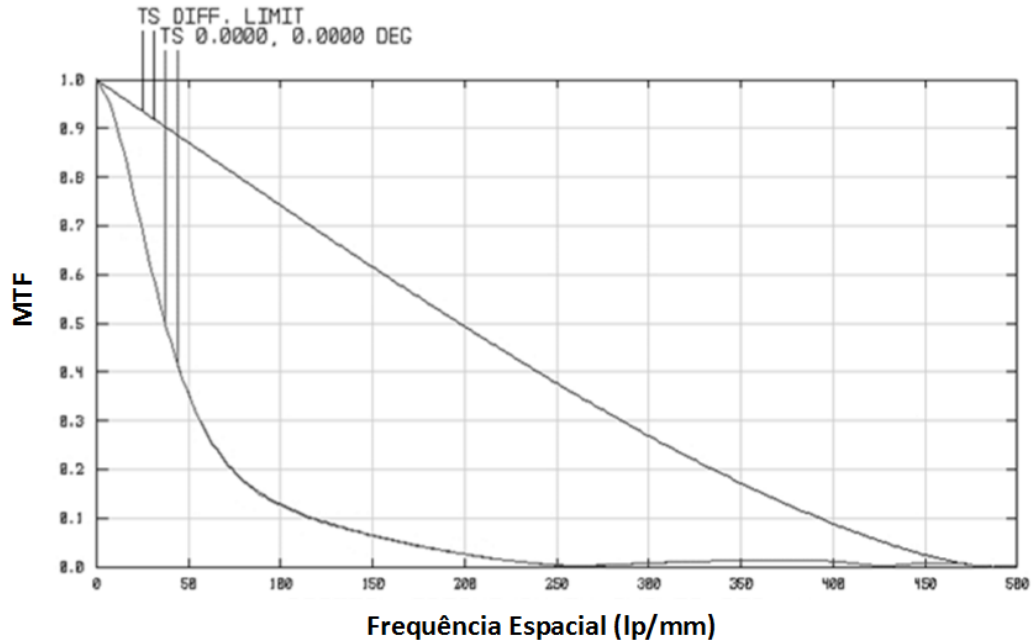


Figura 84 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D otimizada sem cônica e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 85 apresenta o MTF de uma LIO esférica típica de + 30 D com a presença da aberração coma. Os parâmetros referentes a essa LIO estão apresentados na mesma figura.

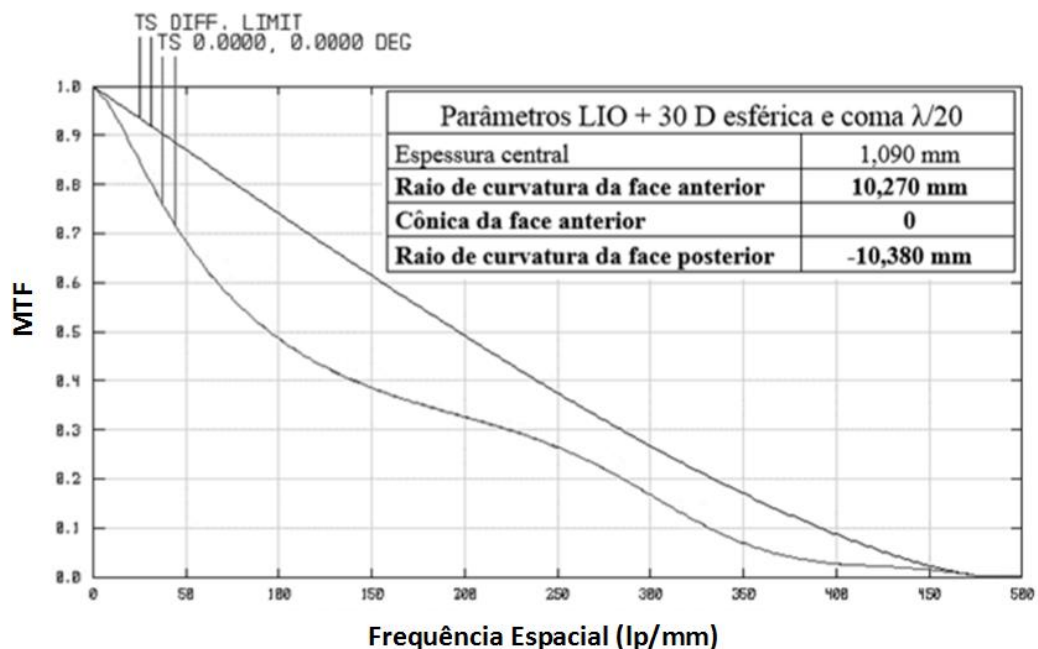


Figura 85 - MTF sagital (S) e tangencial (T) de uma LIO esférica típica de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 86 apresenta o MTF da LIO de + 30 D após o processo de otimização de busca local do Zemax (DLS), que teve como ponto de partida os parâmetros encontrados pela



otimização com o NSGA-II. Os parâmetros encontrados ao final da otimização estão presentes na Figura 86.

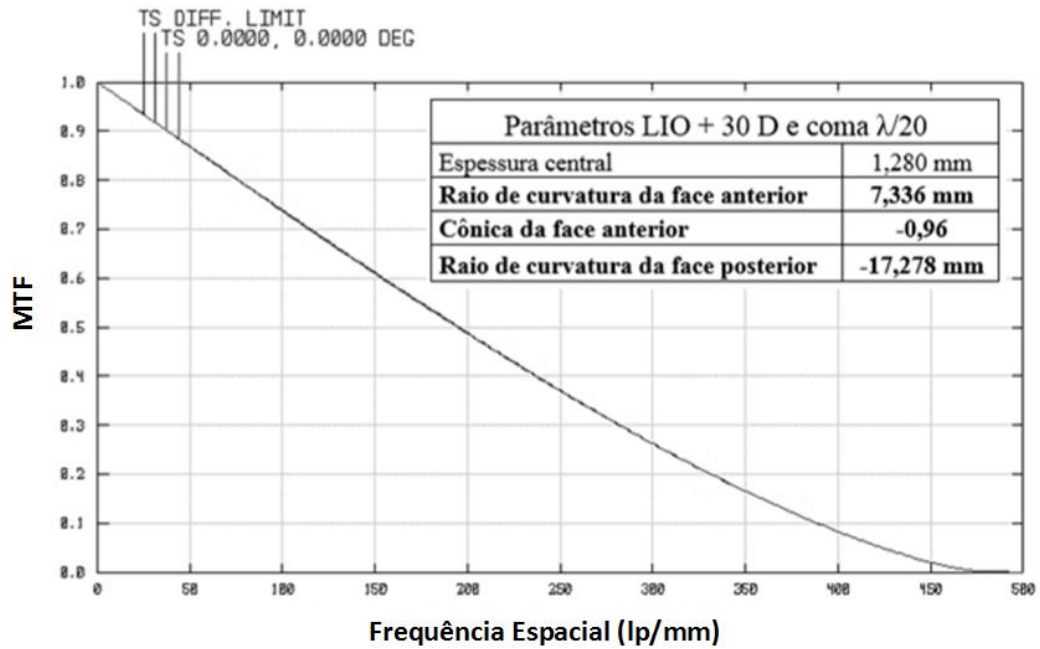


Figura 86 - MTF sagital (S) e tangencial (T) da LIO de + 30 D ao final do processo de otimização de busca local (DLS).

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de analisar o quão distante o MTF da LIO se encontra de seu limite de difração é apresentado na Figura 87 o gráfico da diferença dos MTFs sagital e tangencial em relação ao limite de difração.

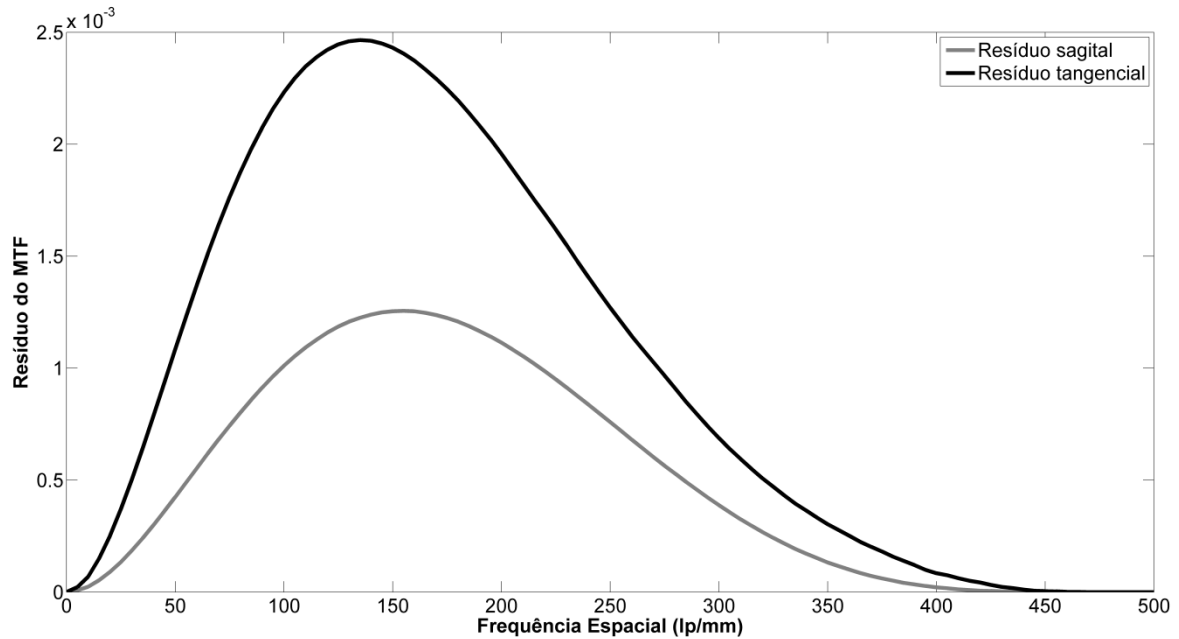


Figura 87 - Diferença entre o MTF sagital e tangencial da LIO de + 30 D e seu limite de difração.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 87 nota-se que o MTF da LIO em seu eixo sagital é superior ao MTF tangencial sendo o primeiro MTF inferior a 0,15% e o segundo inferior a 0,25% do seu limite de difração.

#### 4.1.11 Síntese dos resultados das LIOs monofocais com a presença de aberração coma

A Figura 88 e a Figura 89 apresentam as curvas de MTF tangencial e sagital, respectivamente, referentes às LIOs monofocais de +30 D com aberração coma. Para cada amplitude de aberração foram considerados três tipos de LIOs: a LIO esférica (linhas tracejadas com marcadores triangulares), LIO otimizada a partir do NSGA-II (linhas contínuas) e LIO final otimizada a partir do método DLS (linhas pontilhadas com marcadores circulares).

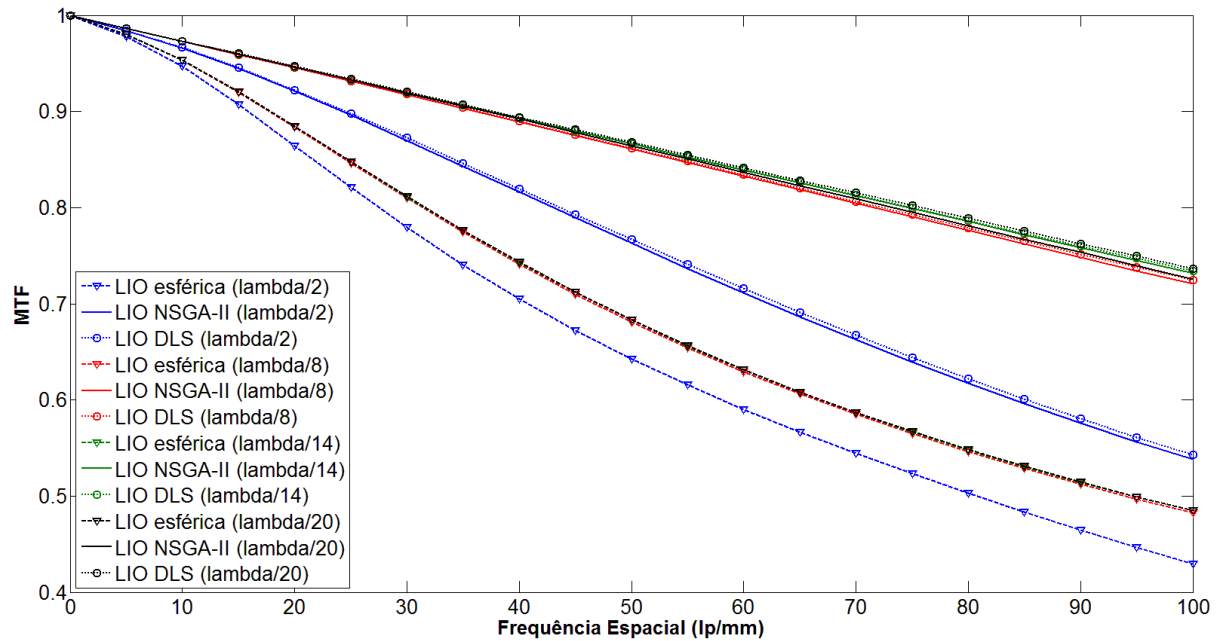


Figura 88 - MTF tangencial das LIOs com a presença de aberração coma.

Fonte: Autoria própria.

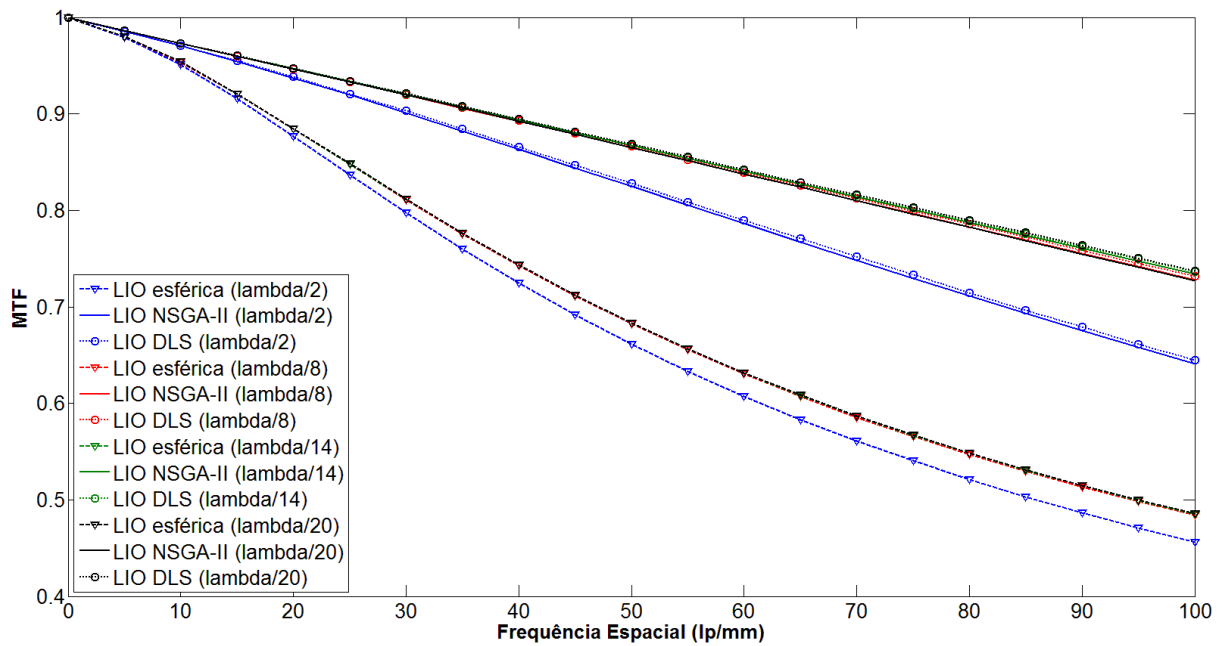


Figura 89 - MTF sagital das LIOs com a presença de aberração coma.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 88 e Figura 89 pode-se notar que as LIOs esféricas apresentam uma grande melhoria em relação ao MTF das LIOs esféricas típicas. Além disso, observa-se que a diferença entre o MTF das LIOs otimizadas pelo NSGA-II e o MTF das LIOs otimizadas pelo DLS a partir do NSGA-II é pequena (menor que 1% para o pior caso). Tal fato comprova que o NSGA-

II foi capaz de encontrar soluções próximas do ótimo global do sistema para todas as LIOs de +30 D otimizadas.

A Figura 90 e a Figura 91 mostram os resíduos sagital e tangencial, respectivamente, entre o limite de difração e o MTF das LIOs com os parâmetros finais otimizados pelo método DLS.

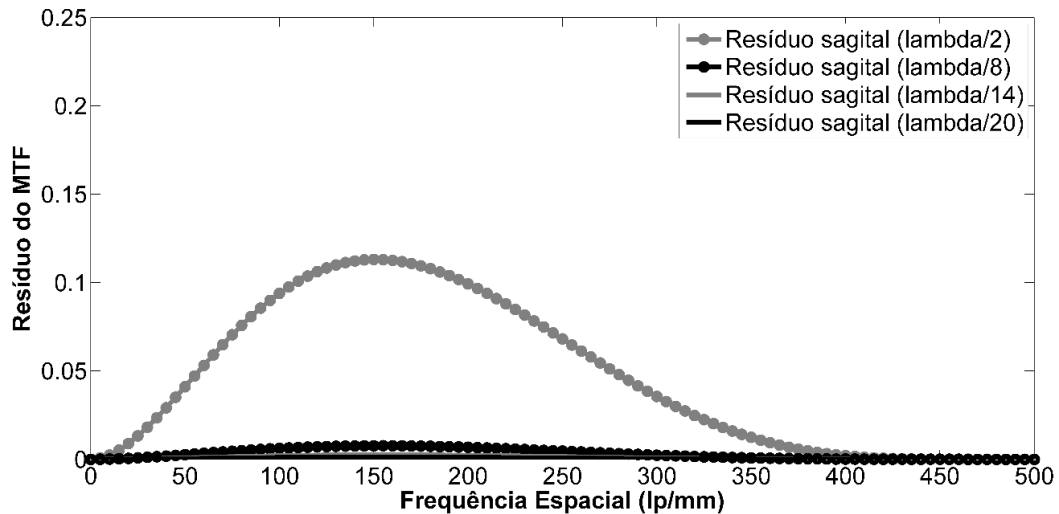


Figura 90 - Resíduo sagital das LIOs com coma otimizadas.

Fonte: Autoria própria.

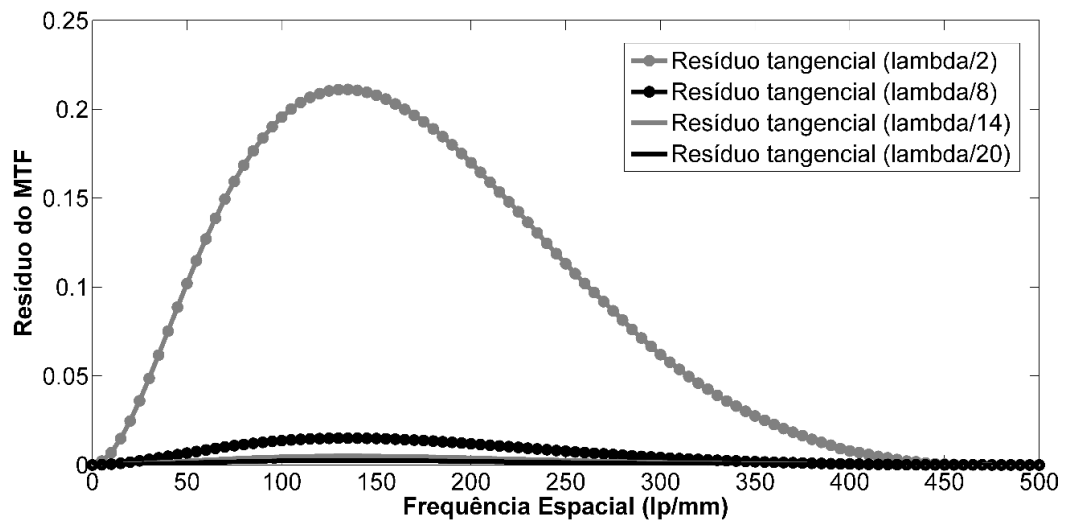


Figura 91 - Resíduo tangencial das LIOs com coma otimizadas.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber pela Figura 90 e Figura 91 que a diferença residual reduz a medida que a amplitude de aberração coma, ou seja, a medida que o desalinhamento do torno, decresce.

Tal resultado já era esperado, pois a distorção na imagem formada pela LIO se torna tanto menor quanto menor for a amplitude das aberrações do sistema óptico.

O Quadro 7 apresenta os parâmetros das LIOs monofocais esféricas típicas e das LIOs esféricas otimizadas pelo método DLS para as LIOs de +30 D com aberração coma.

Quadro 7 - Parâmetros das LIOs monofocais esféricas e esféricas otimizadas com presença de coma.

	Dioptria/ Amplitude da aberração	Espessura Central (mm)	Raio de curvatura da face anterior (mm)	Cônica da face anterior	Raio de curvatura da face posterior (mm)	MTF tan./sag. (100lp/mm)
LIO esférica	30/( $\lambda/2$ )	1,090	10,270	0	-10,380	(0,429/0,456)
LIO esférica	30/( $\lambda/2$ )	1,280	7,021	-0,78	-19,635	(0,543/0,645)
LIO esférica	30/( $\lambda/8$ )	1,090	10,270	0	-10,380	(0,483/0,484)
LIO esférica	30/( $\lambda/8$ )	1,280	6,503	-0,57	-26,267	(0,725/0,732)
LIO esférica	30/( $\lambda/14$ )	1,090	10,270	0	-10,380	(0,485/0,485)
LIO esférica	30/( $\lambda/14$ )	1,280	7,001	-0,77	-19,801	(0,734/0,736)
LIO esférica	30/( $\lambda/20$ )	1,090	10,270	0	-10,380	(0,485/0,485)
LIO esférica	30/( $\lambda/20$ )	1,280	7,336	-0,95	-17,278	(0,736/0,737)

Fonte: Autoria própria.

Pelo Quadro 7 pode-se avaliar quantitativamente que o MTF das LIOs esféricas otimizadas foram superiores ao MTF das LIOs esféricas típicas. Tal diferença torna-se tanto maior quanto maior é a dioptria da LIO, afinal a influência da aberração esférica torna-se mais elevada e essa influência não é corrigida nas LIOs esféricas. Além disso, pode-se notar que para uma amplitude de aberração de  $\lambda/2$  os parâmetros da LIO esférica otimizada são os mesmos da LIO esférica otimizada de + 30 D sem a presença de coma (Quadro 6), ou seja, a LIO monofocal de + 30 D sem distorção otimizada no tópico 4.1.1 já correspondia à LIO com melhor tolerância a um desalinhamento de tal amplitude. À medida que a amplitude de desalinhamento reduz tem-se que os parâmetros de LIO com maior tolerância ao correspondente desalinhamento se alteram conforme indicado no Quadro 4.

#### 4.1.12 Considerações gerais sobre as LIOs monofocais

Pelos resultados apresentados pode-se notar que o algoritmo de busca global (NSGA-II) encontrou configurações de LIOs monofocais que se situavam próximas do ótimo global do

sistema, afinal a diferença máxima entre o MTF das LIOs e seu limite de difração foi sempre inferior a 0,5%. Para algumas dioptrias de LIO (+ 20D e +15 D) o NSGA-II foi capaz de encontrar curvaturas de LIOs esféricas que apresentam desempenho superior ao encontrado em LIOs esféricas comerciais. Além disso, todas as LIOs asféricas otimizadas sem a presença de coma foram capazes de atingir o limite de difração do sistema, apresentando, portanto, desempenho superior ao das LIOs esféricas. Este resultado era esperado, pois a asfericidade da LIO, representada por sua constante cônica, permite a correção da aberração esférica, que é responsável pela degradação do contraste da imagem formada por LIOs esféricas. Quanto ao caso particular das LIOs com presença de coma pode-se notar que não foi possível alcançar o limite de difração do sistema, afinal considerou-se durante as simulações um desalinhamento no torno que seria inerente ao processo de fabricação da LIO. Entretanto, a combinação do processo de otimização de busca global com o processo de busca local do Zemax permitiu encontrar configurações de LIOs que, ainda sob a influência do desalinhamento do torno na confecção de sua superfície, foram capazes de atender os requisitos de qualidade estabelecidos pela norma ISO 11979-2.

#### 4.2 LIO MULTIFOCAL REFRACTIVA

A LIO multifocal refrativa otimizada apresenta 6 regiões refrativas e é responsável pela formação de dois focos principais: um foco distante (com dioptria de + 25 D) e um foco próximo (com dioptria de + 29 D), ou seja, esta LIO apresenta um poder dióptrico adicional<sup>17</sup> de + 4 D. Sua estrutura é apresentada novamente na Figura 92. As regiões 1, 3 e 5 possuem dioptria de + 25 D, ou seja, são responsáveis pelo foco distante e as regiões 2, 4 e 6 possuem dioptria de + 29 D, ou seja, são responsáveis pelo foco próximo.

---

<sup>17</sup> O poder dióptrico adicional de uma LIO multifocal corresponde à diferença de dioptria dos pontos focais criados pela mesma.

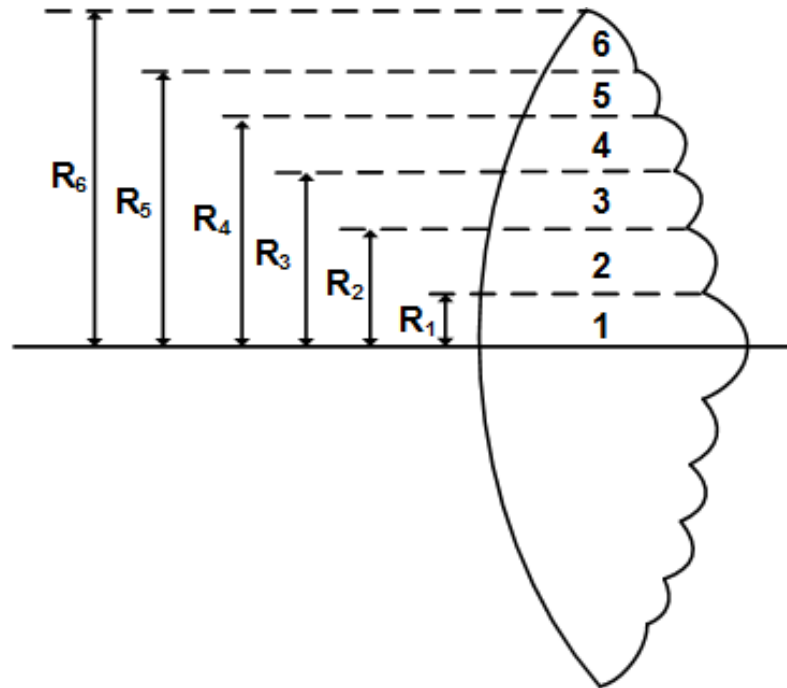


Figura 92 – Topologia da LIOM refrativa otimizada.

Fonte: Autoria própria.

As curvaturas e a constante cônica definida para cada região são apresentadas no Quadro 8 e tais valores foram definidos com base em otimizações realizadas previamente para cada ponto focal.

Quadro 8 – Parâmetros da LIOM refrativa.

Parâmetros da LIO		
	Regiões 1, 3 e 5	Regiões 2, 4 e 6
<b>Espessura central</b>	1,00 mm	
<b>Raio de curvatura da face anterior</b>	10,088 mm	8,025 mm
<b>Cônica da face anterior</b>	-2,388	-1,332
<b>Raio de curvatura da face posterior</b>	-15,894 mm	

Fonte: Autoria própria.

O processo de otimização foi realizado em duas etapas:

- A primeira etapa consiste na otimização das três regiões refrativas ( $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ) que se encontram dentro do raio de 1,5 mm a partir do centro da LIOM. Nesse processo utiliza-se uma abertura de 1,5 mm de raio e considera-se a frequência espacial de 50 pares de linha por milímetro (ISO 11979-9). Para esta situação obteve-se a fronteira de Pareto apresentada na Figura 93. A solução escolhida (indicada na Figura 93) corresponde a

um MTF para o foco distante de 0,3533 e um MTF para o foco próximo de 0,3530, ou seja, a razão entre os MTFs está próxima da unidade.

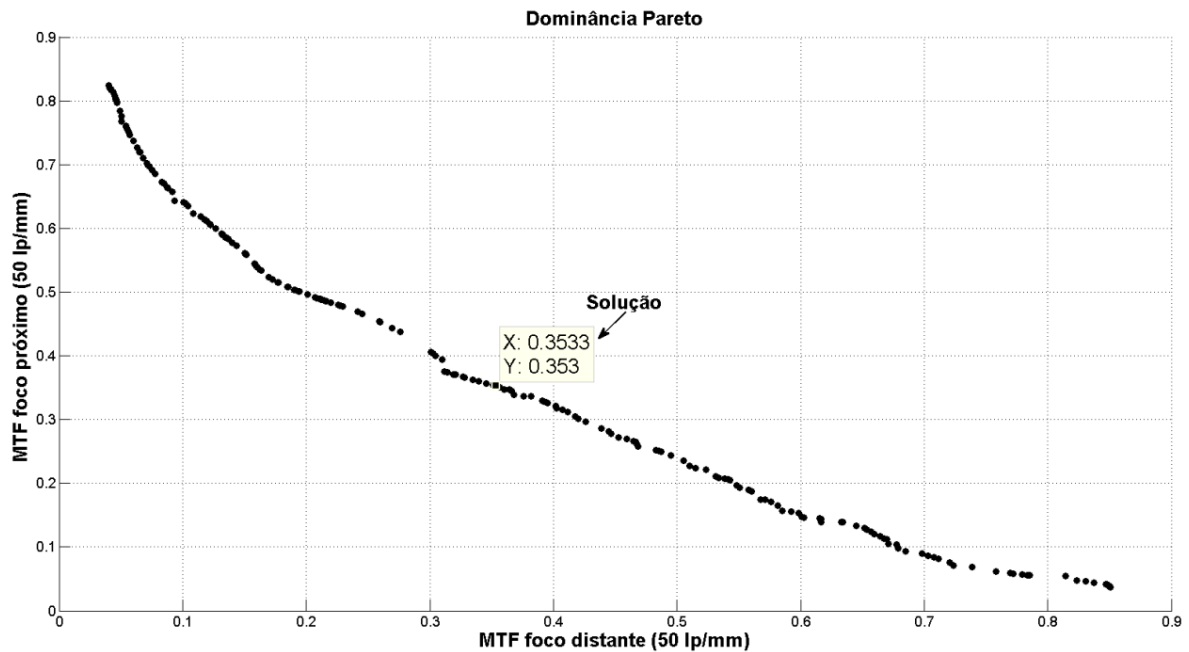


Figura 93 - Fronteira de Pareto das soluções para 1,5 mm de raio do algoritmo genético.

Fonte: Autoria própria.

- A segunda etapa consiste da otimização das regiões refrativas ( $R_4$ ,  $R_5$  e  $R_6$ ) que partem do final da região descrita anteriormente (1,5 mm de raio) até a extremidade da LIO (3,0 mm de raio). Nesse processo utiliza-se uma abertura de 2,5 mm de raio e considera-se a mesma frequência espacial da etapa anterior. Para esta situação obteve-se a fronteira de Pareto apresentada na Figura 94. A solução escolhida (indicada na Figura 94) corresponde a um MTF para o foco distante de 0,3546 e um MTF para o foco próximo de 0,2727, ou seja, a razão entre o MTF do foco distante e do foco próximo está próxima de 1,3.



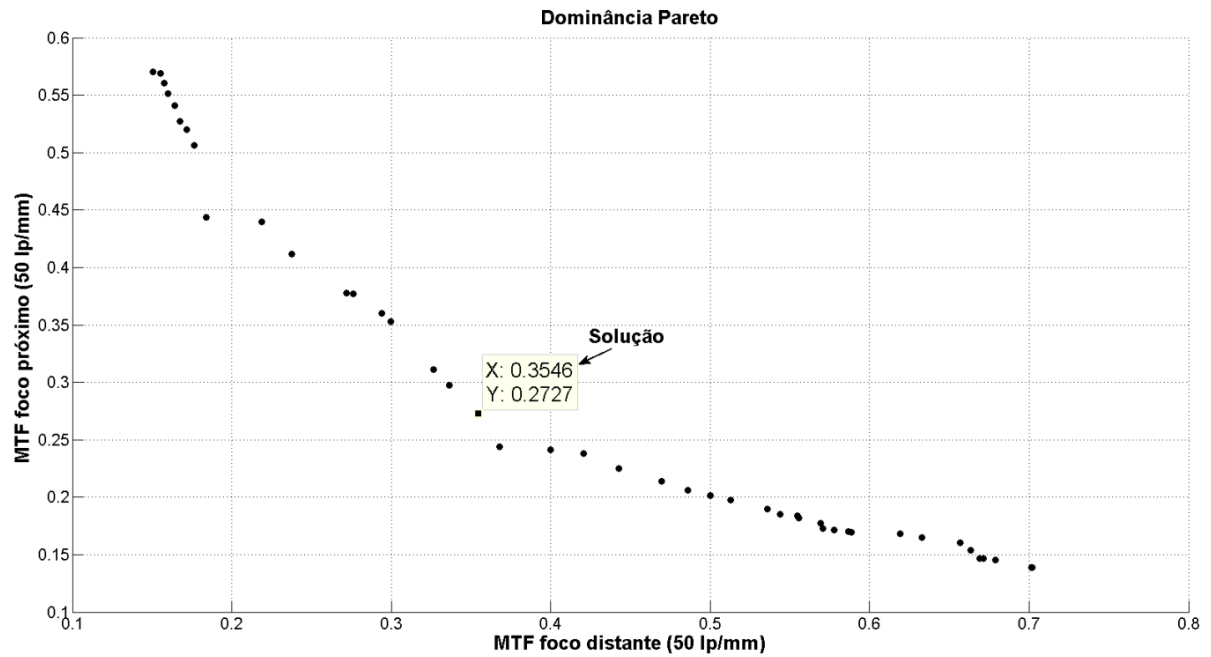


Figura 94 - Fronteira de Pareto das soluções para 3 mm de raio do algoritmo genético.

Fonte: Autoria própria.

O tamanho radial das regiões refrativas correspondentes às soluções selecionadas na Figura 93 e na Figura 94 é apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 – Tamanho das regiões refrativas da LIOM otimizada.

<b>Regiões</b>	<b>Tamanho (mm)</b>
<b>R<sub>1</sub></b>	0,100
<b>R<sub>2</sub></b>	0,933
<b>R<sub>3</sub></b>	1,500
<b>R<sub>4</sub></b>	1,976
<b>R<sub>5</sub></b>	2,780
<b>R<sub>6</sub></b>	3,000

Fonte: Autoria própria.

É apresentada na Figura 95 a distribuição da energia luminosa incidente nos focos criados pela LIOM refrativa em função do raio da pupila. O eixo y do gráfico da Figura 95 está em p.u.<sup>18</sup> e abaixo do gráfico encontra-se esboçado as regiões refrativas do semiplano anterior da LIOM.

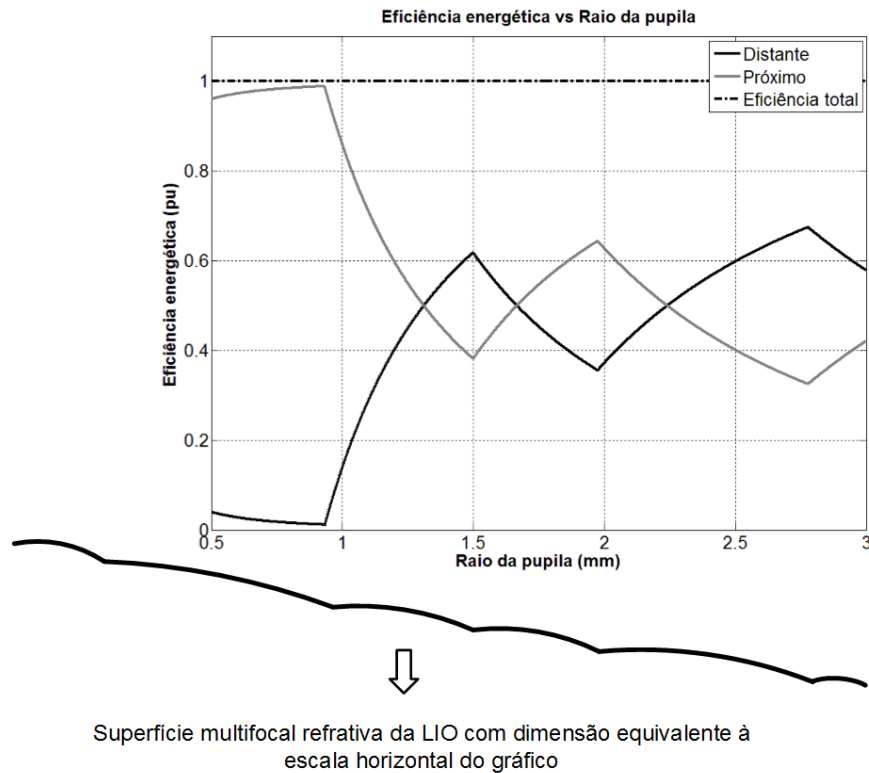


Figura 95 – Eficiência energética VS. Raio da pupila.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar pela Figura 95 que a distribuição luminosa da LIOM se inicia a partir da segunda região refrativa ( $R_2$ ), pois a pupila humana, em geral, não assume valores de abertura inferiores a 0,5 mm de raio (ATCHISON e SMITH, 2002). Além disso, observa-se o seguinte

<sup>18</sup> O sistema "por unidade", ou, mais brevemente, sistema p.u., consiste na definição de valores de base para as grandezas (tensão, corrente, potência etc.), seguida da substituição dos valores das variáveis e constantes (expressas no Sistema Internacional de unidades) pelas suas relações com os valores de base pré-definidos. Para uma grandeza G o valor em p.u. numa base  $G_b$  obtém-se então através da expressão  $G_{pu} = G/G_b$ .

comportamento: a eficiência energética para o foco próximo é elevada até o final da segunda região refrativa ( $R_2$ ), após isso essa eficiência energética é reduzida enquanto a eficiência energética para o foco distante aumenta e este comportamento vai se alternando ao final de cada região refrativa. Tal comportamento já era esperado, pois as regiões refrativas pares priorizam o foco próximo, ou seja, focalizam toda a luz incidente no foco próximo e as regiões refrativas ímpares priorizam o foco distante.

O MTF dos focos distante e próximo é apresentado na Figura 96 e na Figura 97 para aberturas de 1,5 mm e 2,5 mm de raio, respectivamente.

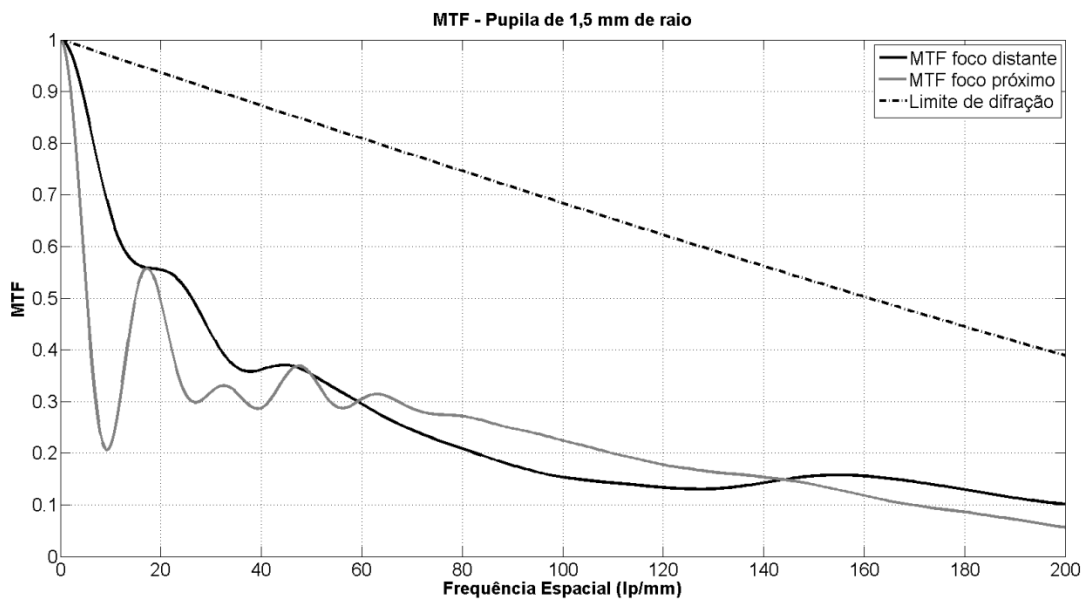


Figura 96 - MTF foco próximo (0,3530) e MTF foco distante (0,3533) ambos para 50 lp/mm.

Fonte: Autoria própria.

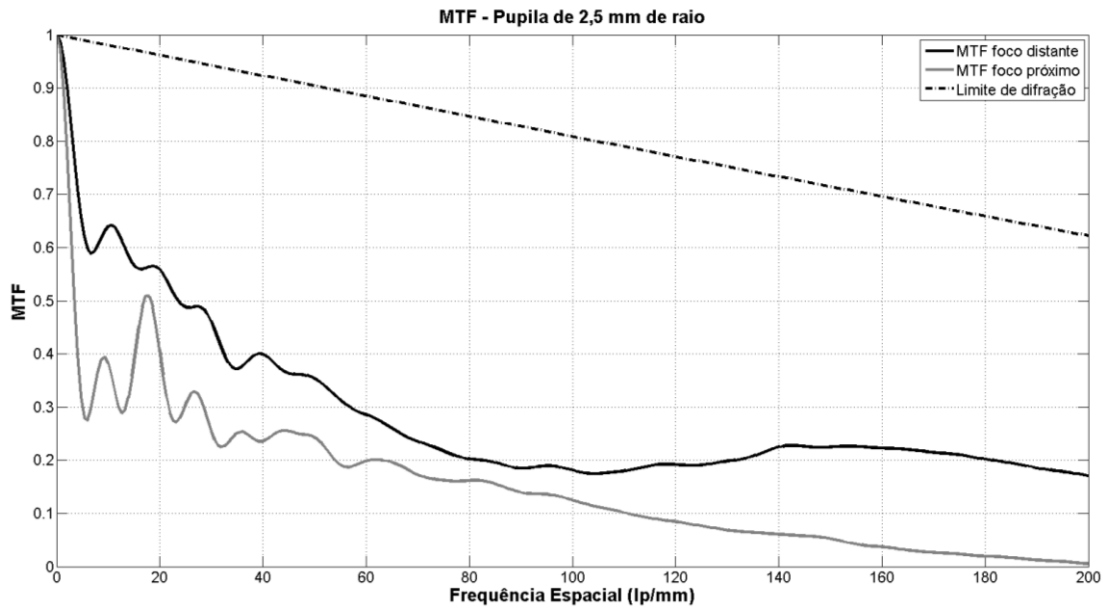


Figura 97 - MTF foco próximo (0,2727) e MTF foco distante (0,3546) ambos para 50 lp/mm.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 96 pode-se notar que o MTF do foco distante apresenta um comportamento que acompanha o MTF do foco próximo, entretanto, este apresenta maior oscilação. Já na Figura 97 o MTF do foco distante apresenta desempenho superior ao MTF do foco próximo para toda a faixa de frequência espacial. Esperava-se este comportamento, pois para abertura de pupila média (1,5 mm de raio) busca-se um bom desempenho de MTF para ambos os focos (distante e próximo) e para abertura de pupila elevada (2,5 mm de raio) busca-se priorizar o MTF do foco distante em detrimento do MTF do foco próximo. A Figura 98 permite uma melhor visualização do desempenho do MTF da LIOM para uma frequência espacial fixa (50 lp/mm) em função da abertura da pupila.

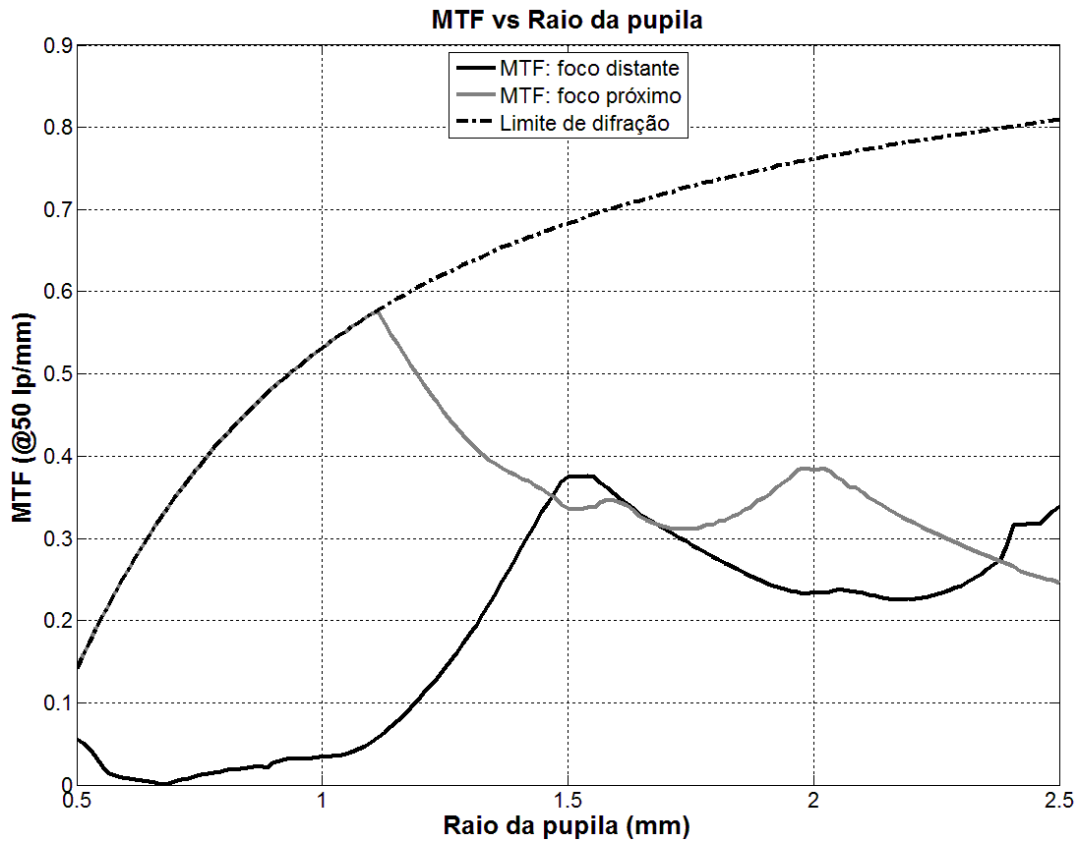


Figura 98 - MTF da LIOM em função do raio da pupila.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 98 que o MTF para o foco próximo está no limite de difração para abertura pequena de pupila, enquanto o MTF do foco distante é baixo. A partir de tamanhos médios de pupila (1,5 mm de raio) até tamanhos grandes de pupila (2,5 mm de raio) observa-se certo equilíbrio entre o MTF de ambos os focos dentro da faixa de MTF de 0,2 a 0,4. Com o intuito de analisar o desempenho do MTF da LIOM nas proximidades de seus focos principais (distante e próximo) em situações onde a imagem formada pela lente se encontraria desfocada é apresentado na Figura 99 e na Figura 100 as curvas de MTF *through focus* para aberturas de pupila de 1,5 mm e 2,5 mm de raio, respectivamente. Ambas as figuras representam no eixo x a dioptria base da LIOM (+ 25 D) como ponto de partida, ou seja, como dioptria 0 D. A partir dela tem-se um foco próximo formado com + 4 D adicionais a essa dioptria base. Dessa forma, tem-se a representação da amplitude do MTF para uma frequência fixa (50 lp/mm) em função de um deslocamento no eixo óptico nas proximidades da faixa de dioptrias em que se formam o foco distante (0D/25D) e o foco próximo (+4D/29D). Pela amplitude do MTF apresentada na Figura 99 e na Figura 100 pode-se notar que a LIOM otimizada privilegia o foco distante (0 D) e o foco próximo (+4 D) e não outros valores intermediários ou fora dessa faixa.

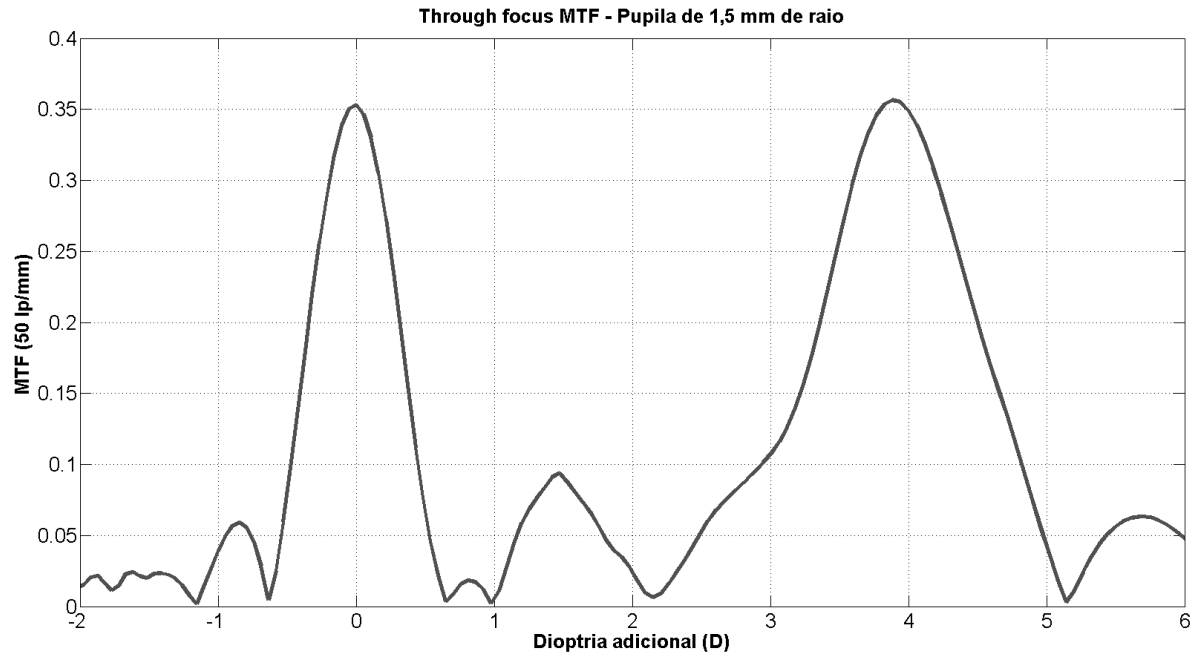


Figura 99 - MTF Through Focus para pupila de 1,5 mm de raio (50 lp/mm).

Fonte: Autoria própria.

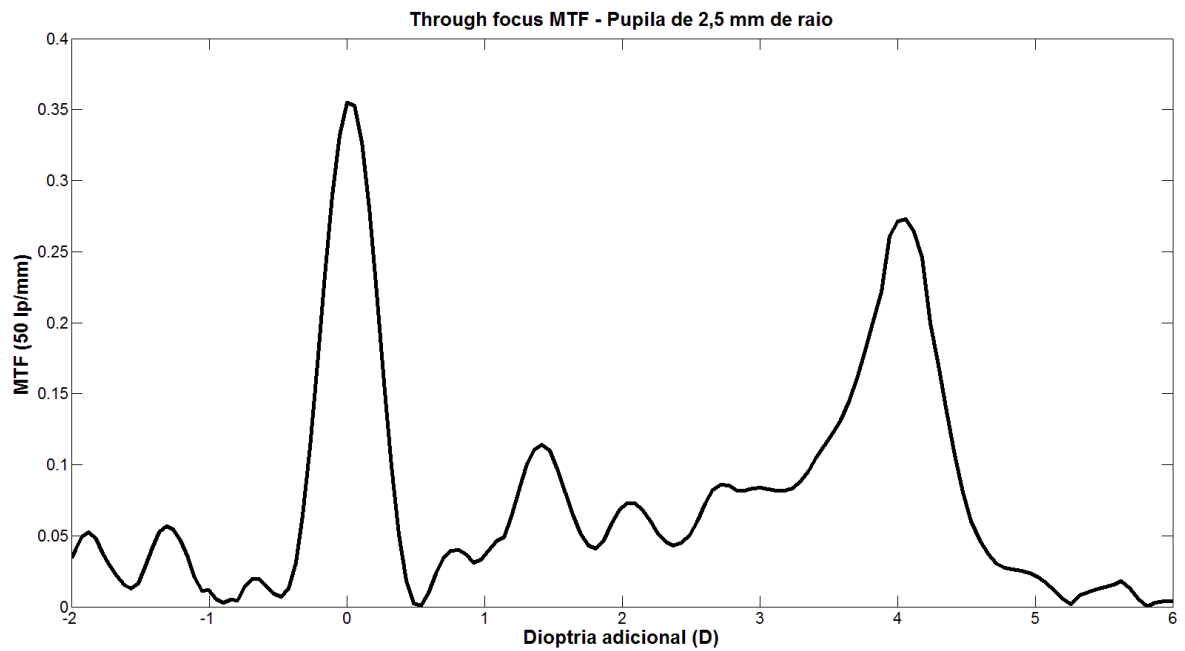


Figura 100 - MTF Through Focus para pupila de 2,5 mm de raio (50 lp/mm).

Fonte: Autoria própria

A Figura 101 e a Figura 102 apresentam a PSF normalizada dos focos distante e próximo para uma abertura de pupila de 1,5 mm e 2,5 mm de raio respectivamente.

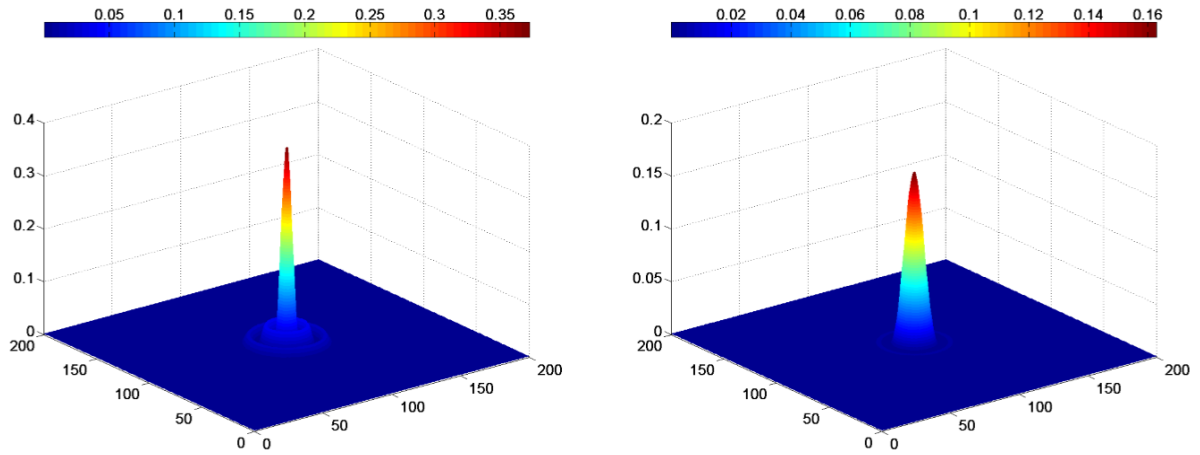


Figura 101 - PSF normalizada em relação ao limite de difração para pupila de 1,5 mm de raio: foco distante (à esquerda) e foco próximo (à direita).

Fonte: Autoria própria

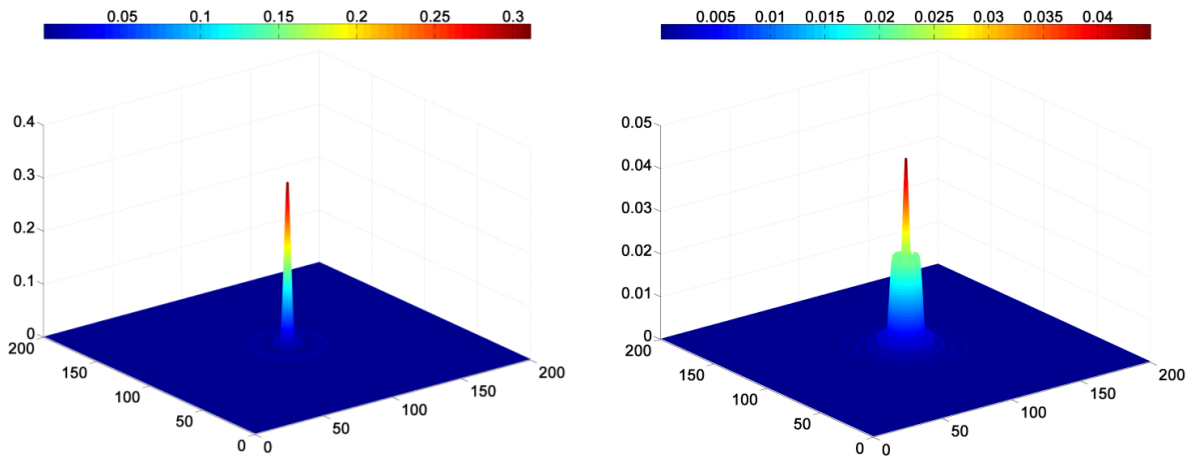


Figura 102 - PSF normalizada em relação ao limite de difração para pupila de 2,5 mm de raio: foco distante (à esquerda) e foco próximo (à direita).

Fonte: Autoria própria

Como a PSF está normalizada tem-se que seu valor de pico corresponde ao *Strehl ratio* do sistema em cada foco e correspondente a cada abertura. O Quadro 10 apresenta os valores de *Strehl ratio* referentes a cada uma das situações indicadas na Figura 101 e na Figura 102.

Quadro 10 – *Strehl ratio* da LIOM refrativa.

	<b>Abertura (raio - mm)</b>	<b>Strehl Ratio</b>
<b>Foco distante</b>	1,5	0,37
	2,5	0,27
<b>Foco próximo</b>	1,5	0,16
	2,5	0,05

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados até aqui para a LIOM refrativa otimizada podem ser avaliados com maior qualidade comparando-os com o desempenho de alguma LIOM comercializada no mercado. A lente ReZoom (Abbott Medical Optics Inc.) é uma LIOM refrativa que apresenta 5 regiões refrativas onde cada região, partindo da mais interna para a mais externa, prioriza os focos: distante, próximo, distante, próximo e distante. Ela apresenta uma dioptria adicional de + 3,5 D e seu material é o PMMA. A Figura 103 e a Figura 104 apresentam os valores de MTF do foco distante e próximo da LIOM ReZoom (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013; EPPIG, SCHOLZ, *et al.*, 2009; MAXWELL, LANE e ZHOU, 2009) e da LIOM otimizada neste trabalho para uma frequência espacial de 50 lp/mm e aberturas de 1,5 mm, 1,9 mm e 2,5 mm de raio.

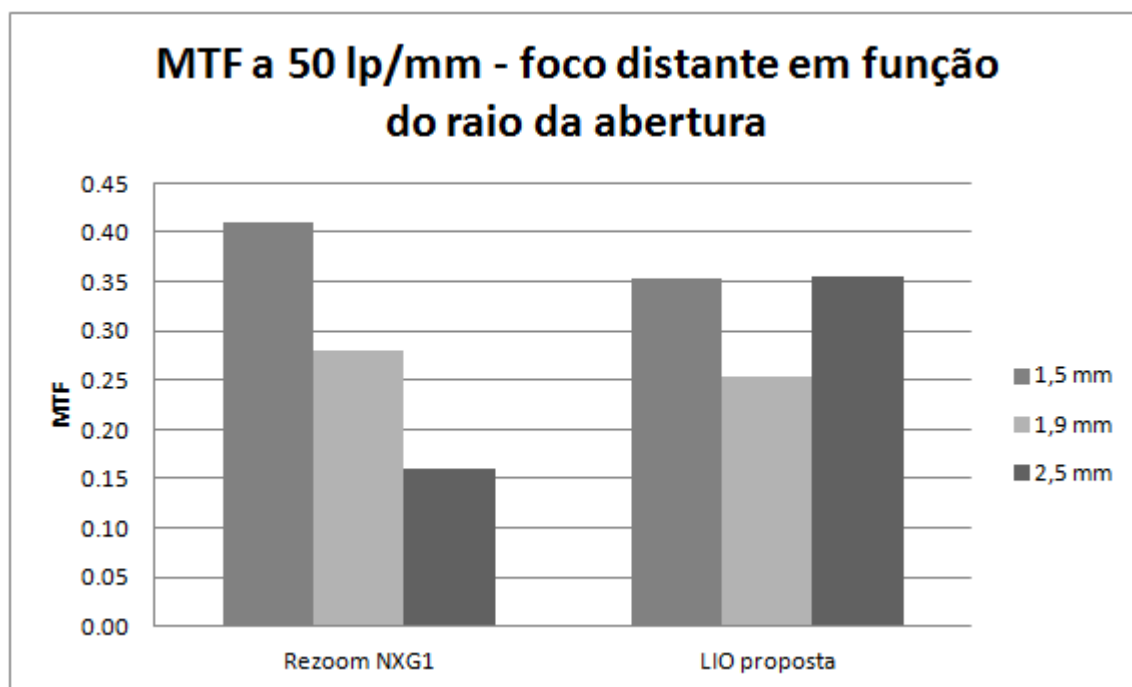


Figura 103 – Comparativo entre a ReZoom e a LIOM proposta – MTF foco distante.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 103 observa-se que o MTF do foco distante da LIOM ReZoom para a abertura de 1,5 mm (MTF = 0,41) e 1,9 mm (MTF = 0,28) de raio é superior ao MTF da LIOM otimizada (MTF = 0,35 e 0,25 respectivamente). Já para a abertura de 2,5 mm de raio o MTF da LIOM otimizada (0,35) é superior ao MTF da ReZoom (0,16). Para as aberturas de 1,5 mm e 1,9 mm de raio tem-se, portanto, que o desempenho do MTF das duas LIOMs é semelhante, apresentando uma diferença máxima de MTF de 0,06 para a abertura de 1,5 mm. Entretanto,



para a abertura de 2,5 mm de raio observa-se uma diferença significativa (maior que o dobro) entre o MTF da LIOM otimizada e o MTF da ReZoom.

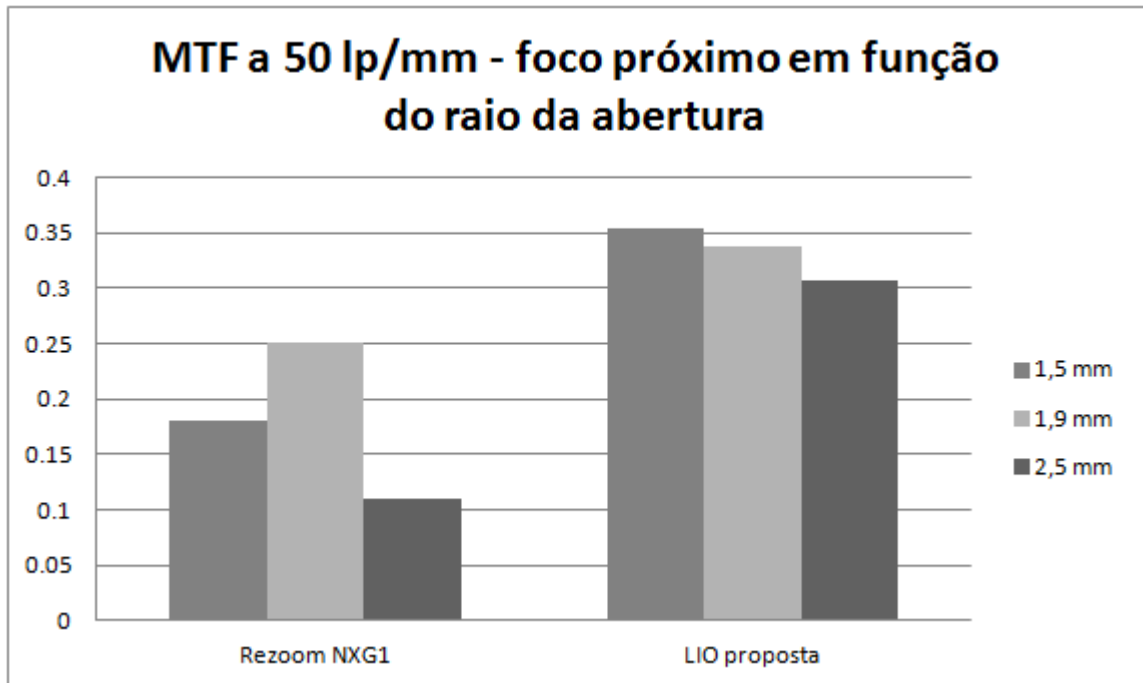


Figura 104 - Comparativo entre a ReZoom e a LIOM proposta – MTF foco próximo.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 104 pode-se notar um desempenho de MTF da LIOM otimizada superior ao MTF da ReZoom em todas as aberturas apresentadas. Além disso, pode-se notar pela Figura 103 e Figura 104 que a diferença entre o MTF do foco distante e próximo para cada abertura apresenta uma magnitude menor para LIOM otimizada em relação à diferença de MTF da ReZoom.

O Quadro 11 apresenta o *strehl ratio* para o foco distante e aberturas de 1,5 mm e 2,5 mm de raio para a LIOM otimizada e para a ReZoom (ORTIZ, ALIÓ, *et al.*, 2007).

Quadro 11 –*Strehl ratio* da LIOM otimizada e da lente ReZoom – foco distante.

	Abertura (raio - mm)	Strehl Ratio
<b>LIOM Otimizada</b>	1,5	0,37
	2,5	0,27
<b>ReZoom</b>	1,5	0,38
	2,5	0,29

Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar pelo Quadro 11 que o *strehl ratio* da LIOM otimizada é pouco inferior ao *strehl ratio* da lente ReZoom e observa-se que a priorização do foco distante em detrimento do foco próximo para grandes aberturas (2,5 mm) em ambas as LIOMs faz com que o *strehl ratio* para o foco distante seja superior ao do foco próximo.

#### 4.2.1 Considerações gerais sobre a LIOM refrativa

A modelagem não sequencial (veja capítulo 3 - seção 3.1) da LIOM refrativa proposta juntamente com a metodologia de otimização empregada permitiu que fosse alcançado um design de LIOM com desempenho em termos de MTF e *strehl ratio* compatíveis com os de LIOMs refrativas comumente comercializadas. A comparação entre a LIOM otimizada neste trabalho foi realizada apenas com a lente ReZoom, pois esta lente é a LIOM refrativa mais conceituada do mercado e, portanto, foi a lente que apresentou maior quantidade de referências com estudos e dados sobre seu desempenho. Tais dados foram essenciais para realizar uma comparação aprofundada com o modelo aqui proposto.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma metodologia para otimização de LIOs (Lentes Intraoculares) monofocais e multifocais modeladas no modo não sequencial do Zemax® com base no algoritmo genético “*Non-dominating Sorting Genetic Algorithm II*” (NSGA-II) implementado em Matlab®. O foco dessa metodologia foi encontrar a região de convergência do ótimo global de LIOs monofocais e avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo algoritmo na otimização de LIOs multifocais, ou seja, buscou-se avaliar a eficiência do emprego do algoritmo NSGA-II na otimização de problemas mono e multiobjetivos relativos à área de óptica aplicada à oftalmologia. Além disso, com o intuito de modelar situações com um viés de aplicação prática buscou-se otimizar LIOs monofocais com distorções em sua superfície de modo a representar possíveis desalinhamentos no torno mecânico responsável pela fabricação das mesmas a partir de pastilhas poliméricas.

Os resultados obtidos indicam que a metodologia empregada foi capaz de encontrar, para toda a faixa de dioptrias mais usualmente utilizada clinicamente, parâmetros de LIOs monofocais que se situavam dentro da região de convergência do ótimo global do sistema, afinal, o emprego subsequente do método determinístico (DLS) presente no Zemax® sobre tais parâmetros permitiu que a solução final alcançasse o limite de difração do sistema. Para as LIOs monofocais com desvios na superfície não foi possível alcançar o limite de difração do sistema (limitação inerente à distorção aplicada na lente), mas as LIOs otimizadas apresentaram qualidade óptica superior ao de LIOs esféricas tipicamente comercializadas. Já para a LIO multifocal refrativa os resultados comprovam que foi possível alcançar um design de lente com desempenho, em termos de MTF e *strehl ratio*, compatível com o de LIOMs refrativas presentes no mercado.

Em síntese a metodologia proposta neste trabalho atendeu os requisitos almejados e, portanto, pode ser empregada como uma ferramenta auxiliar para o usuário do modo não sequencial do Zemax® permitindo que designs ópticos complexos possam ser otimizados.

Contudo é possível sugerir algumas atividades para trabalhos futuros que poderiam enriquecer o conteúdo abordado neste trabalho. Diante disso segue-se algumas sugestões:

- Utilizar outros algoritmos de otimização (SPEA p.e.) para analisar questões como tempo de convergência e qualidade dos resultados obtidos;
- Empregar a metodologia proposta na otimização de LIOMs trifocais;
- Empregar essa metodologia na otimização de LIOMs difrativas;

- Fabricar as LIOs otimizadas e verificar os resultados práticos;
- Implementar uma macro que permita embutir o algoritmo de otimização do Matlab® no próprio software do Zemax®.
- Analisar comparativamente a sensibilidade das LIOs otimizadas em comparação com LIOs comercializadas sob situações de inclinação, descentração e deslocamento axial.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, B. F. C. D. **Uma visão geral do Zemax: Um programa de modelagem e simulação de sistemas ópticos**. INPE. São José dos Campos, p. 27. 2006.

ATCHISON, D.; SMITH, G. **Optics of the Human Eye**. Second. ed. Edinburgh: Elsevier Science, 2002.

BASS, M. Intraocular Lenses. In: \_\_\_\_\_ **Handbook of Optics: Vision and Vision Optics**. Third. ed. New York: McGraw-Hill Professional, v. III, 2010. Cap. 21, p. 28.

BOREMAN, G. D. **Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems**. Washington: SPIE Press, v. TT52, 2001.

CHEN, X.; YAMAMOTO, K. **Genetic algorithm and its application in lens design**. Development in Optical Design and Engineering. [S.l.]: SPIE. 1996. p. 6.

DAVISON, J. A.; SIMPSON, M. J. History and development of the apodized diffractive intraocular lens. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, May 2006. 10.

DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computations**, 6, April 2002. 16.

DERENIAK, E. L.; DERENIAK, T. D. **Geometrical and Trigonometric Optics**. First. ed. Arizona: Cambridge University Press, 2008.

EPPIG, T. et al. Effect of decentration and tilt on the image quality of aspheric intraocular lens designs in a model eye. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 26 January 2009. 10.

FIALA, W. Bi- and Multifocal Intraocular Lenses. **Journal of Emmetropia**, 21 March 2010. 9.

FISCHER, R. E.; TADIC-GALEB, B.; YODER, P. R. **Optical System Design**. Second. ed. [S.l.]: SPIE Press, 2008.

FREEMAN, D. E. L. **Optimisation of Aspheric IOLs**. Kidger Optics Associates. [S.l.], p. 13. 2007.

GATINEL, D. et al. Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2 May 2011. 8.

GATINEL, D.; HOUBRECHTS, Y. Comparision of bifocal and trifocal diffractive and refractive intraocular lenses using an optical bench. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 3 January 2013. 7.

HECHT, E. Fabrication Errors. **Telescope-Optics**, 2006. Disponível em: <<http://www.telescope-optics.net/fabrication.htm>>. Acesso em: 22 Abril 2014.

ISO, I. -. **ISO 11979-2 - Ophthalmic implants - Intraocular lenses - Part 2: Optical properties and test methods**. First edition. 1999.

ISO, I. -. **ISO 11979-7 - Ophthalmic implants - Intraocular lenses - Part 7: Clinical investigations**. Second edition. 2006a.

ISO, I. -. **ISO 11979-9 - Ophthalmic implants - Intraocular lenses - Part 9: Multifocal intraocular lenses**. First edition. 2006b.

JR., L. C. R. et al. Is That Really Your Strehl Ratio. **Advancements in Adaptive Optics**, 25 October 2004. 12.

KRIEGLSTEIN, G. K.; WEINREB, R. N. **Essentials in Ophthalmology: Cataract and Refractive Surgery**. First. ed. New York: Springer , v. Second, 2005.

KUDAEV, S.; SCHREIBER, P. **Automated optimization of non-imaging optics for luminaires**. Optical Design and Engineering II. Jena: SPIE Press. 2005. p. 9.

MALACARA, D.; MALACARA, Z. **Handbook of Optical Design**. Second. ed. León: Marcel Dekker, Inc., 2004.

MATHEN, M. M. Multifocal IOL - An Overview. **Kerala Journal of Ophthalmology**, March 2010. 6.

MAXWELL, W. A.; LANE, S. S.; ZHOU, F. Performance of presbyopia-correcting intraocular lenses in distance optical bench tests. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, January 2009. 8.

MICHAEL, B.; KRONEBERGER, M.; HERMANN, R. **Coupling ray tracers with custom software**. Photonik International. Rednitzhembach, p. 4. 2012.

MING, A. L. S.; CONSTABLE, I. J. **Color Atlas of Ophthalmology**. [S.l.]: World Science, 1995.

MONTÉS-MICÓ, R. et al. Visual Performance with Multifocal Intraocular Lenses: Mesopic Contrast Sensitivity under Distance and Near Conditions. **American Academy of Ophthalmology**, 21 May 2003. 12.

OLIVEIRA, O. G. D. Optimized Microlens-Array Geometry for Hartmann-Shack Wavefront Sensor: Design, Fabrication and Test, Tese (Doutorado em engenharia elétrica), p. 124, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2012.

ONO, I.; KOBAYASHI, S.; YOSHIDA, K. **Global and Multi-objective Optimization for Lens Design by Real-coded Genetic Algorithms**. International Optical Design Conference. [S.l.]: SPIE. 21 September 1998. p. 12.

ONO, I.; KOBAYASHI, S.; YOSHIDA, K. Optimal Lens Design by Real-Coded Genetic Algorithms Using UNDX. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Tokushima, 30 March 1999. 15.

ORTIZ, D. et al. Optical performance of monofocal and multifocal intraocular lenses in the human eye. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 12 December 2007. 8.

O'SHEA, D. C. et al. **Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test**. Washington: SPIE Press, v. TT62, 2004.

RAWER, R. et al. Imaging quality of intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, Berlin, 25 January 2005. 14.

SMITH, W. J. **Modern Optical Engineering**. Fourth. ed. [S.l.]: SPIE Press, 2008.

TAKAHASHI, R. H. C. **Otimização Escalar e Vetorial: Conceitos Preliminares**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 51. 2007a.

TAKAHASHI, R. H. C. **Otimização Escalar e Vetorial: Otimização Vetorial**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 100. 2007b.

THIBAUT, S. et al. **Evolutionary Algorithms Applied to Lens Design: Case Study and Analysis**. Montreal University. Québec, p. 11. 1990.

VASILJEVIC, D. **Classical and Evolutionary Algorithms in the Optimization of Optical Systems**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002.

VRIES, N. E. D. **Multifocal Intraocular Lenses in Cataract Surgery**. Pers Maastricht University. Maastricht, p. 119. 2011.

WILSON, C. N. A Fully Customizable Anatomically Based Model of the Crystalline Lens, Thesis (PhD in Physics), p. 132, University of Ottawa, Faculty of Science. 2011.

ZEMAX. **Zemax User's Guide**. p. 766, 2013.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. **SPEA 2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm**. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Zurich, p. 21. 2001.