

AILTON DE SOUSA BRITO

Engenheiro Eletricista, Modalidade Eletrônica

Universidade de Brasília, 1974

SISTEMA DE FOTORREPETIÇÃO PARA
FABRICAÇÃO DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Campinas da UNICAMP para
a obtenção do título de "Mestre em En
genharia Elétrica".

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ignacio Z.Mammana

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RESUMO

A litografia faz parte de um conjunto de técnicas usadas na fabricação de circuitos integrados.

As técnicas litográficas são genericamente englobadas nas denominações litografia óptica e litografia por feixe de elétrons, das quais a primeira é ainda a mais difundida e melhor estabelecida.

A litografia óptica prevê o uso de máscaras (matrizes finais) obtidas a partir de originais (artes finais) desenhadas em materiais gráficos, Rubylith ou Fotolito. A escala do desenho é ampliada de 100 a 200 vezes em relação ao dispositivo a ser fabricado.

A redução ocorre em duas ou três etapas conhecidas por fotorredução e fotorrepetição, sendo que na última, a configuração é repetida diversas vezes.

Através das matrizes finais, o material fotossensível (fotorresistente) aplicado sobre um substrato pode ser sensibilizado e removido, deixando expostas regiões pré-selecionadas do substrato. Esta etapa é conhecida por fotogravação.

Neste trabalho é descrito o desenvolvimento de uma fotorrepetidora que emprega irradiação de 5460 \AA de comprimento de onda, sensibilizando Placas de Alta Resolução (PAR), em campos de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ e registrando linhas (em PAR) de larguras menores que $2 \mu\text{m}$. São ainda estabelecidos os parâmetros gerais do sistema litográfico, visando o melhor aproveitamento em termos de nível de integração e densidade de "componentes" na integração de circuitos.

A fotorrepetidora e o sistema litográfico têm sido utilizados no laboratório por cerca de dois anos.

Foram determinadas regras de projeto para geração de máscaras e uso do sistema litográfico.

No decorrer do trabalho são descritos e analisados propostas, procedimentos experimentais, resultados obtidos e discussões posteriores.

Aos meus pais, Edésio e Consuelo,
à minha esposa Rosani e minha fi-
lha Cláudia.

AGRADECIMENTOS

- Ao Mammana, pela orientação e oportunidade de realização deste trabalho.
- À Irene e Marilisa pela dedicação na datilografia e composição do texto.
- Ao Alcir e Grecco pelo capricho na confecção das peças mecânicas.
- À Fátima, Hiram e Moacir pelo apoio na realização dos processos.
- Aos demais integrantes do LED, pelo apoio, discussões e amizade, durante todos esses anos.
- À Rosani, Reis, Peter, Manoel, Paulo César, Ricardo e J. Bosco pelo incentivo na reta final.
- À Lúcia, Dodô e J. Luiz, pelos desenhos.
- E a todos que de uma ou de outra forma participaram.

Este trabalho contou com o apoio financeiro das entidades:

TELEBRÁS - Telecomunicações Brasileiras S/A.

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

ÍNDICE

0. INTRODUÇÃO	0.1
1. AS MÁSCARAS E A LITOGRAFIA NA MICROELETRÔNICA	1.1
1.1. A Fotolitografia na Microeletrônica	1.2
1.2. Métodos de Fotogravação	1.3
1.2.1. Sensibilização por Contato ou Proximidade	1.4
1.2.2. Sistemas que usam Projeção Óptica	1.4
1.2.3. Sistemas que usam Feixe Eletrônico	1.5
1.3. Evolução da Litografia	1.6
1.4. A Opção para a Litografia no LED	1.7
2. DESCRIÇÃO E PROPOSIÇÕES DO TRABALHO	2.1
2.1. Propostas do Trabalho e Disponibilidades	2.2
2.2. A Geração de Máscaras para Microeletrônica	2.4
2.2.1. Disposições Gerais e o Problema de Alinhamento	2.4
2.2.2. A Geração de Artes Finais	2.7
2.2.3. A Capacidade do Sistema de Geração de Máscaras - Áreas Mínimas e Maiores Circuitos	2.8
2.2.4. As Marcas de Alinhamento	2.9
2.2.5. Orientação e Contraste de Máscaras	2.12
2.3. Fotorredução	2.13
2.3.1. Relação de Redução e Precisão de Ajuste do Fator R	2.13
2.3.2. Medição do Fator R e Calibração da Fotorredução	2.14
2.3.3. Parâmetros de Sensibilização das PAR, Processos e Erros Associados	2.16
2.3.4. O Erro de Espalhamento de Imagem	2.17
2.4. Processos Associados às Matrizes Intermediárias e Finais	2.20
2.4.1. Sensibilização das PAR na fotorredução	2.21
2.4.2. Sensibilização com a Fotorrepetidora	2.22
3. A FOTORREPETIDORA - CONCEITOS FUNDAMENTAIS E DESENVOLVIMENTO	3.1
3.1. Propriedades Gerais	3.1
3.1.1. Alinhamento, Posicionamento e Erros	3.2
3.1.2. Objetivas: Conceitos e Propriedades Associados	3.2
3.1.3. A Resolução	3.2
3.1.4. Coerência e Interferência - Efeitos na Formação da Imagem	3.4
3.1.5. Profundidade de Foco e de Campo	3.7
3.1.6. A Resolução Útil do SGM	3.8
3.1.7. Cartas de Resolução	3.9
3.2. Caracterização da Estrutura Óptica	3.10
3.2.1. Medição do Comprimento Focal-Modelo Matemático	3.10
3.2.2. Localização dos Planos Principais e Pontos Focais	3.10
3.2.3. Equipamentos e Facilidades Empregados	3.11
3.2.4. Procedimento Experimental - Resultados	3.12
3.2.5. Determinação da Distância Objeto/Imagem para a Fotorrepetidora e Posição Relativa da Objetiva	3.14
3.2.6. O Sistema de Iluminação	3.14
3.2.7. O Sistema de Disparo da Lâmpada	3.19
3.2.8. O Condensador e Lentes	3.23
3.2.9. Procedimentos de Calibração do Sistema de Iluminação	3.25

3.2.10. Resultados Experimentais	3.26
3.2.11. O Sistema de Alinhamento	3.28
3.3. O Sistema de Posicionamento XY	3.32
3.3.1. Construção e Montagem do Sistema	3.35
3.3.2. O Sistema de Focalização	3.36
3.4. A Arquitetura do Sistema	3.36
3.4.1. Planos e Referência - Alinhamento	3.36
4. RESULTADOS GERAIS OBTIDOS	4.1
4.1. A Medição do Fator de Redução	4.1
4.2. Medição da Resolução de Fotorrepetição e Fotografação	4.2
4.3. Medidas do Erro de Posicionamento na Fotorrepetição	4.5
4.3.1. O Método Usado para Caracterizar o Erro de Translação	4.6
4.3.2. O Método Usado para Caracterizar o Erro de Rotação	4.8
4.4. Variação da Densidade Óptica nas PAR	4.11
4.5. Definição dos Parâmetros de Projeto de Máscaras	4.12
5. CONCLUSÕES	5.1
5.1. Críticas e Modificações ao Projeto Inicial	5.2
5.2. O Uso do Sistema	5.4
5.3. Atitudes para Otimização do Projeto de Dispositivos	5.4
5.4. Proposições para Futuro Desenvolvimento	5.5
6. REFERÊNCIAS	6.1
7. APÊNDICES	7.1

INTRODUÇÃO

No início dos anos sessenta foram realizadas as primeiras experiências bem sucedidas no sentido de integrar-se vários "componentes" em um único substrato¹. Considera-se aí o princípio da era da microeletrônica que em duas décadas viria revolucionar a informática, a indústria de uma maneira geral e até os próprios hábitos sociais.

O vertiginoso desenvolvimento nesse campo deixou, em termos tecnológicos, uma lacuna ainda maior entre os principais centros de desenvolvimento e os demais países do mundo?²

Os principais acontecimentos mundiais, nesse tempo, a exemplo daqueles induzidos pela Revolução Industrial ocorrida na indústria mecânica com o invento da máquina a vapor, mostram a estreita correlação entre a capacidade da economia de um país e seus esforços tecnológicos.

Para minimizar as pressões econômicas decorrentes da dependência tecnológica, uma opção é fomentar o desenvolvimento tecnológico.

Esse desenvolvimento, em virtude da grande inércia de um sistema social, deve ser abrangente, simultâneo e harmônico em relação as vocações culturais, objetivos nacionais e a atual capacitação técnico-científica, para que seja auto-sustentável.

A implantação de uma capacitação-tecnológica, tomando-se como elemento central a microeletrônica, corresponde a um poderoso veículo para o desenvolvimento industrial - econômico - em virtude da presença definitiva dos seus produtos e sub-produtos em todos os segmentos da atividade humana e pelo seu caráter multidisciplinar.

No Brasil, os primeiros ensaios para a implantação de uma capacitação tecnológica em micro-eletrônica datam dos últimos anos sessenta.

A concretização dessa tarefa exige mais que "saber projetar" dispositivos e adquirir materiais, equipamentos e tecnologias necessários no mercado externo, mas é preciso procurar desenvolver todas as etapas com os meios locais. Para isto, uma maneira é criar núcleos de capacitação de pessoal que possam atuar nas diversas áreas, desenvolvendo um trabalho de tecnologia de base, com aptidão para gerar e adaptar processos, desenvolver os equipamentos que executam os processos, aproveitando ao máximo e cada vez mais as facilidades locais.^{3,4}

Uma política coordenada pode viabilizar a médio ou curto prazo o desenvolvimento de uma tecnologia própria, capaz de se manter e evoluir segundo as necessidades, disponibilidades e convicções.

O Laboratório de Eletrônica e Dispositivos (LED) da UNICAMP foi criado com o objetivo de desempenhar um papel dentro desse contexto, tendo como principais diretrizes a formação de pessoal para gerar tecnologias no campo de projeto de microcircuitos e dispositivos semicondutores, desenvolvimento de equipamentos para uso nos processos associados e para medições, fabricação de dispositivos e implantação de um sistema de projetos e construção de circuitos integrados.

O presente trabalho foi definido no panorama de implantação do LED e se localiza no segmento do sistema que se destina a geração e fabricação de máscaras e o seu uso em fotografação. Tem como objetivos o projeto e construção de uma fotore-

petidora - protótipo - que será usada na obtenção de imagens fotorrepetida, de uma máscara na escala 1:1 em relação as dimensões do dispositivo, bem como a definição dos parâmetros básicos do projeto de máscaras e da fotogração.

As condições de contorno para o desenvolvimento do trabalho estão baseadas na compatibilidade das diversas etapas interrelacionadas da atividade, nas características de equipamentos e componentes essenciais disponíveis no início do trabalho, oportunamente mencionadas e de um modo geral nas propostas do Laboratório.

CAPÍTULO I

AS MÁSCARAS E A LITOGRAFIA NA MICRO-ELETRÔNICA

Na fabricação de microcircuitos estão envolvidos o emprego de processos físico-químicos tais como oxidação, difusão, ataques químicos em regiões bem de finidas de um substrato.⁵

Uma maneira possível de viabilizar tais etapas no domínio de dimensões da microeletrônica é através do uso da litografia.

A litografia é uma técnica que, na sua origem - fim do século XVIII - empregavam-se para o transporte de tintas, placas de pedra nas quais as áreas de impressão eram selecionadas pela repulsão entre graxas não solúveis em água e as tintas. Os primeiros materiais usados eram à base de carboidratos.⁶

A evolução da litografia teve um marco importante a partir da descoberta em 1840 por Becquerel de substâncias que modificavam suas propriedades físico-químicas quando sensibilizadas pela luz. Rapidamente o emprego de tais substâncias foi se difundindo na litografia. Receberam a denominação de fotorresiste, e o método de gravação associado, fotolitografia:

Os fotorresistes se caracterizam pelas propriedades de formarem filmes aderentes a substratos, serem eliminados pela ação de algum solvente específico quando não sensibilizados por alguma irradiação (resistes negativos) e por apresentarem alta resistência aos agentes dos processos a serem aplicados nas regiões selecionadas do substrato, porém, removíveis após a aplicação, quando for desejado.

Destacam-se três fases importantes na evolução dos fotorresistes. A dos colóides sintetizados à base de cinamato e a dos filmes secos. A fig. 1.1 sintetiza essa evolução.

1.1. A Fotolitografia na Micro-eletrônica

A fig.1.2 sintetiza a aplicação do processo litográfico na micro eletrônica, que consiste em cobrir o substrato com uma película de fotoresiste e expor o conjunto a uma radiação específica através de máscara cujo desenho localiza regiões que devem sofrer ação do processo a ser aplicado. Se o resiste é do tipo negativo, sofrerá polimerização nas regiões sensibilizadas, tornando-se resistente à ação do solvente, se o resiste é positivo, a estrutura molecular é alterada nessas regiões, reduzindo sua resistência ao solvente.

Pela aplicação dos solventes específicos, delinea-se as regiões descobertas e protegidas por fotoresiste em um substrato.

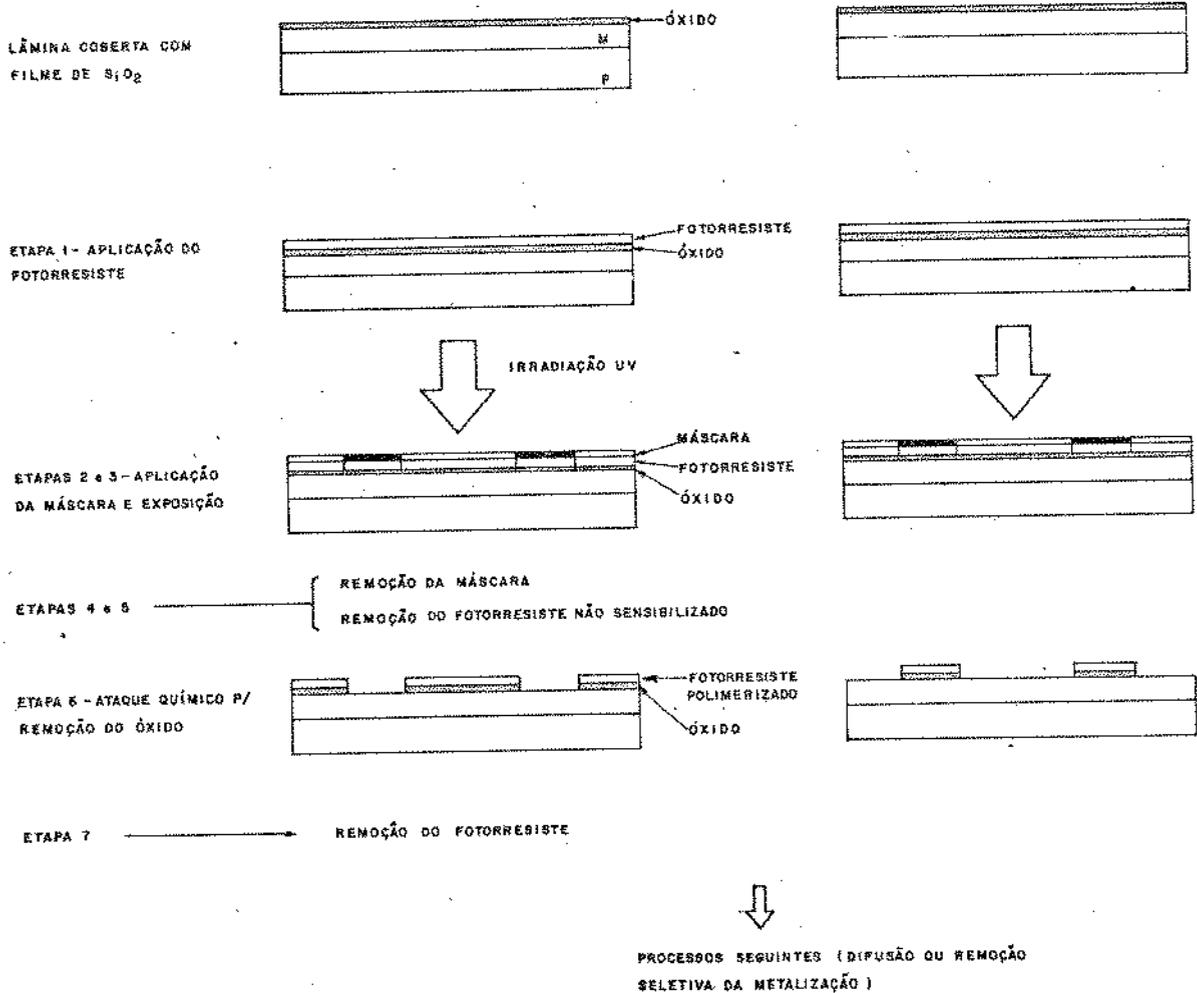


Figura 1.2 - O processo litográfico com fotoresiste.

A fotolitografia foi inicialmente aplicada no campo da eletrônica para confecção de circuitos impressos, no início da década de 40.

Com a evolução das técnicas fotográficas, principalmente com o desenvolvimento de objetivas de alta resolução e os novos fotorresistes, a fotolitografia passou a desempenhar um papel fundamental na fabricação de dispositivos semicondutores.

Com a redução gradativa das dimensões das configurações possíveis de serem gravadas, a complexidade funcional dos circuitos puderam crescer enormemente, determinando perspectivas cada vez mais amplas para a eletrônica⁷.

A combinação de técnicas fotográficas de alto contraste para a geração de máscaras com a fotolitografia, permitiu o surgimento da técnica planar para fabricação de dispositivos semicondutores e, a partir desta, em torno de 1960 foram fabricados os primeiros circuitos integrados monolíticos composto de vários (até dezenas) "componentes".

Para explorar a capacitação potencial então emergente, grandes esforços foram desenvolvidos nas técnicas de projeto, processos e projeto assistido por computador que, ao realimentarem as tecnologias de fabricação, estimulavam a fotolitografia a reduzir ainda mais as dimensões mínimas de gravação.

Em aproximadamente 20 anos a evolução culminou em níveis de integração em muito alta escala (VLSI) onde pode-se ter centenas de milhares de "componentes" em uma única pastilha⁷.

Os esforços atuais no campo da litografia estão direcionados para o desenvolvimento de resistes sensíveis a radiações de comprimento de onda cada vez menores além de novos processos de sensibilização destacando-se o uso de raios-X e de feixe de elétrons.^{8,9,10}

1.2. Métodos de fotogração

Vários métodos são utilizados atualmente para gravar configurações em filmes sobre um substrato, os quais podem ser genericamente englobados nos seguintes grupos:

- a) Sensibilização por contato ou proximidade, com radiações de pequeno comprimento de onda, UV monocromática, di ou tricromática e raios-X.
- b) Projeção óptica com repetição passo a passo da imagem completa ou varredura.
- c) Sistema de feixes eletrônicos.

Os métodos relacionados com a litografia óptica são os que se acham melhor estabelecidos e difundidos na microeletrônica pela comprovada viabilidade técnica e econômica.^{8,12}

Nesse caso as máscaras (matrizes finais) são obtidas por reduções fotográficas em alto contraste, partindo-se de originais (artes finais) confeccionados em escala ampliada, sendo a sensibilização realizada por algum dos métodos a ou b acima citados.

1.2.1. Sensibilização por Contato ou Proximidade

A fig. 1.3 condensa os princípios funcionais de tais métodos, que consiste em incidir um feixe luminoso colimado na máscara em contato ou ligeiramente fora de contato com o fotorresiste. É simples em princípio, bem como o é, em termos relativos, a instrumentação e as facilidades requeridas. A resolução é limitada pelos efeitos de difração e das condições de propagação da luz no sistema fotorresiste/óxido/substrato¹¹, cujos efeitos podem ser minimizados reduzindo-se o comprimento de onda e a espessura do fotorresiste até o limite de surgimento de defeitos. Atualmente, os limites alcançados a menor largura de linha gravada em fotorresiste por esses métodos são no primeiro caso aproximadamente 2 μ m e na segunda, 7 a 8 μ m.

A resolução útil final da fotogração depende da espessura do filme de SiO₂. Os sistemas ora em uso operam na faixa de 4 a 8 μ m.

Nas aplicações industriais é considerada a vida útil das máscaras que é reduzida pelo contato com o fotorresiste. Isto é contornado em parte gerando-se máscaras metálicas que são mecanicamente mais resistentes (filmes de crômio ou óxido de ferro sobre vidro), ou, com prejuízos à resolução, manter uma pequena separação entre máscara e fotorresiste.



Figura 1.3 - Sensibilização de fotorresiste.

1.2.2. Sistemas que usam Projeção Óptica

Na tentativa de eliminar o contato máscara/fotorresiste, sem com - promover a capacidade de resolução do sistema óptico foi criado o sistema de projeção óptica diretamente sobre a lâmina¹³, como esquematizado na fig. 1.4. Devido a irregularidade nas espessuras das lâminas o sistema é consideravelmente mais complexo pois exige a incorporação de mecanismos de focalização automática. As imagens podem ser obtidas com redução por um fator R, tradicionalmente, 5 ou 10x, ou ainda na escala 1:1. Dispondo-se um sistema de posicionamento XY com precisão de deslocamento < 1 μ m, com controle por computador, as máscaras podem ser geradas por varredura, ou composição por unidades elementares de imagem.¹⁰

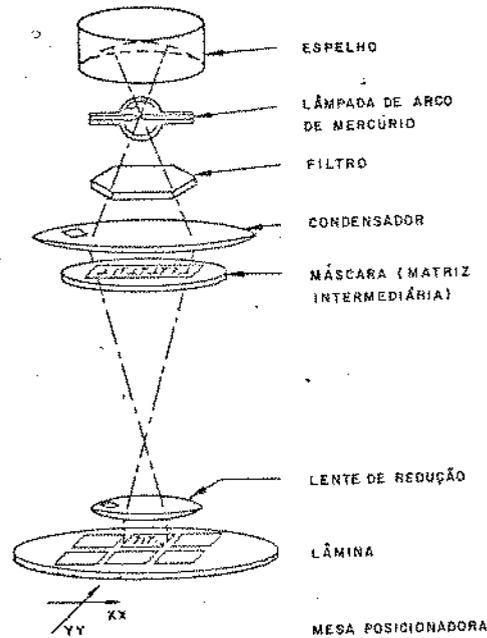


Figura 1.4 - Sensibilização por projeção óptica.

1.2.3. Sistemas que usam feixe eletrônico

O início das investigações no campo da litografia por feixe de elétrons data do fim da década de 50, seguindo-se às experiências bem sucedidas dos microscópios eletrônicos de varredura.¹⁴

Associadas a alta energia do feixe de elétrons estão relevantes propriedades desejáveis na microfabricação, quais sejam, o pequeno comprimento de onda que praticamente anula os efeitos de difração, implicando em alta resolução e alto rendimento no processo de geração de matrizes finais pois várias etapas (reduções e processamento fotográficos) são eliminadas.

De outro lado, a produção de feixes com as características desejadas, a obrigatoriedade de automatização e do controle do mesmo implicando no desenvolvimento de um conjunto tecnológico altamente complexo e de custos extremamente elevados, mantiveram tais sistemas confinados aos grandes laboratórios, e só agora começam a chegar em poucas linhas de produção.

Nesses sistemas o feixe eletrônico é usado para sensibilizar emulsões de PAR gerando matrizes finais ou sensibilizar diretamente o fotorresiste aplicado em uma lâmina.

Os métodos litográficos que empregam feixes de elétrons podem ser englobados em dois grupos; os sistemas de projeção e os de varredura.

- Os sistemas de projeção de feixes de elétrons

Nesse caso a máscara é inteiramente composta de uma vez. Os sistemas existentes permitem a projeção na escala natural ou com redução, tipicamente 5x e 10x.¹⁵

Nos sistemas de projeção 1:1 uma máscara que serve como fotocátodo

emite elétrons ao ser exposta a radiação ultravioleta que são acelerados em direção à pastilha por um alto potencial (20 KV) sensibilizando o fotorresiste após a incidência. Um campo magnético uniforme focaliza o feixe. Detectores de raios X são usados para alinhamento da pastilha, cuja precisão atinge a $0,1 \mu\text{m}$. A resolução alcançada é de 1 a $2 \mu\text{m}$, sendo possível a exposição de pastilhas de $\sim 10 \text{ cm}$ de diâmetro.¹⁶

Nos sistemas de projeção com redução, um feixe colimado por lentes eletrostáticas atravessa a máscara sendo focalizado por outras lentes eletrostáticas sobre o fotorresiste. Linhas de $0,5$ ($1,0$) μm em um campo de $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ($2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$) tem sido gravadas.¹⁴

- Os sistemas de varredura de feixe.

Um feixe altamente focalizado sensibiliza o fotorresiste, com computador controlando lentes magnéticas. Tipicamente feixes com diâmetros da ordem de $0,1 \mu\text{m}$ têm sido obtidos. As aberrações das lentes magnéticas limitam a dimensão máxima do circuito a um campo de aproximadamente 3 mm .^{10,17}

- O uso de raios-X.

Raios-X são usados para sensibilizar fotorresistes pela técnica de impressão em proximidade. Não são usados em outras técnicas visto que o seu controle é muito difícil. A principal vantagem é que devido ao pequeno comprimento de onda - cerca de 10 a 40 \AA - o efeito de difração não é sensível, podendo-se usar filmes espessos de fotorresiste cuja aplicação é mais facilmente controlada e reduz o número de defeitos. Linhas de $1 \mu\text{m}$ em filmes de fotorresiste com $8 \mu\text{m}$ de espessura foram gravados.¹⁴

1.3. A Evolução da Litografia

A forma como os métodos litográficos são usados e (ou) combinados na microfabricação, atualmente são sumarizados na fig. 1.5.

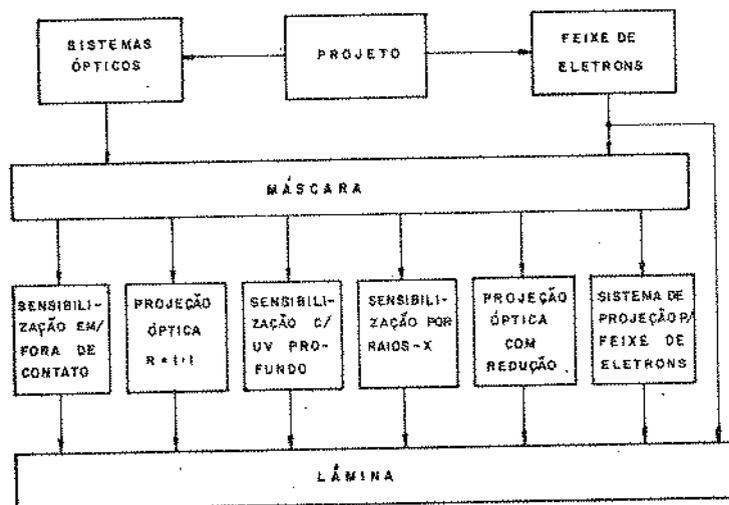


Figura 1.5 - Métodos usados em fotografação.

Atualmente os métodos ópticos ainda constituem o suporte maior da tecnologia de microfabricação, notando-se uma tendência de substituição da sensibilização em proximidade ou contato pelo método de projeção óptica. A projeção óptica com redução deverá ainda ser um método atrativo quando a geometria mínima requerida nos dispositivos estiver situada na faixa de 1 a 2 μm . Nessa ocasião os sistemas de varredura de feixes deverão estar mais difundidos.

A demanda de dispositivos de alta frequência - acima de 10 GHz - para telecomunicações e circuitos digitais para processamento de dados em tempo real, exigindo para o seu funcionamento geometrias - exigem alta velocidade - exigirá geometrias na faixa de sub-micron, difundindo então o emprego da litografia por feixe eletrônico, especialmente com o método de varredura, combinado com o uso de raios-X, na medida em que se pesem os custos.

1.4. A Opção para a Litografia no Laboratório de Eletrônica e Dispositivos (LED)

Na fase de estudos para implantação do LED a opção adotada foi pelo sistema de litografia óptica em que as máscaras são obtidas por fotorredução e fotorrepetição. Na fig. 1.6 são identificadas as partes fundamentais.

Esse método, além de atender as premissas do laboratório, anteriormente mencionadas, tanto do ponto de vista de filosofia de desenvolvimento quanto alcançar limites de geometrias que viabilizem as atividades de pesquisa e formação de pessoal, permite a evolução futura para um sistema mais poderoso como por exemplo a projeção óptica sobre a lâmina ou varredura óptica.

Figura 1.6 - Características fundamentais do sistema litográfico adotado no LED.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO E PROPOSIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho consiste na descrição de projeto e construção de uma fotorrepetidora para ser usada na geração de máscaras - matrizes finais, bem como na definição de parâmetros do sistema de geração de máscaras (artes finais), fotografação e processos associados.

Do ponto de vista do equipamento, deseja-se obter micro-imagens de alto contraste em placas de alta resolução (PAR), buscando-se obter a maior integração e densidade possível nos circuitos, nível de integração em média ou larga escala.

Do ponto de vista do sistema de geração de máscaras (SGM) como um todo, e da fotografação; deseja-se abrir em óxido de silício, filmes de metalização ou outras camadas; janelas com geometrias tão exatas quanto possível em relação às previsões, em forma e dimensões.

O desenvolvimento do trabalho esteve delimitado por várias condições de contorno, englobadas nas descrições gerais que seguem: os requisitos de ordem técnica do processo planar¹⁷, características dos equipamentos, componentes e materiais já existentes no início do trabalho, infraestrutura disponível, além das características técnicas e vocacionais contidas entre os objetivos gerais do LED, anteriormente mencionadas.

A metodologia de trabalho adotada consistiu em, inicialmente, levantar e analisar todas as condições de contorno que tivessem relação com os parâmetros gerais do sistema de geração de máscaras, quais sejam:

- Maior área para circuito;
- Menor dimensão realizada no CI;
- Redução global, compreendida entre a arte final e a matriz final;
- Número de reduções;
- Fator de redução de cada etapa;
- Sistema de alinhamento - disposição e dimensões das marcas;
- Erros máximos permitidos.

A partir disto, pode-se definir o projeto da fotorrepetidora (FR), calibrar e otimizar os processos de redução através de desenhos com configurações apropriadas para medidas de resolução e da relação de tamanho objeto/imagem. Paralelamente era feita a caracterização da objetiva da FR - ponto fundamental do projeto - usando-se um banco óptico, os processos de revelação de filmes de alta resolução já estabelecidos, microscópios além de métodos oportunamente mencionados.

Na confecção das peças da FR, sempre que possível foram usadas máquinas (tornos e fresadoras) comuns, porém as peças mais críticas foram medidas e finalmente ajustadas a mão em cada etapa de montagem.

Montada a FR, desenhos com configurações apropriadas foram usados iterativamente para obter a focalização fina, densidade óptica das imagens obtidas, o fator de redução, erros de alinhamento e posicionamento.

Os parâmetros da fotografação foram estabelecidos por procedimentos que conduzissem às características finais desejadas: a maior resolução possível

(exatidão) e aderência suficiente para evitar falhas durante o ataque químico o que implica em maior rendimento - circuitos bons/lâmina.

Foram usados microdensitômetro, microscópio de transmissão e reflexão, microscópio de interferência com ocular filar e projetor de perfil nas medidas para avaliação das imagens. Em medidas de deslocamento; relógios comparadores, blocos de medida padrão e microscópios ópticos.

Finalmente, do ponto de vista descritivo, procurou-se focalizar como elemento de centro do trabalho, o desenvolvimento da FR, visto que, sendo a fotorrepetição uma etapa bastante crítica em todo processo de fabricação de microcircuitos, as demais devem se adequar a esta. Procurou-se apresentar o texto seguindo a sequência natural das etapas, porém tão objetivamente quanto possível.

2.1. Propostas do Trabalho e Disponibilidades

Foram estabelecidas como diretrizes básicas de projeto, a capacidade de produzir-se máscaras para CI de até $5 \times 5 \text{ mm}^2$, tal que a menor geometria realizável seja um "quadrado" de $5 \times 5 \text{ }\mu\text{m}^2$, no qual o fator de arredondamento seja menor que 50%. Erro de posicionamento menor que $2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Erro do fator de redução, na fotorrepetição menor que 1%.

Tais limites foram estabelecidos tendo-se em vista, de um lado as características dos equipamentos descritos abaixo; e de outro, que tais valores permitem o desenvolvimento de circuitos integrados em média escala, o que confere ao laboratório a capacidade de desenvolver os trabalhos objetivados em sua proposta.

São as seguintes as características dos equipamentos disponíveis no princípio do trabalho:

a) Fotorredutora

- Marca: HLC
- Modelo: Microkon Mu
- Fonte de Luz: Verde ($\lambda = 5460 \text{ \AA}$) difusa
- Modo de operação: fotografa transparências
- Objetiva: suportes ou adaptações para receber objetivas de $f = 70$ a 610 mm
- Deslocamento do carro: $2,6$ a $3,7 \text{ m}$, medidos entre os planos de objeto e imagem.
- Precisão de posicionamento: $0,0001 \text{ pol}$ ($\sim 2,5 \text{ }\mu\text{m}$)
- Chassi: recebe filmes tipo fotolito de $20 \times 30 \text{ cm}^2$ até $60 \times 60 \text{ cm}^2$ e placas de vidro de $1,5 \times 1,5 \text{ pol}^2$.
- Dimensão do plano de objeto: $1,5 \times 1,6 \text{ m}^2$
- Fixação de transparências por sistema de vácuo.

b) Objetivas para Fotorredução e Fotorrepetição

- Características nominais relacionadas no apêndice A.

c) Alinhadora de Máscaras

- Marca: Kulicke and Soffa
- Modelo: 686B
- Operação: sensibilização por contato
- Iluminação: UV, colimada proveniente de uma lâmpada de vapor mercúrio
- Alinhamento: ajustes finos $KY\theta$ monitorados por microscópios

- Potência luminosa: ajustada para 8 W/cm^2 em um campo de $\phi = 8 \text{ cm}$
- Ajuste de exposição: temporizador cobrindo a faixa de 0,1 a 1000.0 segs.

d) Aplicação de Fotorresiste

- Equipamento: centrífugador ("spinner").
- Marca: Headway Research Inc.
- Modelo: 1 ED 101-R85
- Controle de velocidade: 500 a 10000 rpm
- Aceleração: 20000 rpm/seg.
- Resolução de escala: 50 rpm
- Temporizador: continuamente ajustável de 1 a 60 segundos.

e) Materiais Fotossensíveis

Serão utilizados nas etapas de redução, filmes do tipo fotolito em base plástica e tipo placa em base de vidro; estes, nas etapas em que alta resolução é exigida. O fotorresiste negativo será usado para gravação em óxido e o positivo para a remoção seletiva da metalização. Os fotorresistes disponíveis são:

- negativo - Microresiste 747 Kodak.
- positivo - 1350J Shipley.

f) Coordenatógrafo - "Ferramentas" de Desenho para Artes Finais

Através do coordenatógrafo, são obtidas as artes finais. São as seguintes as suas características:

- Marca: Coradi
- Modelo: Coradograph KDF-D
- Desenhos: executados por corte em Rubylith ou por projeção óptica de unidades elementares em filmes tipo fotolito.
- Deslocamento da "ferramenta" de desenho:
 - . Direções: XX e YY (e arcos no caso do sistema de corte de Rubylith).
 - . Precisão de posicionamento da "ferramenta": $\pm 5 \mu\text{m}$.
 - . Área útil para desenhos: $1.0 \times 1.5 \text{ m}^2$

h) Outras

Compondo o sistema de geração de máscaras encontram-se o SAD¹⁸ (Sistema Automático de Desenho) e o setor de PAC,¹⁹ atualmente com vários programas implantados; entre eles o da Linguagem de Procedimentos Gráficos (LPG).²⁰ Com estes recursos - essenciais no desenvolvimento de tecnologias de integração em alta escala - é possível projetar máscaras com o uso de terminais gráficos, traçar rascunhos, observar localmente um setor do desenho para possíveis correções ou aprimoramento, além de atuar automaticamente as "ferramentas" para a confecção das artes finais.

Um setor de metrologia do qual fazem parte microscópios ópticos com diversos recursos de iluminação, adaptação de câmaras para documentação, interferometria, retículos, mesas posicionadoras micrométricas foi utilizado na avaliação de dimensões de imagens gravadas e espessura de filmes.

2.2. A Geração de Máscaras para Micro-eletrônica

Nesta seção serão abordadas características gerais de máscaras e sua adequação ao sistema litográfico.

2.2.1. Disposições Gerais e o Problema de Alinhamento

O sistema de geração de máscaras (SGM) é o segmento das técnicas de fotofabricação que limita, em primeira ordem, a sua capacidade: de um lado a complexidade de um CI - maximização do nível de integração e densidade de "componentes" - e de outro a sua performance.

De um modo genérico, o sistema gerador de máscaras é constituído por uma série de técnicas, processos e equipamentos cujo resultado é a obtenção de imagens de alto contraste -transparências- para algum tipo de irradiação, as quais serão usadas através da fotolitografia, na remoção seletiva de filmes de materiais aplicados a um substrato.

O processo planar, alicerce da grande maioria das tecnologias da fabricação de dispositivos semicondutores, tem como premissa básica a aplicação de processos em regiões de um substrato que se superpõe de maneira bem definida.

A fig. 2.1 representa a esquematização funcional do SGM do LED. A opção adotada consiste em obter as matrizes finais por repetição passo a passo e, através destas, sensibilizar em contato com radiação UV, o fotorresiste. Por este método, duas propriedades são consideradas em primeira ordem na determinação das características gerais das máscaras e da fotorrepetição, quais sejam: a superposição das configurações correspondentes nos diversos níveis de máscaras correspondentes a um dispositivo e natureza das imagens (plano de fundo), que diz respeito a regiões a serem protegidas em função do tipo de filme usado na fotorrepetição e do fotorresiste.

Na repetição passo a passo a projeção das imagens que comporão a matriz final deve ocorrer nas coordenadas previstas. Além disso a orientação da figura nas diversas matrizes de um conjunto deve se manter. Desvios em relação ao acima enunciado são denominados de erro de alinhamento; por translação ou rotação, respectivamente.

O Erro de Translação, $\epsilon_t = (\Delta X, \Delta Y)$

Dependendo do método usado para o posicionamento, o erro cometido na projeção das imagens pode estar composto de uma parcela aleatória e (ou) outra que translada todas imagens de um mesmo valor. A primeira - fig.2.2a - decorre da localização inadequada da plataforma de posicionamento XY, enquanto a segunda - fig. 2.2b - significa apenas um deslocamento de referência, mas que pode ser corrigida na fase de exposição da lâmina. O erro efetivo de translação compromete o funcionamento com confiabilidade ou a dispersão de características dos dispositivos. Aumentar a tolerância admitida, tende a comprometer o tamanho máximo dos circuitos.

Nos sistemas ópticos de geração de máscaras têm sido usados métodos de posicionamento por:

- motores de passo, em que os deslocamentos são quantizados em pequenas unidades e controlados por contagem eletrônica.
- interferometria em que a contagem de franjas normalmente produzidas por lasers controla os deslocamentos.

O erro, no primeiro caso, depende das características do sistema

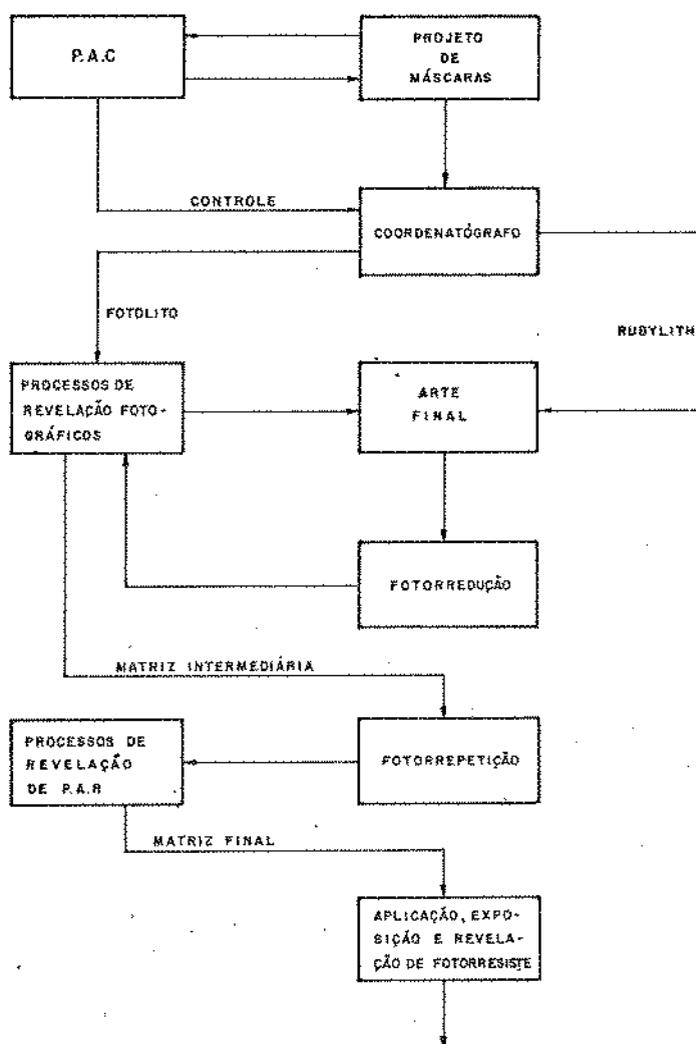


Figura 2.1 - O sistema de Geração de Máscaras do LED

de redução mecânica e uniformidade de passo do fuso de posicionamento. O aumento da redução do movimento tendem a melhorar a resolução, porém, tornam lentos os deslocamentos.

No segundo caso a precisão está associada ao comprimento de onda, ou seja, $\lambda/4$.

O Erro de Rotação $\epsilon_r = \Delta\theta$

O erro de rotação ocorre sempre que o objeto (matriz intermediária) na fotorrepetição não guardar a mesma orientação relativa para alguma referência fixa na fotorrepetidora que as demais matrizes usadas para gerar o conjunto de matrizes finais.

Além da manutenção da orientação relativa uma outra orientação é necessária: as linhas horizontais e verticais, por exemplo as que definem os limites externos dos desenhos devem coincidir com as direções de deslocamento XX e YY da mesa

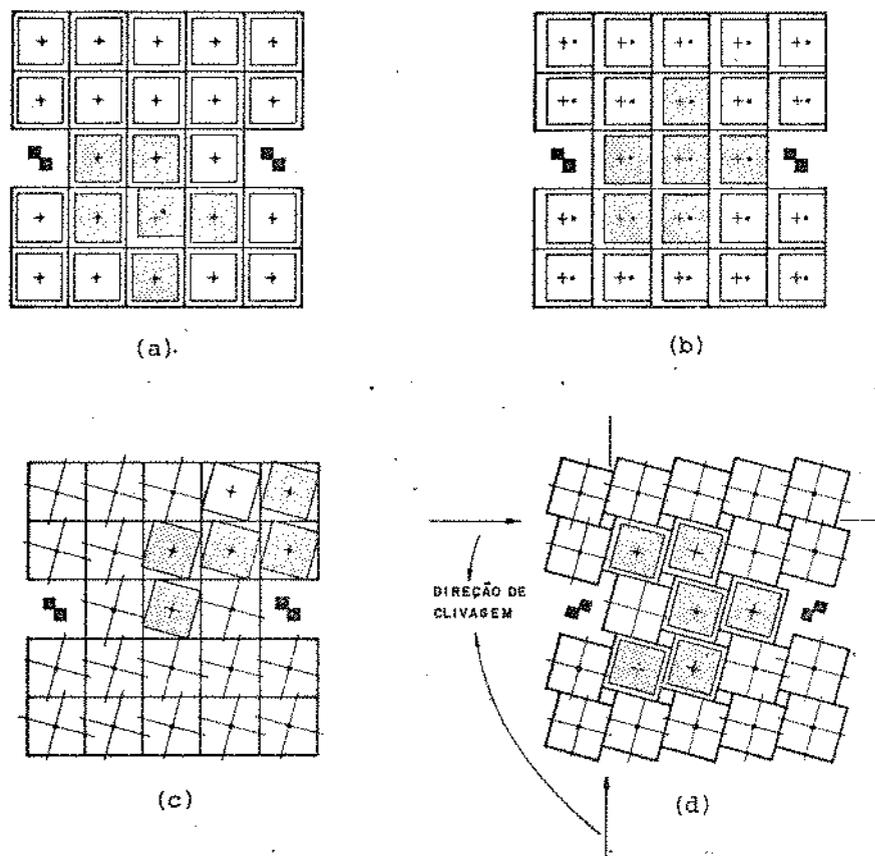


Figura 2.2 - Erros de translação. a) ocasional b) de modo comum. Erros de rotação, c) ocasional, d) de modo comum.

posicionadora da PAR. Quando isto não ocorre, a clivagem para individualização dos circuitos pode danificar os mesmos, como mostra a fig. 2.2.d.

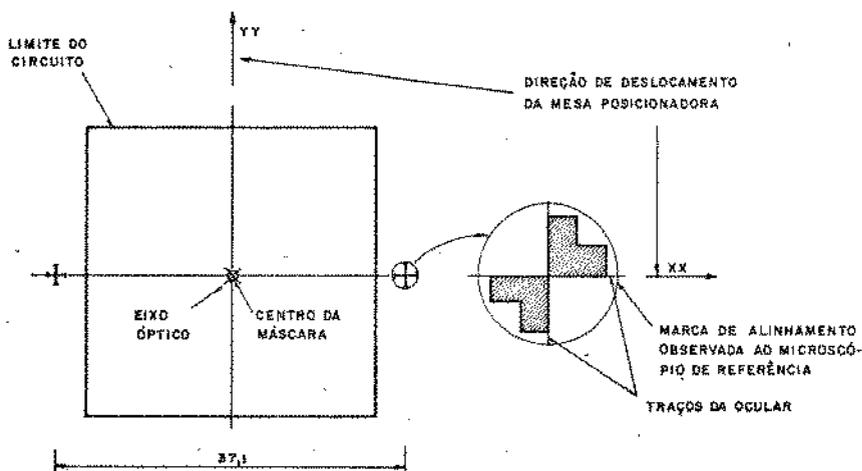


Figura 2.3 - Características do alinhamento de retículos.

O método empregado para manter o alinhamento angular, consiste em superpor marcas reticuladas contidas nas máscaras com uma referência convenientemente definida na fotorrepetidora - um microscópio de ocular filar. A fig. 2.3 ilustra o procedimento.

2.2.2. A Geração de Artes Finais

São duas as maneiras pelas quais se podem obter os desenhos em alto contraste das artes finais. Uma por corte e remoção de Rubylith e outra por projeção óptica sistemática de configurações elementares em filme fotográfico. A fig. 2.4 ilustra os princípios básicos desses métodos.

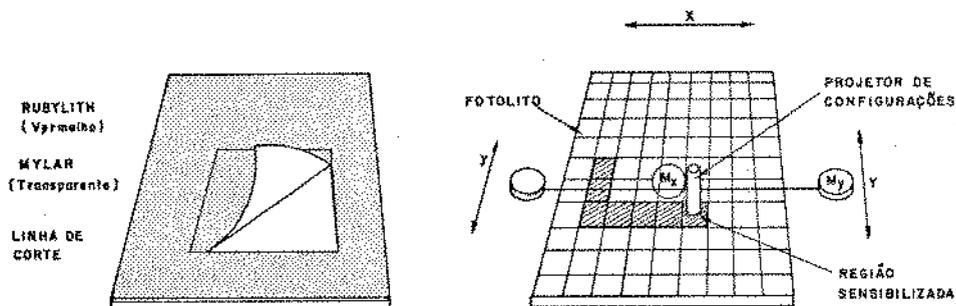


Figura 2.4 - A geração de artes finais usando:
a) Rubylith b) fotolito (filme gráfico).

O Rubylith²¹ é uma lâmina formada por duas camadas de material plástico: um substrato de Mylar, recoberto por uma fina película de material vermelho, cor complementa à irradiação verde usada na câmara de fotorredução.

Para definir-se os desenhos, a película é cortada por uma faca especial associada ao coordenatógrafo. Posteriormente o material é eliminado manualmente das regiões que devem apresentar alta transmitância. Fig. 2.4a.

No segundo método²² são empregados filmes de alto contraste denominados fotolitos comumente em uso em artes gráficas. Um projetor óptico acoplado ao coordenatógrafo focaliza sobre o filme a imagem de um pequeno quadrado luminoso. O disparo da fonte de luz ocorre em coordenadas bem estabelecidas de modo a compor o desenho completo, que aparece após revelação do filme.

A menor geometria desenhável quando o Rubylith é empregado decorre da dificuldade de remoção do material e do erro devido a imprecisão na atitude e controle do corte. No outro caso, pode-se projetar configurações muito menores porém o tempo de processamento de uma máscara e (ou) a capacidade de resolução nas etapas de fotorredução ou fotorrepetição antecipam o limite.

A tabela 2.1 condensa os valores adotados como padrões que atendem ao compromisso entre a tendência de minimização das menores dimensões de um lado, e do

outro, as características associadas ao coordenatógrafo, módulos projetores, objetivas e objetivos em vista

	Rubylith	Fotolito	Comentários
Área total máxima de desenho	1 x 1,5m ²	0,9 x 1,5m ²	Limitado pela dimensão dos filmes disponíveis
Menor largura de linha	0,5 mm	1 µm	Nominal
Erro máximo de posicionamento da faca	±0,005 mm	-	Nominal
Erro máximo de posicionamento do projetor	-	+100 µm	Ocorre devido a retardo no disparo do flashe. ²¹

Tabela 2.1 - Características das "ferramentas" de desenho.

2.2.3. Capacidade do SGM - Redução Global, Áreas Mínimas e Máximas em Circuitos

Denomina-se redução global ao fator de escala entre as dimensões da arte final e do dispositivo.

A capacidade ótima do SGM é determinada pela combinação dos parâmetros que conduzem ao maior nível de integração e densidade na pastilha: maior área de desenho, menor quadrado desenhável e maior redução fotográfica. Tais fatores, por sua vez, estão condicionados aos:

- campo de imagem compatível com as dimensões dos filmes apropriados em cada etapa;
- resolução suficiente para reproduzir adequadamente as menores dimensões em cada etapa, em vista das características objetivas.

Em outras palavras, para o sistema em questão, o maior circuito é limitado pelas dimensões da tela da fotorredutora e o maior nível de integração, pela menor dimensão desenhável no fotolito ou no Rubylith.

O ponto de partida para os cálculos é a objetiva* usada na fotorrepetição,²³ cujo campo útil de maior resolução - 600 linhas/mm - e mínimas aberrações é $\phi = 10$ mm, estendendo-se até 14 mm, com resolução de 500 linhas/mm. Três possibilidades acomodariam as condições desejáveis, conforme mostra a tabela 2.2.

*Ultra Micro Kikkor, 50 mm f/1.8e

Dimensões limites dos circuitos (mm)	Área do circuito (mm ²)	Reduções possíveis (X)	Menor dimensão alçaçada (µm)	Nº da pastilha/lâmina de 1,5 pol.
5 x 5	25	200 - 100	5	23
5 x 7,5	37,5	200 - 100	5	19
5 x 10	50	100	10	14

Tabela 2.2

A segunda opção permite o maior aproveitamento no que diz respeito à complexidade dos circuitos; a terceira apresenta a maior área, porém às custas de um aumento nas dimensões de um dispositivo. O padrão adotado recaiu na primeira opção em virtude da disponibilidade imediata de blocos padrões de 5, 10, ... 25 mm. Com pequenas modificações nos parâmetros de projeto das máscaras e do microscópio de referência, é possível a utilização de qualquer das outras duas opções.

Considerando-se as objetivas disponíveis (vide secção 2.4) e os limites de descolamentos de carro da fotorredutora são as seguintes - tabela 2.3 - as opções de reduções adotadas.

Redução Global Máxima	R	Objetiva	R	Objetiva	R	Objetiva	R	Objetiva	Fotorrepetição
200X	2X	f=610mm	-	-	20X	f=150µm	5X	f=50mm	
Outras	100X	-	-	-	20X	f=150µm	5x	f=50mm	
	50X	-	-	10X	f=250mm	-	-	5x	f=50mm

Tabela 2.3

2.2.4. As Marcas de Alinhamento

As máscaras de qualquer conjunto usado na fabricação de CI's deverão conter 3 tipos de marcas de alinhamento, como mostra a fig. 2.5.

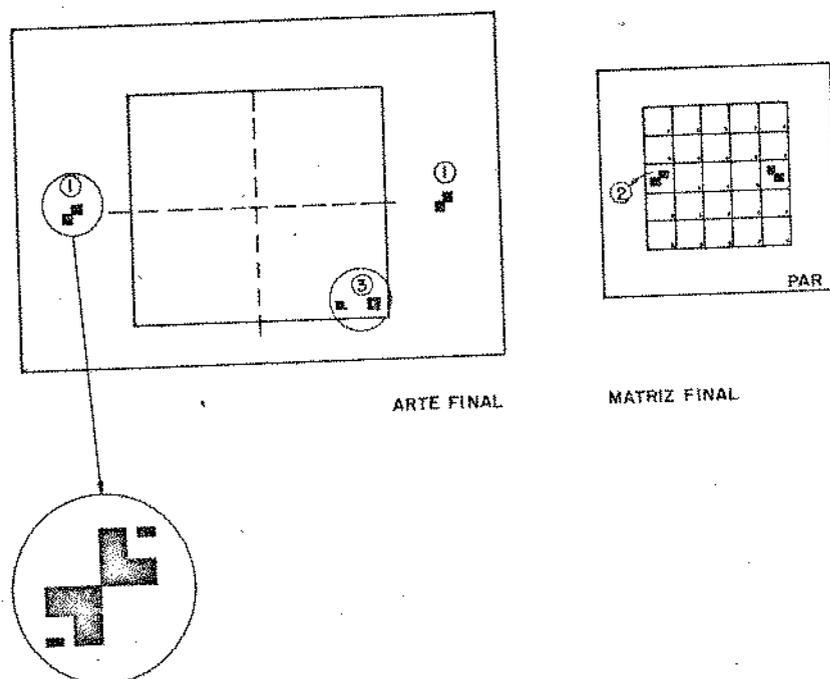


Figura 2.5 - Disposição de marcas de alinhamento.

(1) Marcas para fotorrepetição. São destinadas a garantir o alinhamento relativo de cada desenho fotorrepetido em relação aos correspondentes das demais. O alinhamento é feito em relação a referência na FR, segundo coordenadas XY_0 . A separação entre essas marcas deverá ser sempre a mesma para qualquer matriz intermediária e igual à separação das marcas de referência na FR. Os detalhes e dimensões adotadas são mostrados na fig. 2.6.

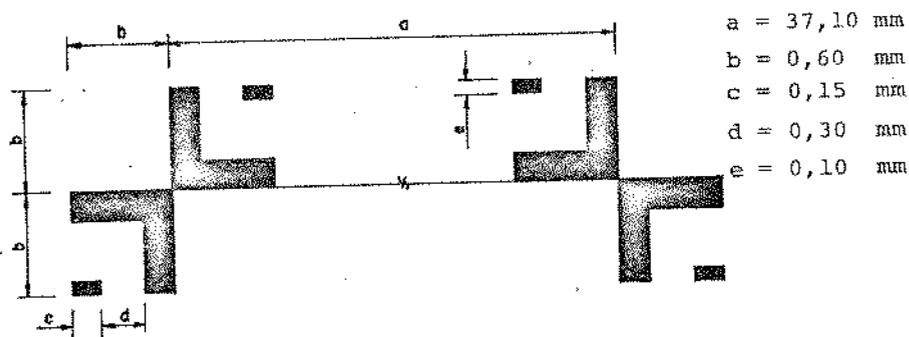


Figura 2.6 - Geometria das marcas de alinhamento na matriz final.

(2) Marcas de alinhamento para fotogração. São marcas projetadas pela FR na matriz final (MF) cuja finalidade é permitir um pré-alinhamento MF/lâmina. O seu espaçamento é função da capacidade de ajuste da alinhadora de máscaras. A matriz que gera essas marcas também devem ser alinhadas na FR. Suas características, na intermediária, são como mostra a fig. 2.7.

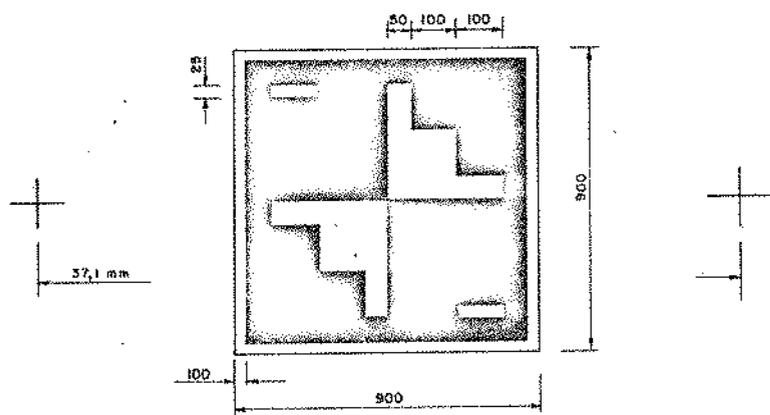
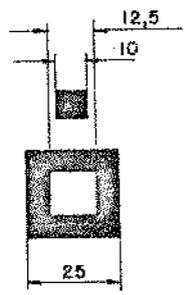


Figura 2.7 - Geometria da matriz escalada para projetar as marcas de alinhamento para fotogração. Dimensões em μm .

(3) Marcas de alinhamento fino para fotogração. São pequenos quadrados que se encaixam, situados na periferia da área de circuito. Uma vez feito o pré-alinhamento com as marcas (2), o ajuste fino é conseguido com o auxílio dessas pequenas marcas. São ainda úteis na observação de erros de posicionamento de fotorrepetição. A disposição adotada se presta ainda como um testemunho permanente do alinhamento entre os diversos níveis de máscaras.

Nível da Máscara	Teste Alinhamento					
	1 ^a c/ 2 ^a	2 ^a c/ 3 ^a	3 ^a c/ 4 ^a	1 ^a c/ 4 ^a	1 ^a c/ 3 ^a	2 ^a c/ 4 ^a
1						
2						
3						
4						



(dimensões padrão)

Figura 2.8 - Marcas de alinhamento fino.

2.2.5. Orientação e Contraste de Máscaras

Quanto à orientação, contraste e plano de fundo as imagens podem ser positivas ou negativas, diretas ou inversas, fundo escuro ou claro

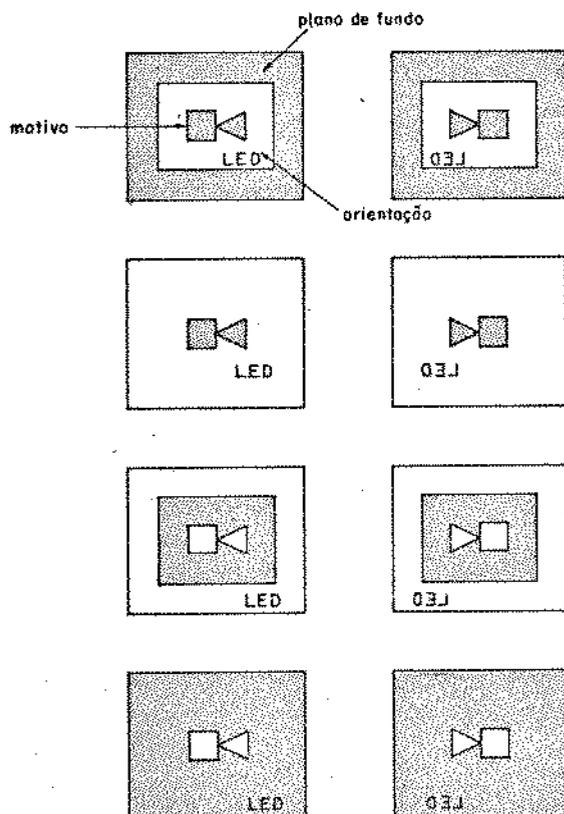


Figura 2.9 - Realizações possíveis do desenho de uma configuração.

A utilização de um tipo ou outro depende do fotorresistente a ser usado, positivo ou negativo. Para o sistema de fotorrepetição adotado o plano de fundo das MIs deve ser sempre escuro e isento de falhas, de modo que a região adjacente à área da imagem projetada não seja sensibilizada, a qual deve ser ocupada por outras imagens.

Outro fator levado em conta no projeto das máscaras é o número de etapas de redução pois cada uma inverte a orientação e o contraste. Dessa forma se a fotorredução for executada em duas etapas, por exemplo, a de 200x, ter-se-á que obter uma inversão por contato, após a primeira redução.

2.3. Fotorredução²²

Os principais pontos envolvidos nas etapas de fotorredução são:

- A relação de redução (fator R) e precisão de seu ajuste;
- precisão de focalização e condições de máxima resolução;
- correlação dos parâmetros de exposição com os processos de revelação;
- erros associados.

2.3.1. Relação de Redução e Precisão de Ajuste do Fator R

A equação (2.1)

$$D_t = f \left(R + \frac{1}{R} + 2 \right) + \Delta h \quad (2.1)$$

estabelece uma relação unívoca da distância total (D_t) entre os planos de objeto e imagem, com o fator de redução, para uma objetiva particularizada por seus parâmetros f e Δh . Considerados os limites Fig. 2.10 de movimento do carro, para cada objetiva disponível, tem-se os correspondentes $R(\min)$ e $R(\max)$ dentre os quais se selecionam o(s) valor(es) inteiro(s) mais conveniente.

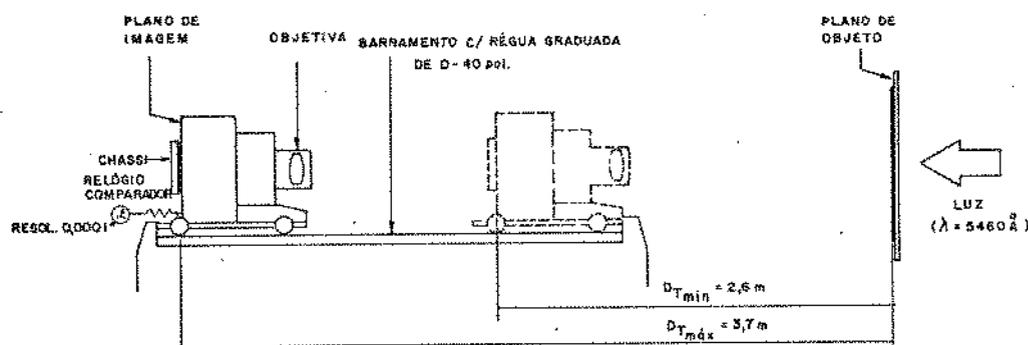


Figura 2.10 - Esquematização da câmara de fotorredução.

Visto que os valores de f e Δh contidos nas folhas de dados são especificações médias de cada modelo, ajustes experimentais foram feitos em cada caso. Esse ajuste é iterativo conforme mostra o diagrama abaixo, no qual ΔD_t é obtido pela aproximação diferencial:

$$\frac{d}{dR} (D_t) = \frac{d}{dR} [f (R + 1/R + 2) + \Delta h] = f (1 - 1/R^2)$$

$$\Delta D_t = f (1 - 1/R^2) \Delta R, \quad \Delta R = R - R_0 \quad (2.2)$$

Através de um relógio comparador com resolução de 0,0001" = 2,5 μ m, pode-se posicionar o plano de imagem. Isto significa que o fator de redução pode ser estabelecido com a exatidão da medida que é possível com os equipamentos dispõ

níveis pois $\Delta R = 2,5 \times 10^{-6} / (150 \times 10^{-3}) (1 - 1/20^2) < 0,16 \times 10^{-4}$, considerando-se $R = 20X$ que é o caso mais crítico.

2.3.2. Medição do Fator R e Calibração da Fotorredução

A medida do fator R é obtida a partir de uma dimensão conhecida no objeto e da sua correspondente na imagem revelada. Marcas de alinhamento se prestam bem para este fim, visto que a referência é melhor mantida em presença de erros de processos. A fig. 2.11 ilustra os procedimentos adotados para este fim.

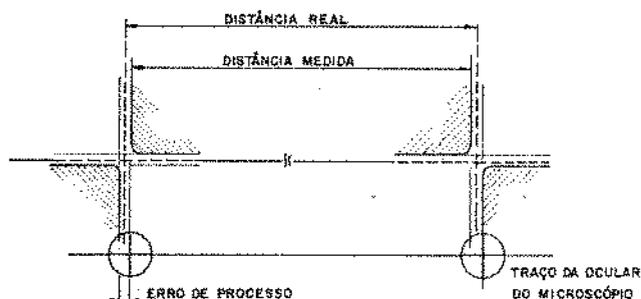


Figura 2.11 - Configuração usada para medição de fatores de redução (R).

Procedimento Inicial

A fotorredutora dispõe de microscópio acoplado a parafuso micrométrico para focalizar aproximadamente no plano do filme, através do qual obtêm-se a dimensão da imagem. Uma avaliação pela imagem revelada é feita tendo-se passado pelos procedimentos de focalização precisa, descritos em seguida. Em vista da dificuldade de medir-se com precisão dimensões da ordem de 10^3 mm, empregou-se originais bem distintos, de acordo com o valor do fator R.

- R > 10: originais desenhados no coordenatôgrafo, cuja precisão de posição entre duas coordenadas é ~ 10 μ m.
- R < 10: originais fotorreduzidos até a dimensão máxima de 50 mm cuja medida pode ser determinada com microscópios posicionados por parafusos micrométricos com precisão de 1 μ m.

Ajuste Fino de Fator R

Os procedimentos para a calibração de fatores de redução estão resumidos na fig. 2.12, cujos resultados são mostrados na Tab. 2.6, no final desta secção.

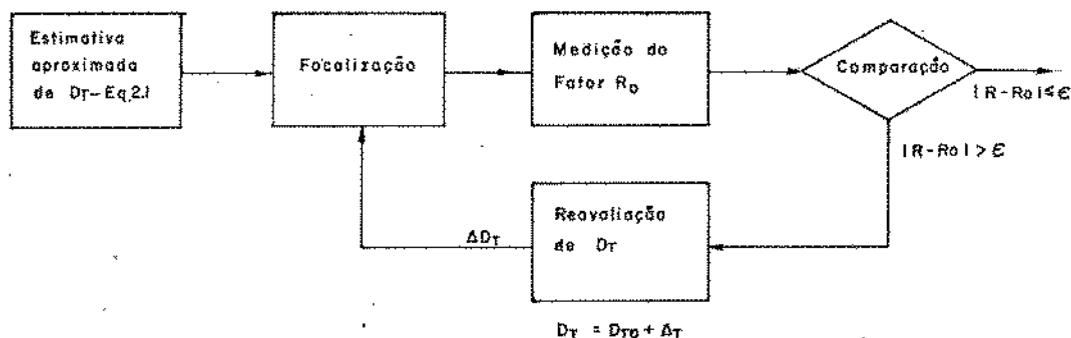


Figura 2.12 - Procedimentos de calibração dos fatores de redução com a fotorredutora

Focalização

Selecionados o fator R e a objetiva adequada segundo os limites da fotorredutora - visto que D_t foi definido para cada R - o próximo passo foi esta belecer a focalização precisa, em cada caso, através do posicionamento da objetiva. Os procedimentos para focalização fina e precisa requerem avaliação da imagem final sobre o filme. Os passos adotados foram os seguintes:

- Ajustes do carro posicionador da fotorredutora para o valor esperado de D_t (eq.2.1);
- focalização visual (grosseira) através de microscópio auxiliar;
- focalização fina da imagem fazendo-se fotografias de cartas de resolução para diversas posições da objetiva ajustadas por roscas e escala de graduação angular, em torno da posição anterior;
- selecionar pela análise microscópica o intervalo que conduziu a maior resolução e repetir a partir de c - se necessário - as etapas até a obtenção da melhor definição da imagem;
- ajustar e fixar a objetiva para a posição selecionada.

O item c pressupõe estabelecidos os processos fotográficos e, nesse caso, adotaram-se os parâmetros recomendados e extensivamente testados pelo fabricante, além de reveladores recém preparados, com pouco uso e temperatura controlada de modo a isolar apenas os efeitos da desfocalização. O conhecimento do valor da profundidade de foco auxilia a determinação do passo (p) para o ajuste da objetiva,

$$p = p_f / n p_r \times 360^\circ \quad (2.3)$$

onde,

p_f - profundidade de foco
 p_r - passo da rosca
 n - nº de exposições

2.3.3. Parâmetros de Sensibilização das PAR, Processos e Erros Associados

Os processos de revelação de filmes fotográficos para emprego na microeletrônica estão vastamente difundidos na literatura e nos manuais de uso dos fabricantes. Os procedimentos adotados visam acomodar os requisitos exigidos de limpeza e controle da densidade óptica com as facilidades implantadas no laboratório, para isto o processamento é realizado sob estações de fluxo laminar.

Do ponto de vista deste trabalho, neste ponto, as características principais desejadas nas imagens revelados são:

- a) Contraste acima de um valor mínimo que assegure a obtenção do contraste necessário nas demais etapas de redução e a completa sensibilização e não sensibilização das áreas claras e escuras correspondentes na exposição do fotorresiste.
- b) Menor influência possível nas dimensões de configurações por efeito de espalhamento da imagem.

Para definir o contraste nas matrizes finais, inicialmente obteve-se através de uma PAR completamente transparente, o tempo mínimo necessário para total sensibilização do fotorresiste. Foram encontrados os seguintes valores:

	tempo (seg)
micro-resiste 747 (Kodak - negativo)	2,0
resiste 1350 J (Shipley) - positivo	1,6

A fig. 2.12 mostra o perfil de distribuição luminosa no plano da lâmina após calibração do sistema de iluminação da alinhadora de máscaras Kulicke and Soffa usada no LED. As medidas foram obtidas através de um fotômetro que acompanha a máquina, da marca PRECO, modelo P536 com orifício do sensor com diâmetro $\phi = 25$ mm.

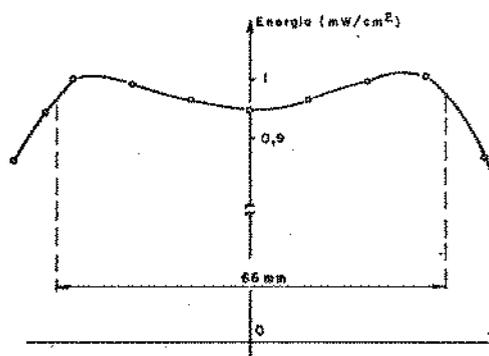


Figura 2.12 - Perfil de distribuição luminosa da alinhadora de máscaras.

Expondo o fotorresiste através de uma escala graduada de densidade óptica estabeleceu-se, com o tempo de 2 segundos, o menor valor de D , que conduzia à completa remoção (fixação) do fotorresiste negativo (positivo), tendo sido encontrado

$$D_{\min} = 1,6$$

A densidade óptica é definida segundo o esquema ao lado²⁶.

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

2.3.4. O Erro de Espalhamento de Imagem δ_e

As dimensões das imagens reveladas são afetadas pelo nível de exposição e o desvio associado é conhecido por erro de espalhamento.²⁷ Para quantizá-lo foi usada a escala de densidade óptica graduada obtida pela projeção de uma carta de resolução em uma PAR com a fotorrepetidora, sendo que a cada projeção a lâmpada era disparada com um certo nível de energia.

O método empregado consiste em tomar as dimensões de barras escuras e claras para cada exposição. Com a diferença das médias dos valores das dimensões das barras e espaço e o resultado dividido por dois, obtém-se o erro de espalhamento como indica a eq. (2.4) relacionada com a figura 2.13.

$$\delta_e = \left(\frac{n}{E} \frac{X_{ei}}{n} - \frac{n}{E} \frac{X_{ci}}{n} \right) / 2 \quad (2.4)$$

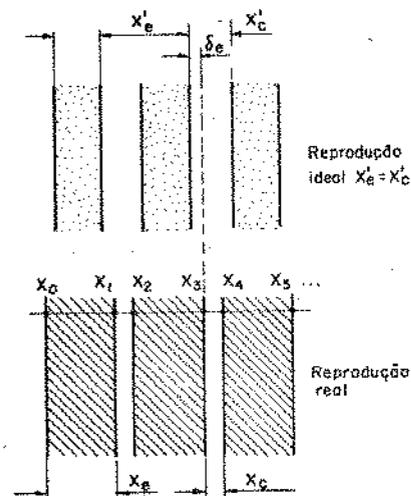
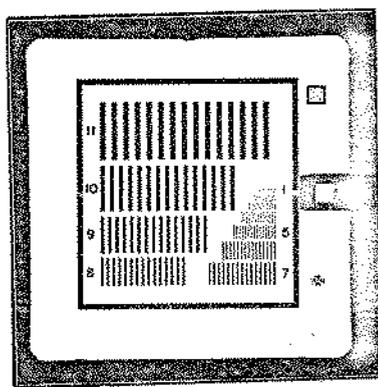


Figura 2.13 - a) Reprodução do "objeto" usado para medida do erro de espalhamento b) ilustração do método

Este procedimento minimiza o erro devido a incerteza cometida no posicionamento do traço da ocular do microscópio de medida. A tabela 2.4 apresenta os valores representativos da amostra de teste construída.

Projeção nº	V_p (Volts)	V_r (Volts)	V (Volt)	E (Joule)	LogE	T%	D
1	205	51	154	28,7	1,45	47,83	0,26
2	210	53	157	29,6	1,47	55,07	0,35
3	230	52	178	38,0	1,58	80,68	0,71
4	260	54	206	50,9	1,71	94,20	1,23
5	280	58	222	59,4	1,77	98,07	1,71
6	300	55	245	72,0	1,86	98,86	1,94
7	320	60	260	81,1	1,91	99,52	2,32
8	347	61	279	93,4	1,99	99,76	2,62

Tabela 2.4 - Dados usados na construção da escala de densidade óptica (D) e obtidos para o erro de espalhamento (δ). V_p , V_r e V representam as tensões de pico, residual e de disparo respectivamente. T é a transmitância.

As medidas da largura das barras foram tomadas no grupo nº 7, da carta de resolução, cuja dimensão nominal é 37,8 μm , e os números estão contidos na tabela 2.5.

Note-se que o desvio em torno do valor médio ($\bar{E} + \bar{P}$) = 79,6 μm , é menor que o erro devido a incerteza de posicionamento do traço do microscópio, ~ 0,8 μm .

Com dados das tabelas acima plotou-se a curva do erro de espalhamento x densidade óptica mostrada na fig. 2.14. Foi tomada como referência o nível de exposição que resulta em $D = 2 \pm (1 + 0,2)$. D_{min} quando os parâmetros de revelação padrão recomendado pelo fabricante das PAR são usados. Cerca de 20% de aumento de D em relação a D_{min} foi adotado posto que torna mais uniforme a densidade óptica nas áreas sensibilizadas além de tornar a definição das imagens obtidas menos sensíveis a pequenas variações de processos de exposição e revelação dos filmes.

Uma conclusão importante tirada da fig. 2.14: Deve-se controlar D em aproximadamente $\pm 5\%$ para que δ_e seja menor que 0,5 μm , na sensibilização das PARs.

Finalmente, a seleção da abertura numérica usada em cada redução baseou essencialmente na capacidade de resolução que cresce com o aumento da abertura do diafragma (1/AN). A profundidade de foco decresce nesse sentido, porém pode ser mantida sob controle devido ao preciso sistema de posicionamento da fotorredutora, cerca de 2,5 μm como visto anteriormente. A tabela 2.6 condensa os valores dos principais parâmetros obtidos e adotados para as reduções. As IEP* detalham as diversas etapas adotadas no laboratório^{28, 29}.

* Instrução para Execução de Processos, publicações internas do LED.

	B*	P**	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P
nº de divisões da escala do microscópio	140	119	135	122	130	124	129	125	129	126	127	128	124	130	126	132
dimensão $X_0,31(\mu m)$	49.1	38.0	41.6	38.1	41.1	38.8	40.0	39.8	39.4	40.1	38.4	40.8	38.3	41.2	37.7	41.9
dimensão $\frac{B+P}{2}$	79.9	79.7	79.7	79.9	79.9	79.8	79.8	79.5	79.5	79.2	79.5	79.5	79.6	79.6	79.6	79.6
densidade Óptica	0,28	0,35	0,35	0,71	0,71	1,23	1,23	1,71	1,71	1,94	1,94	2,32	2,32	2,62	2,62	2,62
$\delta_e(\mu m)$	-2,8	-2,0	-2,0	-1,9	-1,9	-1,1	-1,1	0,2	0,2	0,8	0,8	1,3	1,3	1,7	1,7	1,7
Amostra nº	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	8

B* - Branco P** - Preto † medida real

Tabela 2.5 - Dados representativos da variação da largura das barras em função da densidade óptica.

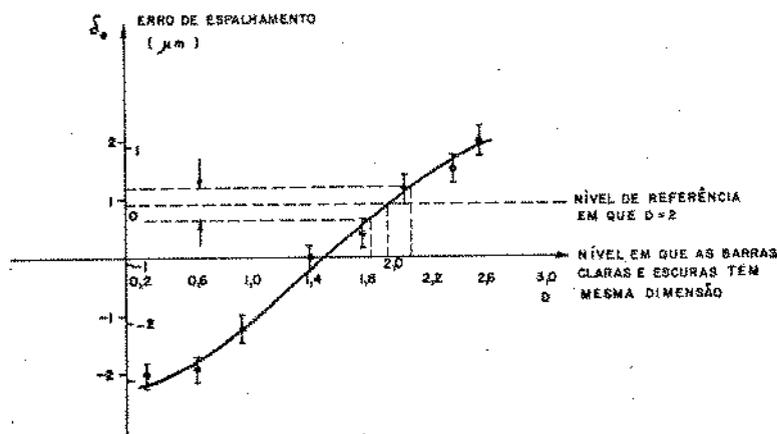


Figura 2.14 - Erro de espalhamento versus densidade óptica para sensibilização das PAR

Fator de redução	(NF)	t_{exp} (seg)	indicadores de posição régua relógio linear AMES	limite de ajuste pa- ra AR ($\times 10^{-4}$)	Profundida- de de foco (μm)	Resolução (linha/ mm)
2X Fotolito	f/16	3,5	7.6170	2,7	560	150
4X Fotolito	f/11	3,5	19.0080	2,9	260	200
10X PAR	f/8	52	17.8215	5,6	140	200
20X PAR	f/5.6	25	27.8615	8,4	68	350
5X	Fotorrepetição: Os parâmetros associados serão abordados no Capítulo 3.					

Tabela 2.6 - Parâmetros gerais da fotorredução.

2.4. Processos Associados à Matrizes Intermediárias e Matrizes Finais

As matrizes intermediárias e finais são realizadas nas chamadas Placas de Alta Resolução (PAR).

As PAR são constituídas por um suporte de vidro sobre a qual é depositada uma película de material fotossensível à base de haleto de prata.

O seu uso na microeletrônica pressupõe como principais características a capacidade de registrar linhas tão estreitas quanto permitir o método de sensibilização das mesmas e que a base de vidro tenha planicidade melhor que a profundidade de foco das objetivas que constituem os sistemas ópticos usados na geração de máscaras.

Com o intuito de obter alta resolução, filmes com pequena espessura são depositados. Isto lhes confere uma baixa sensibilidade e baixa uniformidade de densidade óptica para níveis pequenos de exposição. Esta é uma das propriedades a serem observadas na determinação dos parâmetros de exposição. Outra propriedade está relacionada com o espalhamento de imagem, conforme foi visto na secção 3.2.

As principais características das PAR usadas no laboratório são as mostradas na figura 2.15^{25,30}.

Tendo-se em vista a grandeza das dimensões mínimas envolvidas em uma máscara, especialmente nas matrizes finais, todas as etapas, e facilidades são implantadas observando-se critérios de limpeza especiais, tanto dos reagentes, como da água e do ambiente. Para isto foi instalado um sistema de água deionizada para 18 MQ/cm³ e uma estação de processamento sob fluxo laminar.

Ainda do ponto de vista do uso em microeletrônica, um outro fator importante a ser observado é o controle dos processos. Variações na exposição-tempo ou

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS PLACAS DE ALTA RESOLUÇÃO

- Características físicas do vidro

- índice de refração: $1,516 \pm 0,005$, $p/\lambda = 589,3$ nm
- transmissão espectral: $\approx 90\%$ $p/\lambda = 350$ a 600 nm.
- estabilidade (têrmica) dimensional: 8.1×10^{-6} cm/ $^{\circ}$ C.
- elasticidade (módulo de Young): 70×10^9 N/m²
- dureza (Mohs): 5,5 - 6,5
- condutividade térmica: 0,96 W/m a 49° C
- calor específico: 0,205 na faixa de 0 a 100° C
- espessura padrão: 1 mm (outros: 0,8; 1,2; 1,5; 2; 3; 5 e 6 mm)
- dimensões laterais (dimensões laterais para microeletrônica): $2^{1/2} \times 2^{1/2}$ pol²
outras (2 x 2; 3 x 3; $3^{1/2} \times 3^{1/2}$; 4 x 4; 4 x 5) pol².
- Paralelismo: Tipo "Ultra Flat" - $3,5 \times 10^{-4}$ pol x diagonal
Tipo "Precision Flat" - $3,5 \times 10^{-5}$ pol x diagonal.

- Características da emulsão

- poder de resolução³⁴: maior que 2000 linhas/mm
- classificação do contraste: extremamente alto
- espessura da emulsão - 6 μ m antes da revelação
- 4 μ m após a revelação
- curva sensitométrica: vide fig. 2.15

Figura 2.15 - Resposta sensitométrica das FAR - Sensitividade é definida como sendo igual ao inverso da exposição (erg/cm²) necessária para produzir a densidade de 2.0 acima do nível de referência ("gross fog") quando a emulsão é processada com revelador HRP, dil. 1:4 por 5 minutos a 20° C, sob contínua agitação.

ou intensidade da fonte, na temperatura e tempo de revelação tem efeitos apreciáveis nas pequenas dimensões das configurações de uma imagem revelada.

Para o controle de exposições e tempos de processamento, temporizadores são disponíveis. A temperatura dos reagentes foram controladas em "Banho-Maria" a $(20 \pm 0,1)^{\circ}\text{C}$.

Por ser impraticável a quantização dos efeitos de oxidação (envelhecimento) e uso, reveladores recém-preparados foram usados no processamento. Em largas produções e uso continuado regras práticas baseadas nas características particulares de cada laboratório podem ser estabelecidas, indicando-se um incremento médio no tempo de revelação por número de placas reveladas, por dia de uso.

As sequências completas e parâmetros adotados são descritos nas refs. 21 e 22.

Para os propósitos deste trabalho os fatores condicionantes da definição dos parâmetros de processos das PAR foram além do acima citado:

- Determinação da densidade óptica adequada, tendo em vista o controle do erro de dimensão por espalhamento - secção 3. - e contraste mínimo necessário para definição das janelas.
- Ajustar os parâmetros da exposição - (AN e tempo de exposição em função da fonte de luz - que conduza ao valor de densidade óptica estipulado, segundo as regras de processamento recomendado pelo fabricante das PAR.

2.4.1. Sensibilização das PAR na Fotorredução

As matrizes intermediárias são obtidas em PAR através da fotorredução. As reduções padronizadas para esta etapa são as de 10X e 20X, que empregam as objetivas de f igual a 250 e 150 mm; e (AN) igual a (1:8,0) e (1:5,6) respectivamente.

A quantização do nível de sensibilização de emulsões é definida pela energia integralizada na unidade de área, denominada "exposição"²⁷ (H), ou seja

$$H = I \cdot t \quad (2.5)$$

se I é constante. I representa a densidade de energia luminosa no elemento de área e t o tempo em que este fica exposta.

Se (AN) é a abertura numérica da objetiva em uso, pode-se escrever que

$$H(D = D_0) \propto t / (\text{AN})^2 \quad (2.6)$$

onde D_0 é o valor previamente definido de densidade óptica.

Visto que o poder da resolução cresce à medida que (AN) decresce, o menor valor possível em cada caso foi usado.

A constante de proporcionalidade depende da fonte usada. Assim, para cada redução, foi determinado o valor de t que conduzisse ao valor desejado da den

sidade óptica.

A fonte de luz da fotorredutora HLC consiste de uma bateria de 40 lâmpadas fluorescentes de 40W/lâmpada, montadas em um suporte de $1,6 \times 1,6 \text{ m}^2$. Frontalmente existem um difusor e um filtro de faixa estreita centrada em 5460 \AA .

2.4.2. Sensibilização com a Fotorrepetidora

Na sensibilização das PAR com a fotorrepetidora o tempo de exposição é o tempo de duração da emissão pela lâmpada de xenônio (tempo de disparo) uma vez que (AN) da objetiva da fotorrepetidora é fixa; por isto a exposição é definida em função da energia (E) armazenada no capacitor (C) de excitação da lâmpada ou seja:

$$E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_f^2) \quad (2.7)$$

onde V_1 e V_f representam o valor da tensão no capacitor antes e depois do disparo respectivamente.

Utilizando-se um capacitor com capacitância igual $2700 \mu\text{F}$ foram obtidos os dados constantes da Tabela 2.4, donde retirou-se os dados para a construção do gráfico da fig. 2.16.

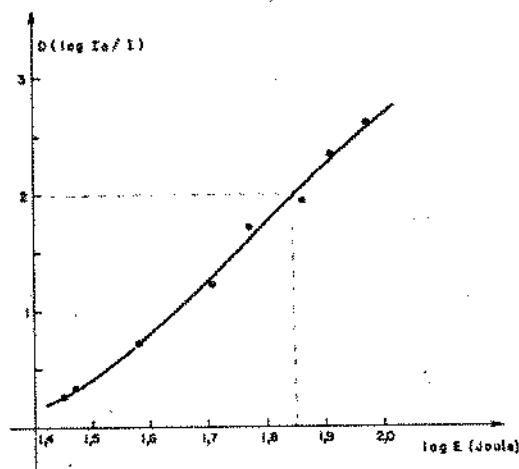


Figura 2.16 - Gráfico da densidade óptica \times energia de excitação da lâmpada.

Por interpolação o valor de energia que corresponde a $D_0 = 2$, de terminou-se o valor da capacitância. A tensão de alimentação é, após a retificação (v_i de fig. 3.22)

$$V_i = 220 \times \sqrt{2}$$

$$V_i = 310$$

Testes preliminares mostraram que, tipicamente

$$V_F = 55 \text{ Volts}$$

portanto

$$\begin{aligned} C &= 2 \cdot E_0 / (V_i^2 - V_F^2) \\ &= 2 \cdot \exp(1,85) / (310^2 - 55^2) \\ &= 1600 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Eventuais ajustes nos valores obtidos para a densidade óptica podem ser facilmente alcançados através de associação de capacitores. A ref. 31 descreve os detalhes de operação da fotorrepetidora.

2.3.4. O Processamento das PAR

O processo de revelação das PAR é feito através de revelador específico denominado HRD (High Resolution Developer), da Kodak. Métodos manuais e automáticos de processamento têm sido discutidos.^{32,33}

A preparação do revelador consiste em diluir o conteúdo dos frascos na proporção de 4:1. O tempo de revelação recomendado para a temperatura de 20°C é 5 min. Fora dessa condição o tempo é estabelecido pela curva abaixo²⁵.

Figura 2.17 - Tempo de revelação das PAR.

A solução preparada é filtrada através de filtros com porosidade de 0,5µm da Millipore.

O controle de temperatura é local, tipo "Banho-Maria" através do controlador FANEM, mod. provido de agitador e resolução de controle de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Um aparelho de ultra-som é empregado na etapa final de enxaguamento com álcool metílico, usado para secagem rápida da emulsão, apressada por um jato suave de nitrogênio limpo e seco.

CAPÍTULO III

A FOTORREPETIDORA - CONCEITOS FUNDAMENTAIS E DESENVOLVIMENTO

3.1. Propriedades Gerais

Várias são as concepções possíveis de fotorrepetidoras que empregam a luz visível para formação de imagens em emulsões fotográficas, em decorrência dos princípios gerais da óptica utilizada, das opções do sistema de iluminação e da arquitetura; porém, basicamente uma FR é constituída das seguintes partes (Fig. 3.1) sistema de iluminação; sistema de alinhamento de marcas de referência - retículos - (xy θ) que contém o "plano de objeto", objetiva de alto poder de resolução, mesa posicionadora xy, que contém o "plano de imagem". O sistema de iluminação incide um feixe convergente sobre a transparência (MI), cuja imagem reduzida por um fator R é focalizada no sensor (PAR)

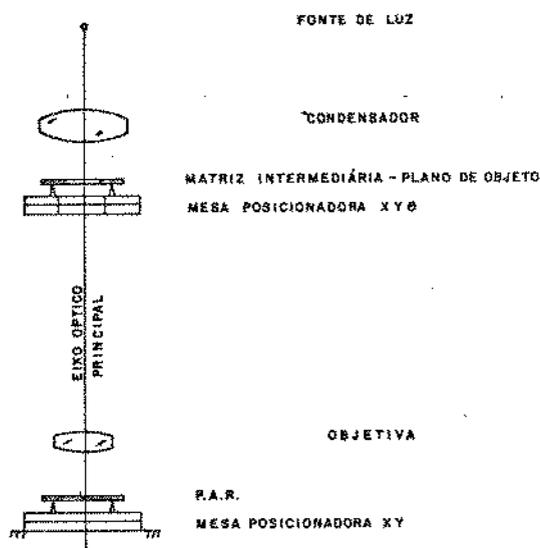


Figura 3.1 - Esquemática da óptica da fotorrepetidora.

em cada coordenada xy pré-estabelecida.

A grandeza das dimensões a serem reproduzidas (μm) é a característica que impõe as restrições mais críticas ao projeto da FR, quer do ponto de vista da óptica, da arquitetura e da confecção das peças. Decorrentes disso, ressaltam-se os seguintes requisitos estruturais:

- Devem ser coincidentes os eixos ópticos da objetiva e do sistema de iluminação;
- devem ser mantidos perpendiculares ao eixo óptico para qualquer coordenada posicionada e qualquer ajuste de alinhamento, os planos de objeto e de imagem, bem como a distância que os separam de modo que as aberrações sejam mantidas ao mínimo e a imagem no estreito campo de foco.

Foram usados os princípios da óptica geométrica clássica para es-

tabelecer as posições relativas dos elementos, fator de redução, medidas de características, erros e definições.

3.1.1. Alinhamento, Posicionamento e Erros

O alinhamento e o posicionamento das configurações geradas na fotorepitação são fatores de fundamental importância na confecção de máscaras. O funcionamento previsto dos dispositivos dependem de rigorosa superposição das áreas de aplicação de processos em todas etapas de fabricação. Para isto, as MIs são alinhadas segundo uma mesma referência na FR - o que garante a orientação das configurações - o posicionamento do suporte do filme em cada coordenada deve ser tão preciso quanto possível - o que garante a posição relativa.

Os desvios correspondentes são conhecidos como erro de alinhamento e posicionamento respectivamente. O módulo desses erros limitam, por um lado, o nível de integração ou a capacidade de realizar menores dispositivos, visto que a margem de tolerância tem que ser aumentada e, por outro, a performance, em decorrência, do desvio em relação à configuração prevista pelo projeto. Os seus efeitos foram ilustrados na fig. 2.2. Observa-se, com respeito ao alinhamento: o erro de rotação resultante na imagem é o próprio erro da incerteza na superposição das marcas de alinhamento e referência. No erro de translação, o centro da imagem projetada estará afastado do eixo óptico pelo fator $(\Delta x/R)$; $(\Delta y/R)$ sendo (Δx) ; (Δy) o erro de centralização da referência em relação ao eixo óptico. No primeiro caso, uma grande separação entre as marcas de alinhamento das MIs tornam o erro insignificante. No segundo caso o efeito principal é deslocar todas as configurações para o sentido oposto ao deslocamento, porém as posições relativas são mantidas assim, basta apenas a utilização das marcas de alinhamento fino através das quais uma compensação pode ser feita.

3.1.2. Objetivas - Conceitos e Propriedades Associadas

As objetivas são, naturalmente, os elementos centrais dos equipamentos geradores de máscaras. A precisão nas dimensões e nas formas das configurações dependem, em primeira ordem, de suas características. Aqueles fatores são fundamentais para o funcionamento dos dispositivos fabricados, especialmente, quando estão envolvidas as minutas dimensões.

Pelas suas propriedades desejam-se modelar as imagens quanto às dimensões mínimas, precisão de dimensões e de formas e distribuição luminosa no plano de foco.

3.1.3. A Resolução^{27,35}

A resolução de uma objetiva caracteriza a sua capacidade de distinguir pontos ou linhas vizinhas e, em consequência, a reprodução com fidelidade de pequenas configurações. O limite é imposto pela combinação dos efeitos de difração da luz e

parâmetros tecnológicos*.

Difração ocorre sempre que uma frente de onda é bloqueada parcialmente por algum obstáculo; nas objetivas esse anteparo é a pupila de saída, cujo diâmetro está relacionado com a abertura numérica (AN). O limite de resolução para uma objetiva pode ser diretamente relacionada com a resposta impulsiva do sistema,³⁶ cuja forma é mostrada na fig. 3.2. É possível mostrar que o valor de r obedece à seguinte relação,³⁷ para as objetivas limitadas por difração:

$$r = 1,22 \cdot \lambda \cdot (NF) \quad (3.1)$$

onde

$$(NF) = 1/(2(AN)) \quad (3.2)$$

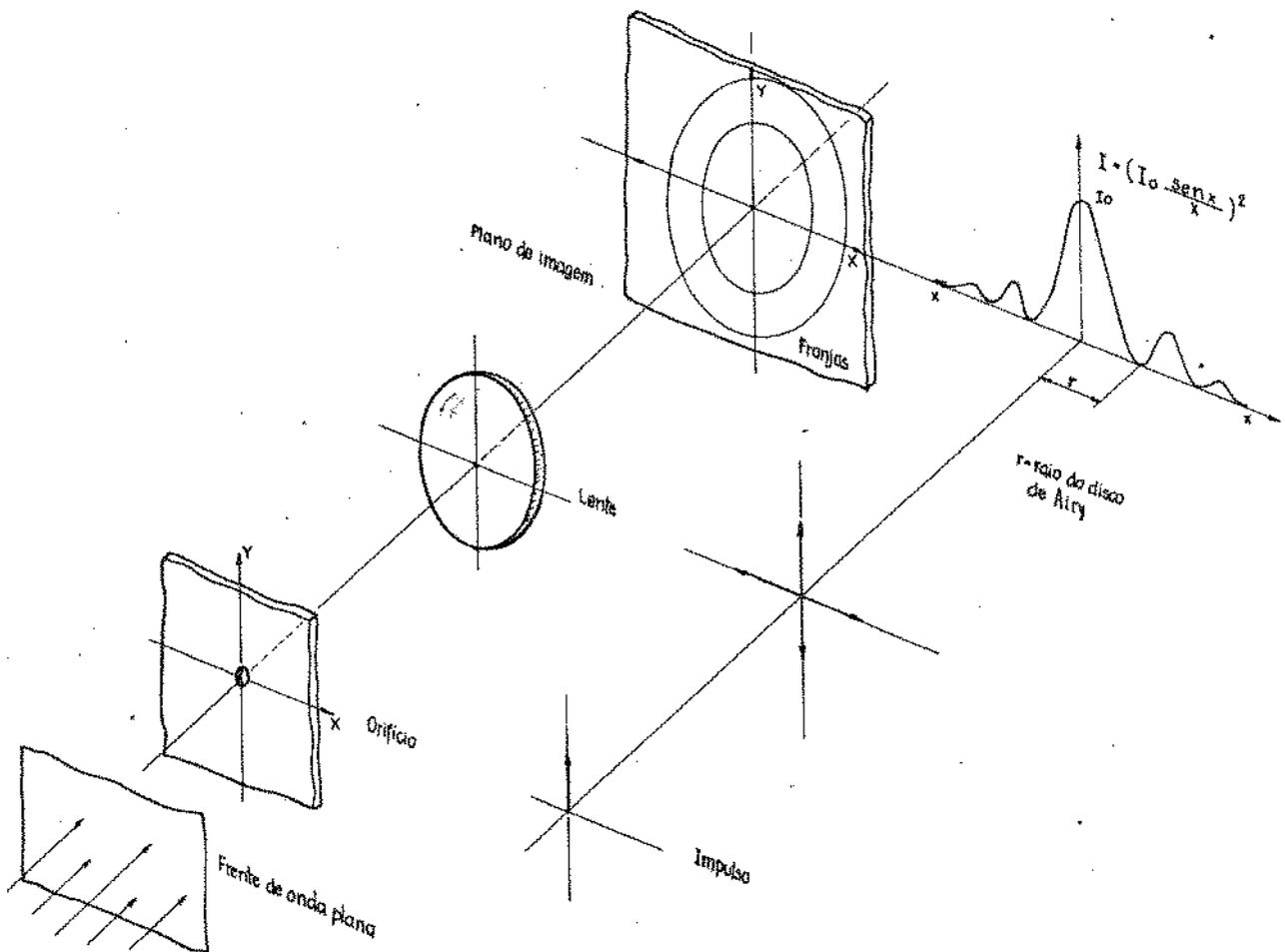


Figura 3.2 - Resposta de uma lente a um impulso luminoso.

*As técnicas e materiais disponíveis atualmente usados na fabricação de objetivas especiais praticamente deixam o sistema limitado por difração.

Esta equação nos fornece um critério para avaliação comparativa da resolução entre objetivas diversas ou diferentes condições de uso de uma mesma objetiva. Consideram-se resolvidas imagens vizinhas de duas fontes ou linhas (de mesma intensidade) quando o máximo do espectro de uma delas coincidir com o primeiro mínimo da outra. Observa-se, portanto, que a resolução cresce com o aumento de AN e com a diminuição do comprimento de onda.

3.1.4. Coerência e Interferência - Efeitos na Formação da Imagem

A precisão da imagem formada por um sistema óptico depende do grau de coerência espacial do campo de irradiação.^{35,38} Se a iluminação empregada apresentar coerência espacial então ocorre interferência entre as frentes de onda resultantes, notadamente as de regiões próximas e a superposição pode melhorar ou degenerar a definição da imagem final.

Considere-se o caso da formação da imagem de uma linha opaca por uma objetiva. O perfil de iluminação no plano de imagem é formalmente descrito pelas equações³⁹.

$$I(x,y) = \iint \tilde{h}(x,y) \tilde{h}^*(x,y) U_e(x,y) U_e(x,y) dx dy \quad (3.2)$$

para o caso incoerente, e

$$I(x,y) = \left| \iint \tilde{N}(x,y) U_e(x,y) dx dy \right|^2 \quad (3.3)$$

para o caso coerente, onde $U_e(x,y)$ representa a amplitude complexa da radiação no objeto e $h(x,y)$ a resposta impulsiva do sistema óptico. Supondo a objetiva limitada por difração e considerando a distribuição unidimensional são obtidas as respectivas soluções

$$I(\xi) = \left| 1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \text{Si} \left[2\pi \left(\xi + \frac{A}{2} \right) \right] - \text{Si} \left[2\pi \left(\xi - \frac{A}{2} \right) \right] \right\} \right|^2 \quad (3.4)$$

$$I(\xi) = 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \text{Si} \left[4\pi \left(\xi + \frac{A}{2} \right) \right] - \text{Si} \left[4\pi \left(\xi - \frac{A}{2} \right) \right] - \frac{1 - \cos \left[4\pi \left(\xi + \frac{A}{2} \right) \right]}{4\pi \left(\xi + \frac{A}{2} \right)} + \frac{1 - \cos \left[4\pi \left(\xi - \frac{A}{2} \right) \right]}{4\pi \left(\xi - \frac{A}{2} \right)} \right\} \quad (3.5)$$

onde: $\xi = \beta (AN) \quad \lambda m$

$$\text{Si}(x) = \int_0^x \frac{\text{sen} x \, dx}{x}$$

β = coordenada na imagem

m = fator de ampliação da lente (l/R)

A = largura da linha "objeto"

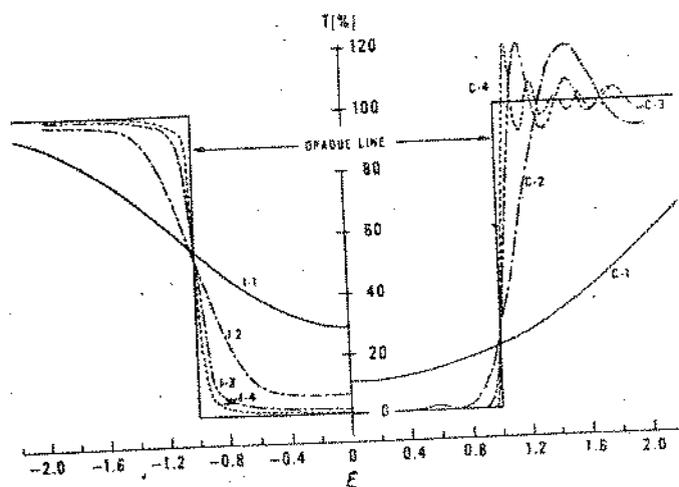
(AN) = abertura numérica

λ = comprimento de onda da irradiação

nos casos extremos de presença ou ausência de coerência espacial.

Essas funções são plotadas⁴⁰ via computador na Fig. 3.3 para diferentes larguras de linhas, normalizadas segundo o parâmetro ξ . As curvas C_1 e I_1 representam a imagem de uma linha menor que a capacidade de resolução da objetiva, enquanto as demais estão acima do limite. Dois aspectos se evidenciam para os interesses deste trabalho.

- O máximo contraste na imagem decresce mais significativamente com a redução da largura das linhas reproduzidas com iluminação incoerente. Vide intercessão do eixo $\xi = 0$ com os mínimos dos perfis;
- a transição entre as regiões de máxima e mínima iluminação é mais acentuada no caso de coerência. Compare-se as declividades das curvas correspondentes na figura abaixo.



iluminação incoerente iluminação coerente

Figura 3.3 - Gráficos das soluções numéricas para as equações 3.2 e 3.3. Fonte: ref.⁴⁰

Como consequência dessas assertivas, tem-se nas imagens espaciais menores desvios dimensionais e bordas mais definidas no caso da iluminação coerente.

Por outro lado, a ondulação resultante na transição de mínima para máxima transmitância quando a iluminação for coerente, pode degenerar as imagens de estruturas periódicas em virtude da superposição de máximos ou mínimos secundários, cujas localizações são também influenciadas por desfocalização ou desalinhamento estrutural. A fig. 3.4 mostra testes preliminares obtidos com a FR. Foi usada como fonte incoerente uma lâmpada incandescente com um difusor (acrílico) e como fonte "coerente"* uma

* Na verdade, parcialmente coerente.

lâmpada incandescente encapsulada, projetando o feixe através de um orifício com $\varnothing = 3$ mm como um difusor. O desalinhamento foi provocado elevando-se cerca de 20 μ m uma das extremidades do objeto.

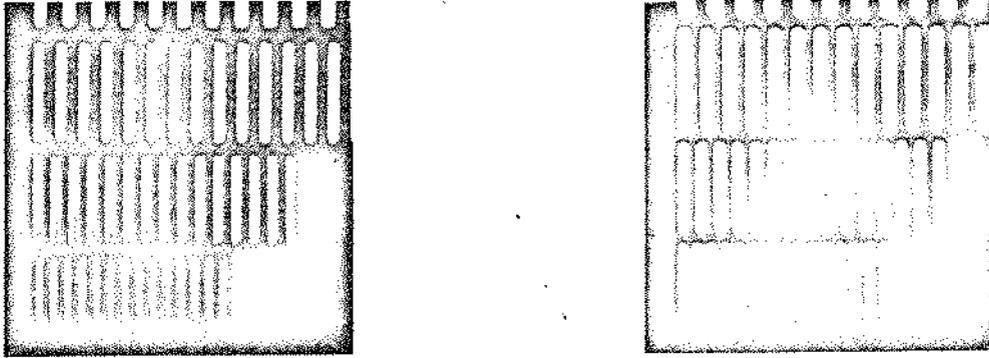


Figura 3.4 - Fotografias que ilustram os efeitos da iluminação a) coerente em figuras periódicas de pequena dimensão diante de desajustes do sistema óptico b) não coerente. Período no último grupo: 10 μ m. Foram selecionadas as melhores provas em função da possível desfocação.

Em vista das considerações acima optou-se por um sistema de iluminação com elevado grau de coerência espacial, o que implica em particularizar o sistema geral da Fig. 3.1 no que concerne aos princípios de formação de imagem. Isto está mostrado no diagrama da Fig. 3.5.

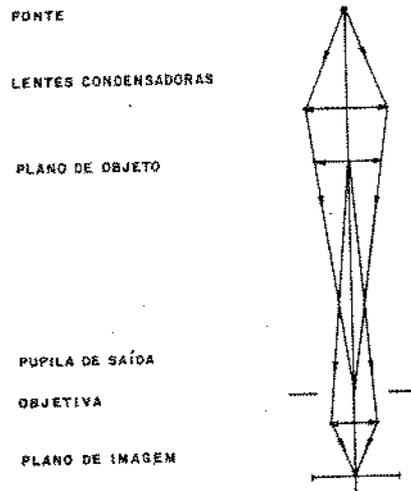


Figura 3.5 - Estrutura básica da óptica da fotorepetidora.

Neste arranjo, o primeiro grupo de lentes deve focalizar um feixe convergente, uniforme, delimitado pela área do objeto e focalizar a imagem da fonte ξ em um plano a ser determinado, situado entre os planos das pupilas de saída e de entrada. Na sua determinação são considerados em primeira ordem, os aspectos de uniformidade de iluminação e maior definição da imagem em toda sua extensão. No primeiro caso, a região uniforme da fonte quando focalizada de modo a casar com a pupila de saída, produz distribuição uniforme com o melhor aproveitamento de potência da fonte. No segundo caso, considere-se a resolução pelos princípios da óptica de Fourier: tem-se no plano de focalização da fonte, uma distribuição de campo em que a amplitude em cada ponto é uma transformada de Fourier*, cujo espectro se estende ao infinito em todas as direções. O diâmetro da pupila de saída da objetiva limita as componentes que contribuirão para a formação da imagem final. Para maior definição de pequenas configurações ou bordas, é necessário maior parcela de componentes de maior frequência espacial. Tal situação é alcançada se a imagem da fonte for focalizada no plano da pupila de saída; porém, dependendo da objetiva, o vinhetamento⁴¹ pode ocorrer, prejudicando as imagens periféricas, especialmente as pequenas. A posição ótima do sistema construído foi determinada pela análise das imagens obtidas para situações entre os limites mencionados através de um sistema de roscas que posiciona a fonte.

Uma outra vantagem da estrutura mencionada é que as características gerais da imagem (definição e geometria) formada dependem basicamente da objetiva.³⁹ Do condensador, apenas a aberração esférica tem efeito na deformação das imagens, porém não criticamente.³⁵ Assim este componente pode ser fabricado no país.

3.1.5. Produtividade de Foco e de Campo²⁴

- Efeitos de desvios dimensionais nos planos objeto e imagem.

Diz-se que uma imagem se encontra em foco sobre um filme quando o círculo de intercessão do feixe com o plano do sensor não prejudicou a qualidade esperada da imagem. Na Fig. 3.6, $2d'$ representa a profundidade de foco e a variação de posição correspondente no plano objeto (P) que produz no plano do sensor o círculo de mesmo diâmetro (ρ) é denominado de profundidade de campo. Por trabalhar no sentido de redução a profundidade de campo é bem maior que a profundidade de foco. Vide eq.3.9.

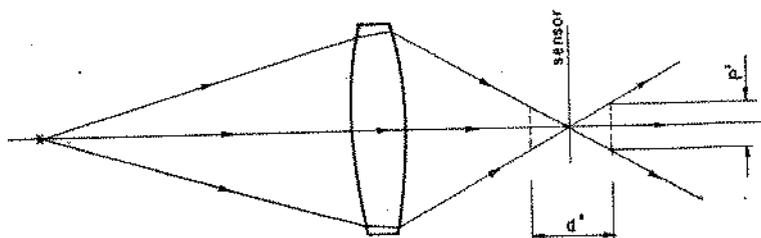


Figura 3.6 - Diagrama para definição da profundidade do foco.

* da configuração do objeto.

Uma maneira de quantizar-se aquele critério (arbitrário) é considerar-se o diâmetro do círculo, ρ' , como o limite de resolução da objetiva pelo efeito de difração conforme a equação 3.1. Disto é possível mostrar-se²⁴ que:

$$d' = 4\lambda (NF)^2 \quad (3.6)$$

Esta é uma condição que impõe uma margem bem estreita de tolerância no projeto; no nosso caso, $\lambda = 0,546 \mu\text{m}$, $(NF) = 1,8$; portanto $d' = 7 \mu\text{m}$. Dentro desse limite deverá ser mantida a variação de distância entre a objetiva e a emulsão, para qualquer coordenada posicionada levando-se em conta ainda as variações de planicidade e espessura das PARs.

A contribuição de desvios dimensionais no sistema de alinhamento para a desfocalização da imagem pode ser analisada considerando-se as equações que estabelecem as posições (v) da imagem e (u), do objeto em relação aos planos principais da objetiva.

$$u = f (R + 1) \quad (3.7)$$

$$v = f (1/R + 1) \quad (3.8)$$

Variações em v , devido a pequenas variações em u , podem ser obtidas pela aproximação diferencial

$$\frac{\Delta v}{\Delta u} = \frac{dv}{du} = \frac{dv}{dR} \times \frac{dR}{du} = -\frac{f}{R^2} \times \frac{1}{f} = -\frac{1}{R^2}, \quad (3.9)$$

p.ex., desvio de $10 \mu\text{m}$ em u alteraria a posição do plano de foco em aproximadamente $0.4 \mu\text{m}$ para $R = 5$. Este limite foi adotado como tolerância máxima para a manutenção da posição relativa de MI para o sistema de alinhamento de retículos em todo campo de movimento.

3.1.6. Resolução Útil do SGM

A resolução útil do SGM para as etapas de abertura de janela ou definição de difusões é aquela traduzida pela menor largura de linha aberta do SiO_2 ²¹. Independentemente da qualidade da própria matriz fotorrepetidora os processos de exposição do fotorresiste e do ataque químico ao SiO_2 limitam a resolução útil. O espalhamento da luz e a formação de ondas estacionárias sensibilizam o fotorresiste além das reações previstas²¹. A determinação de espessura e tempo de exposição mínimas e o uso de iluminação colimada minimizam seus efeitos. Visto que a velocidade de ataque ao SiO_2 é a mesma para qualquer direção, a menor largura de janela aberta Fig.3.7 está limitada por um valor ligeiramente maior que $2.t_{ox}$. Dependendo da etapa do processo, valores de 500 a 10.000 \AA são usados.

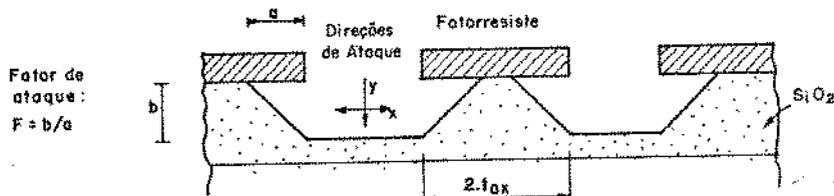


Figura 3.7 - Limitação da fotografação devido a espessura do óxido. A tira central de fotorresistivo temina por ser eliminada.

3.1.7. Cartas de Resolução^{37,42}

As cartas de resolução são ferramentas muito úteis na avaliação de características dos processos de fotografação. Elas são constituídas por configurações adequadas para medidas de resolução das objetivas e análise dos efeitos de processos como focalização, espalhamento, efeitos de borda, fator de redução, arredondamento dos cantos e a resolução útil. Devem apresentar transição abrupta de contraste, regularidade das bordas e precisão de dimensões.

A que se utiliza no LED-Fig. 2.13 é constituída de 11 grupos de 15 linhas iguais, tais que a relação entre as dimensões das linhas de um grupo e do consecutivo vale $\sqrt[3]{10}$. O original foi construído em Rubylith de modo que a1 obtendo-se exemplares reduzidos através da fotorreduzidora e fotorrepetidora, usando no primeiro caso a objetiva micro NIKKOR $f = 150$, para $R = 20x$ por ser de maior poder de resolução nessa etapa intermediária. Adotou-se esse padrão porque marcas de referência bem espaçadas e a periodicidade permitem a medida de fatores de redução com a precisão objetivada isolando-se o efeito de espalhamento de imagem consequentes de erros no controle de processos; além do que a periodicidade pode indicar desajustes na montagem do equipamento pelo efeito da interferência conforme vimos anteriormente.

Grupo	Original (μm)	R=20x (μm)	R=100x (μm)	R=200x (μm)	R=500x (μm)
1	1.000	50,0	10,0	5,0	2,0
2	1.259	62,9	12,6	6,3	2,5
3	1.585	79,2	15,8	7,9	3,2
4	1.995	99,8	20,0	10,0	4,0
5	2.515	125,6	25,1	12,6	5,0
6	3.162	158,1	31,6	15,8	6,3
7	3.981	199,1	39,8	19,9	8,0
8	5.012	250,6	50,1	25,1	10,0
9	6.310	315,5	63,1	31,6	12,6
10	7.943	397,2	79,4	39,7	15,9
11	10.000	500,0	100,0	50,0	20,0

Figura 3.8 - A carta de resolução e as dimensões nominais correspondentes as barras, nas diversas reduções.

3.2. Caracterização da Estrutura Óptica

Com a finalidade de definir a distância entre os planos de objeto e de imagem, bem como a posição relativa da objetiva com a precisão requerida pelas características da FR foram medidos o comprimento focal da objetiva ULTRA MICRO NIKKOR e as posições relativas dos planos principais.

3.2.1. Medição do Comprimento Focal - Modelo Matemático

O procedimento adotado é derivado da Eq. (2.1) que relaciona a distância entre os planos de objeto e imagem com o comprimento focal e o fator de redução. Para duas situações diferentes de posição objeto-imagem, tem-se:

$$D_{t_1} = f (R_2 + 1/R_2 + 2) + \Delta h$$

$$D_{t_2} = f (R_2 + 1/R_2 + 2) + \Delta h$$

A variação da distância objeto-imagem observada está relacionada com os fatores de reduções da seguinte forma:

$$D_{t_1} - D_{t_2} = f (R_1 - R_2 + 1/R_2)$$

Considerando-se um objeto de dimensão fixa p , e as dimensões resultantes das imagens i_1 e i_2 pode-se reescrever a expressão acima como:

$$f = \frac{\Delta D_t}{\Delta i} \left(\frac{i_1 \cdot i_2}{i_1 \cdot i_2 - p} \right) \quad (3.10)$$

em que:

$$\begin{aligned} \Delta D_t &= D_{t_1} - D_{t_2} \\ \Delta i &= i_1 - i_2 \end{aligned}$$

Este método tem como principais vantagens a relativa simplicidade e boa precisão, pois o deslocamento relativo ΔD_t pode ser fixado por um bloco padrão; as dimensões da imagem em cada situação são obtidas através de microscópio de ocular filar, acoplado a um sistema de microposicionamento. Adicionalmente, observa-se que, se a dimensão do objeto for mantida constante, com a objetiva operando no sentido de reduzir a imagem, a propagação de erros é minimizada.

3.2.2. Localização dos Planos Principais e Pontos Focais

Tendo-se medido o valor de f utilizou-se um padrão conhecido para ajustar a distância objeto-imagem D_{tp} . Com a medida do fator de redução, Δh é obtido através da expressão:

$$\Delta h = D_{tp} - f \left(R + \frac{1}{R} + 2 \right) \quad (3.11)$$

A posição relativa é obtida pelo cálculo da distância entre a imagem e plano H', e pela medida da distância (R_1) entre uma referência na objetiva e o plano imagem - vide fig. 3.9

$$K_1 = v - k_r = f \left(\frac{1}{R} + 1 \right) - k_r \quad (3.12)$$

3.2.3. Equipamentos e Facilidades Empregados

Nas medidas acima mencionadas foram utilizados os seguintes equipamentos e facilidades:

- banco óptico⁴³
- microscópio de ocular filar
- ocular para pré-focalização
- relógio comparador
- blocos de medida padrão
- fonte de luz
- placas de alta resolução e laboratório fotográfico.

A utilização do banco óptico favorece o alinhamento dos eixos ópticos e manutenção do paralelismo entre os planos de objeto, imagem e planos principais, além de referências que facilitam o ajuste e medidas de distâncias.

As imagens são obtidas por projeção em PAR e, após processadas, medidas com o auxílio de microscópios. Uma ocular focalizada no plano de emulsão permite uma pré-focalização da imagem. A fig. 3.9 mostra esquematicamente o arranjo experimental utilizado.

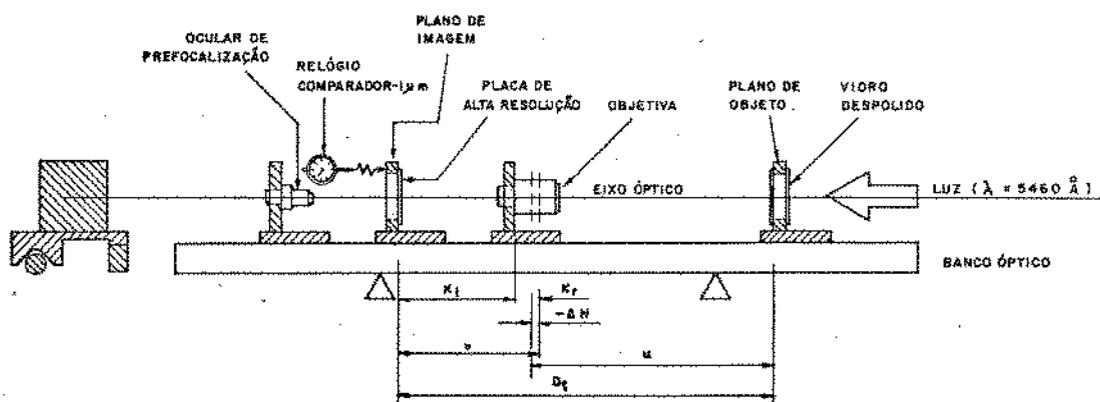


Figura 3.9 - Arranjo experimental para a caracterização da objetiva.

O relógio comparador é usado para medir pequenos deslocamentos até 1 mm, com resolução de 1 μ m.

O objeto é uma carta de resolução, cujas marcas de referência estão separadas de $(7,410 \pm 0,001)$ mm.

3.2.4. Procedimento Experimental - Resultados

De princípio estabeleceu-se uma posição inicial, a partir da qual foi obtida a pré-focalização da imagem com a ocular, deslizando-se o suporte da objetiva. Nesta posição são feitas diversas exposições, sendo que em cada uma o plano de imagem é deslocado de 5 μ m em relação à anterior, conforme o esquema abaixo. Após reve

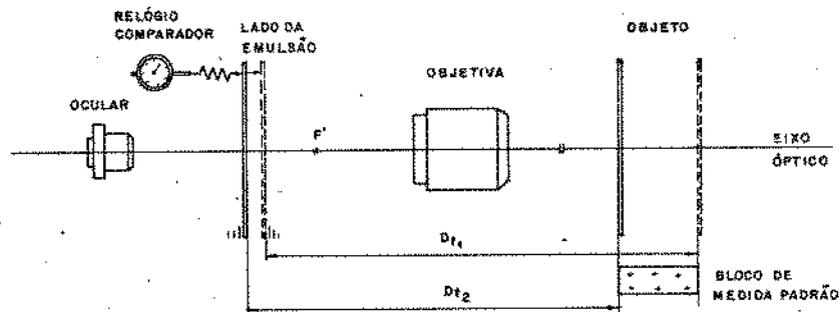


Figura 3.10 - Detalhe de localização dos planos objeto/imagem.

lada a imagem, a posição correspondente à melhor focalização é selecionada, e medidas as dimensões entre as marcas anotadas.

Uma nova posição é selecionada, repetindo-se em seguida o processo de focalização e a obtenção da imagem. A distância relativa entre as duas posições equivale à dimensão do bloco padrão, somada aos deslocamentos indicados pelo relógio comparador.

Usando-se um bloco padrão de 25.000 mm obteve-se os seguintes resultados para três situações:

i_1 (mm)	i_2 (mm)	f (mm)
1.398 ± 0.001	1.552 ± 0.001	49.69
1.552 ± 0.001	1.745 ± 0.001	49.78
1.745 ± 0.001	1.998 ± 0.001	49.65

O valor médio para f é selecionado

$$\bar{f} = 49.71 \text{ mm}$$

Com um padrão previamente calibrado, foi ajustada a distância objeto-imagem tal que $D_p = 251.12 \pm 0.01 \text{ mm}$. Como antes, foi feita a focalização, obtendo-se os seguintes valores: Relógio Comparador : $+55 \mu\text{m}$ e $R = 4,712$, do que resulta, pela aplicação da Eq. (3.11) em

$$\Delta h = -38.1 \pm 0.5 \text{ mm}$$

Nota-se pelo sinal negativo, que a posição dos planos HH' é invertida. Na medida da posição relativa dos planos principais é mantido o arranjo do procedimento acima. Para alguma das situações acima, toma-se a distância do plano imagem até uma referência na objetiva p. ex., encosto da rosca externa. Subtraindo-se esse valor do valor de v , previsto pela Eq. 3.8 obtêm-se:

$$v = 61.43 \text{ mm}$$

$$k_r = 49.16 \text{ mm}$$

$$k_i = 12.27 \text{ mm}$$

A fig. 3.11 condensa os resultados que caracterizam a objetiva, em termos dos pontos e planos principais.

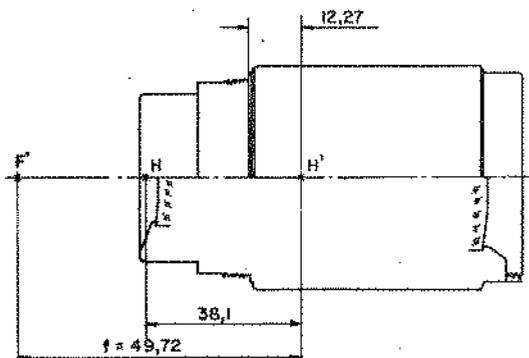


Figura 3.11 - Posição relativa dos planos e pontos principais. Distâncias em mm.

3.2.5. Determinação da Distância Objeto-Imagem para a FR e Posição Relativa da Objetiva

Com os dados obtidos acima, a distância entre os suportes de objeto e imagem e a posição relativa da objetiva podem ser determinados para o fator $R = 5x$, em vista. Os resultados são mostrados na Fig. 3.12 obtidos pela aplicação das eqs. (2.1) e (3.8).

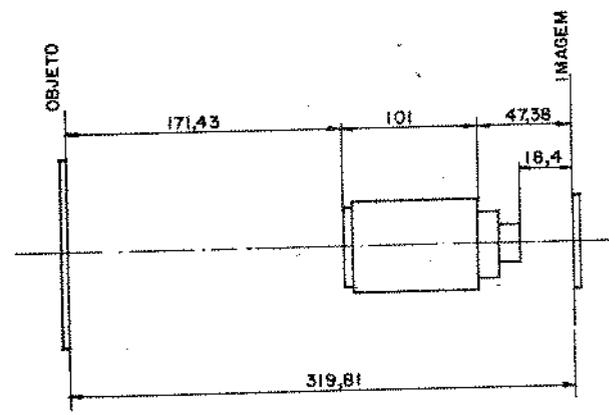


Figura 3.12 - Posição relativa dos planos de imagem e objeto para $R = 5X$, para a fotorrepetição.

3.2.6. O Sistema de Iluminação

Observou-se na secção 3.1.4 que a utilização de iluminação coerente ou parcialmente coerente pode melhorar a resolução e definição de micro-imagens. Fontes com elevado grau de coerência poderiam ser obtidas através de sistemas de laser o

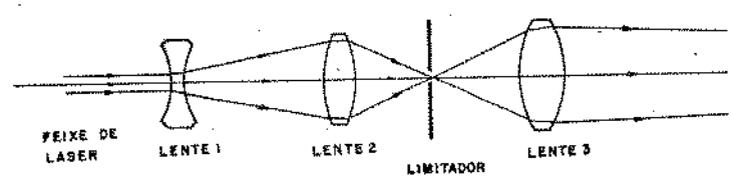


Figura 3.13 - Possível estrutura de um iluminador.

qual procuramos evitar em vista dos propósitos anteriormente citados.

Uma maneira relativamente simples elaborada para lograr-se considerável grau de coerência e possível de ser construído usando-se as facilidades disponíveis pelo laboratório, emprega um condensador cônico, em que o orifício de saída de pequeno diâmetro funciona em termos práticos como uma fonte quase puntual. Williamson⁴⁹ foi quem primeiro analisou a concentração de luz por tubos cônicos.

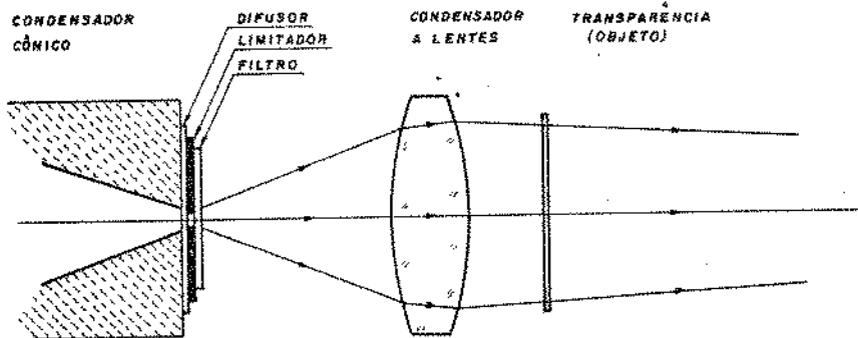


Figura 3.14 - Esquemática de um sistema iluminador que emprega um condensador cônico.

O condensador cônico de superfícies internas polidas concentra a irradiação de uma lâmpada de xenônio excitada por descarga capacitiva, no pequeno orifício à frente do qual existe um difusor. Este uniformiza a distribuição luminosa irregular e um filtro de faixa estreita e centrada no valor que otimiza a performance da objetiva, monocromatiza a irradiação. Finalmente um condensador a lentes focaliza o feixe segundo as conveniências anteriormente citadas.

Uma vantagem desse sistema é a grande eficiência do iluminador pois a maior parte da energia luminosa gerada alcança o orifício após sucessivas reflexões. O controle da energia de exposição adequada é facilmente obtido em função da capacitância C ou da tensão armazenada neste ($E = 1/2 CV^2$), resultando em uma relação direta com a densidade óptica, visto que a exposição ou sensibilização dos filmes é caracterizada pela energia integralizada por unidade de área; não sendo preciso, portanto, conhecer a forma da onda de corrente e o tempo de emissão do pulso luminoso.

O Condensador Cônico

Os condensadores cônicos foram bastante estudados em trabalhos relacionados com fibras ópticas, para investigar perdas por reflexão⁴⁵. No LED foi usado um condensador desse tipo em sistema projetor de configurações para compor imagens sensibilizando filmes de baixa velocidade - ver ref. 22.

Na Fig. 3.15 os raios compreendidos pelo θ atingem a saída após um certo número de reflexões, os demais são refletidos na direção oposta, que ao alcançar o espelho esférico são novamente dirigidos à saída. Observa-se ainda nesta figura, que se situarmos a área transversal de maior emissão da lâmpada em um plano P tal que a imagem desse plano se forme em torno do orifício de saída, o total das perdas ocorridas em reflexões são minimizadas. A posição daquele plano se si

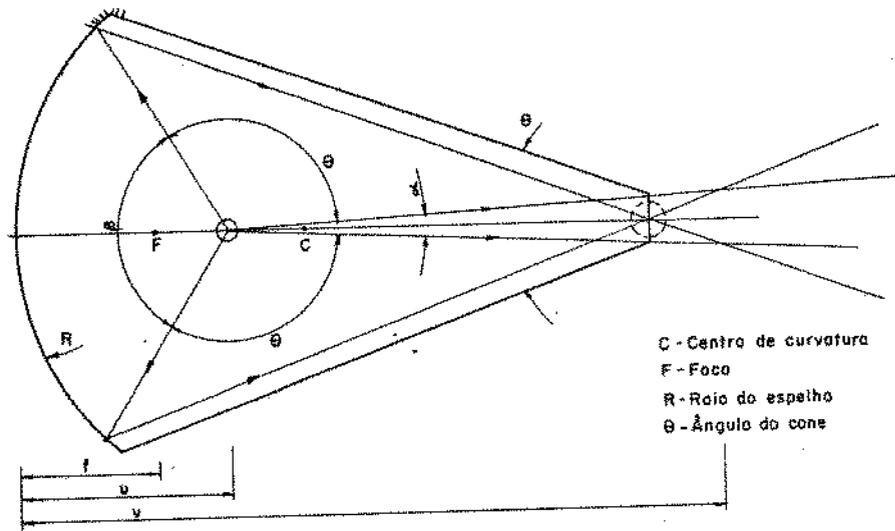


Figura 3.15 - Localização dos principais raios no condensador cônico.

tua entre o foco e o centro óptico do espelho esférico, a qual é determinada pela conhecida equação dos pontos conjugados cujas variáveis estão definidas na fig. 3.15.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad \therefore u = \frac{fv}{v-f} \quad (3.13)$$

Construção do Cone e Espelho Refletor

Algumas dificuldades técnicas impõem restrições ao desenho do cone. A profundidade, o ângulo de corte e vibrações da ferramenta e a dificuldade de polimento limita o diâmetro do orifício de saída e a qualidade da superfície refletora. O peso deve ser considerado se as dimensões forem grandes. Outro fator é a construção da superfície esférica. A figura 3.16 ilustra o método utilizado: A combinação dos movimentos giratórios do platô e da ferramenta de desbaste cuja ponta deve passar pelo eixo de giro do platô, definem uma superfície quase esférica.

Em vista das facilidades disponíveis no LED, e as dimensões da lâmpada foram adotados os seguintes valores:

- Raio do espelho $r = 60\text{mm}$.
- Orifício da saída $\phi = 2,5\text{ mm}$
- Comprimento vértice do espelho/orifício de saída: 125 mm.

O desenho de conjunto do sistema construído está mostrado na fig.

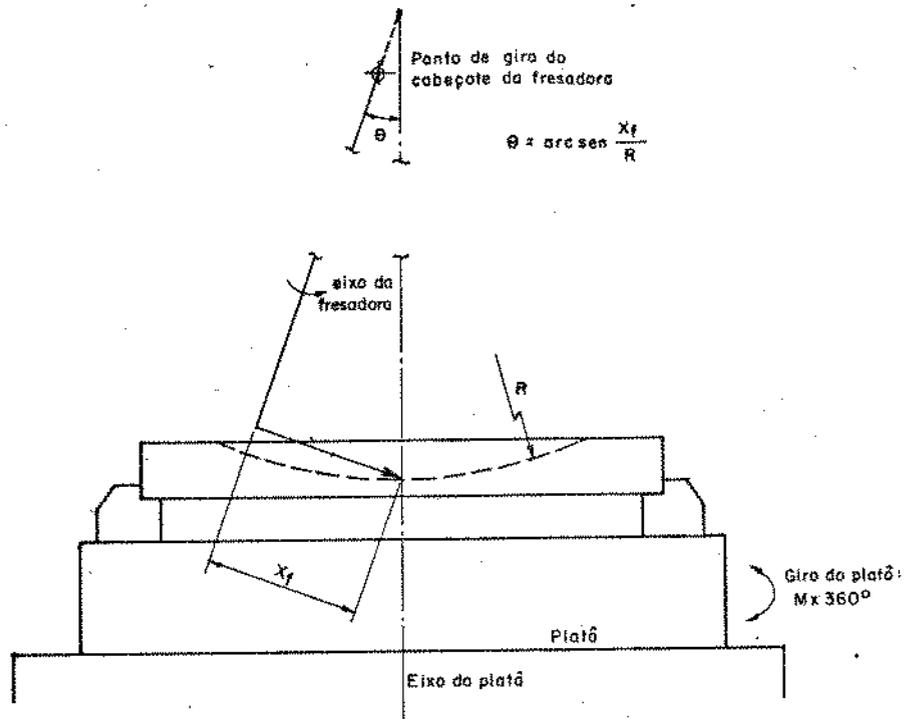


Figura 3.16 - Ilustração da técnica usada na construção do espelho esférico usando a fresadora.

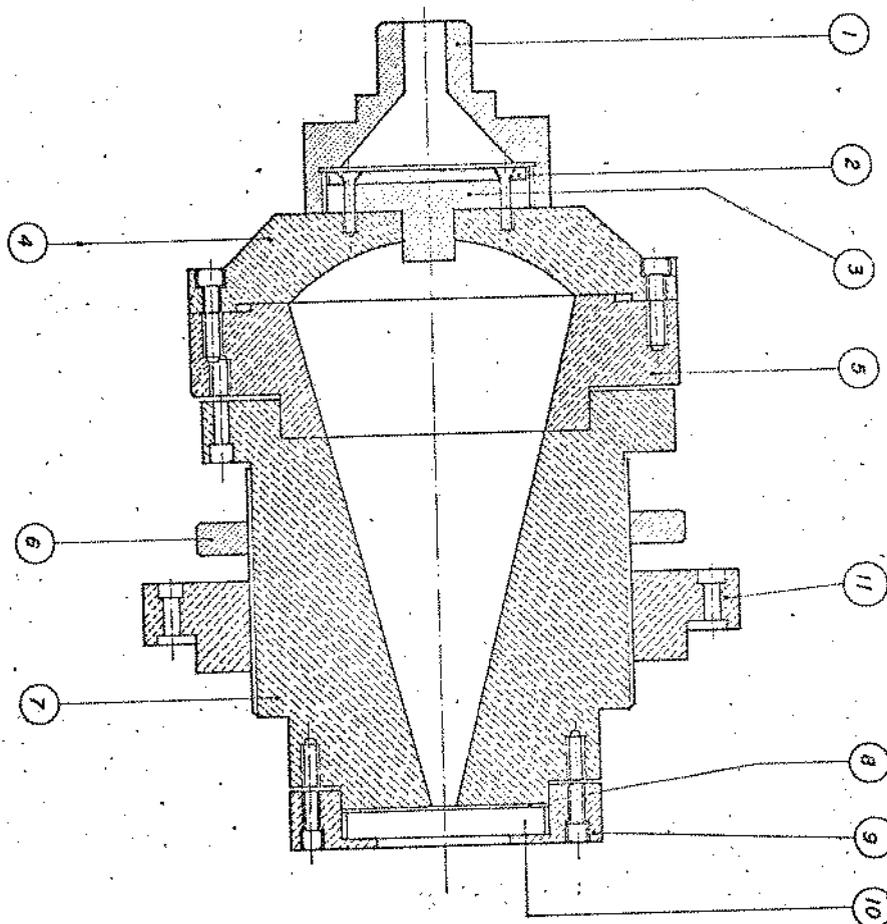


Figura 3.17 - Desenho de conjunto do condensador cônico.

Características do Conjunto Lâmpada-Difusor e Filtro

A lâmpada usada fabricada pela FRATA tem as seguintes características:

- modelo: B.21 cod. 1203001
- tensão de excitação: 15 KV
- potência nominal: 140W
- mínima tensão entre eletrodos: 240V
- máxima tensão entre eletrodos: 450V

A resposta espectral relativa típica para lâmpadas de xenônio de arco curto é como mostra a Fig. 3.18.

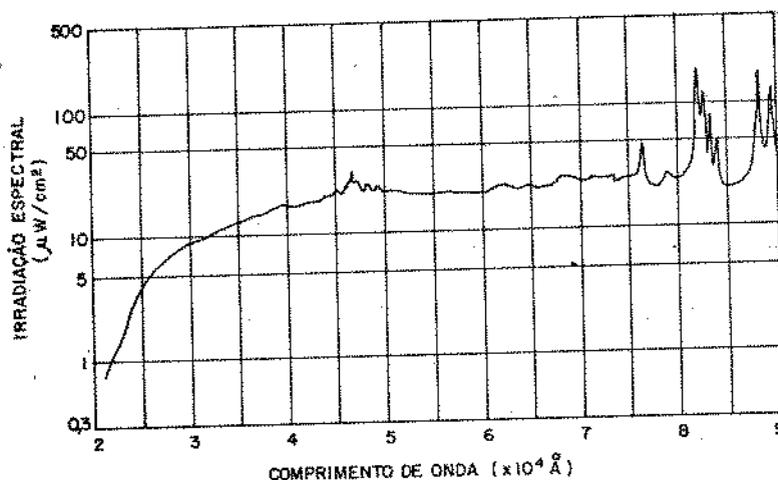


Figura 3.18 - Resposta espectral das lâmpadas de arco curto de xenônio. Fonte: Oriel Corp. Cat. 1975.

Como difusor foram usadas 2 lâminas de papel vegetal superpostas. A resposta espectral do conjunto filtro-difusor foi obtida com o espectrômetro SPEX II, e o resultado é mostrado na Fig. 3.18, juntamente com a curva resultante obtida a partir destas. O filtro usado é do tipo "filtro de interferência", da Oriel Corp., Mod. G-572-5461.

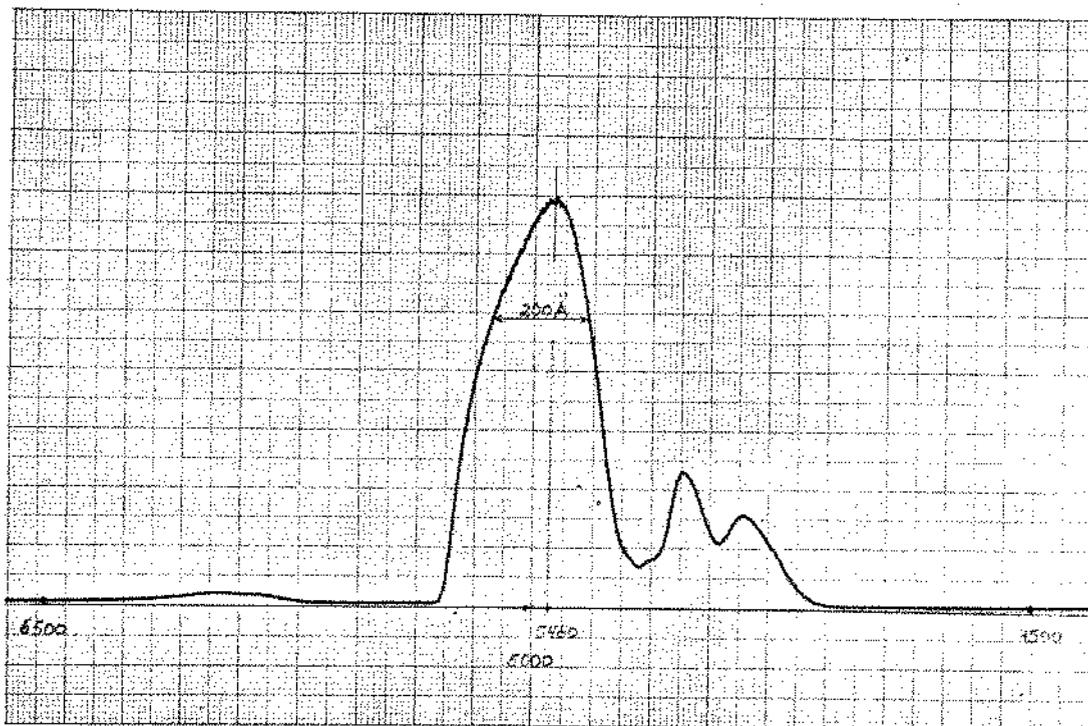


Figura 3.19 - Resposta espectral do iluminador completo da FR.

3.2.7. O Sistema de Disparo da Lâmpada

Para disparar a lâmpada, foi escolhido o sistema de descarga capacitiva cuja principal vantagem é a entrega de um valor bem controlado de fluxo luminoso em cada exposição, em um curto período de tempo (ν msec.). Com isto é evitado o uso de obturador, o que facilita posterior automatização do equipamento, caso seja desejada. Além disso, permite a determinação direta da exposição que resulta no valor pré-estabelecido de densidade óptica da imagem revelada, conforme visto no capítulo anterior.

Existem dois modos⁴⁶ pelos quais pode-se disparar lâmpadas de X_e , Fig. 3.20. Um deles é o excitador série em que o pulso de alta tensão é aplicado em série com a lâmpada; no outro, dito paralelo, a alta tensão é aplicada em um terceiro eletrodo que apenas enlaça o envólucro da lâmpada. Em ambos os casos o campo gerado pelo pulso de alta tensão excita o gás reduzindo sua resistividade, permitindo a descarga do capacitor pelo gás. A onda de corrente é bem semelhante a de um sistema de segunda ordem devido a presença do caráter indutivo de descargas gasosas⁴⁷. No sistema série a indutância do transformador de pulso é somada, o que tende a limitar o uso em sistemas tais como estrobos, no que diz respeito a máxima frequência de operação. Tendo em vista a simplicidade e por ter funcionamento menos crítico adotou-se o modo paralelo.

O capacitor é energizado através de um transformador. Nos testes preliminares, observou-se que disparos ocasionais apresentavam maior emissão de luz. Verificou-se que estes ocorriam quando o pulso de ignição se dava durante o ciclo positivo de tensão. Nesses instantes, a saída do transformador fica diretamente acoplada à lâmpada que recebe, portanto, maior energia por mais tempo.

Visto que um retardo de meio ciclo da rede no disparo não apresenta nenhum inconveniente no atual sistema, contornou-se o problema energizando-se o capacitor durante os ciclos positivos e forçando o disparo ocorrer apenas nos ciclos negativos. Com isto ganha-se ainda o prolongamento da vida útil da lâmpada. A Fig. 3.21 mos-

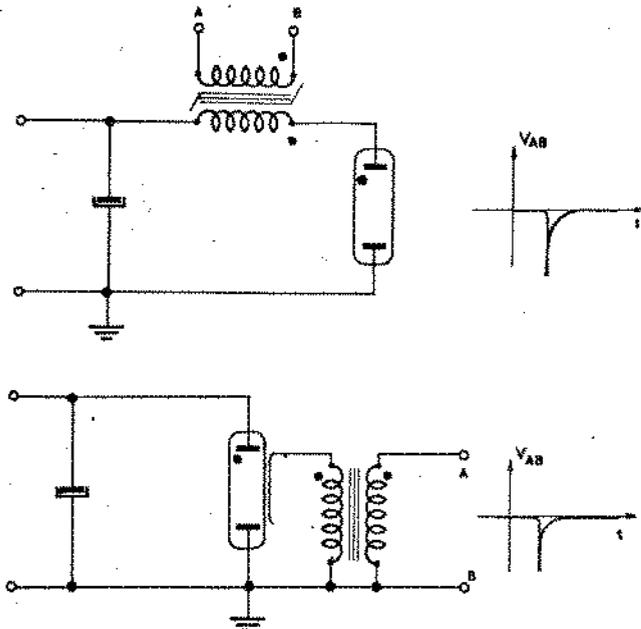


Figura 3.20 - Circuitos básicos, para disparos de lâmpadas de Xe a) tipo série b) tipo paralelo.

tra o circuito elétrico que completo, cumpre aquelas finalidades. A descrição do funcionamento do circuito é como segue.

Quando a chave que liga o sistema é acionada, o capacitor começa a energizar-se. Após um certo tempo (vide Fig. 3.21) determinado pela tensão, frequência da rede, e a constante $T = RC$; é atingido um valor pré-estabelecido V_c , quando, então, é acesa uma lâmpada de Ne indicando o momento a partir do qual pode-se disparar o flashe. Ao fazê-lo, através da chave CH_2 , o transistor T_1 satura caso a tensão no ponto A seja negativa em relação ao terra (B) e menor que 10 volts. A transição é vista como um pulso positivo aplicado entre a porta e catodo do SCR, que entra em condução, reduzindo a zero a tensão entre os pontos F e E, anteriormente em cerca de $(220 \times \sqrt{2} - 10) \approx 300$ Volts. Esta transição é aplicada ao transformador TRF1 cuja relação de espiras sendo 50:1 provoca no secundário a tensão de 15 KV necessária ao disparo da lâmpada. Quando a tensão no ponto A é positiva T_1 está cortado, não havendo portanto, pulso de ignição, evitando que haja disparo nos ciclos positivos.

A forma de onda de tensão sobre o capacitor devido à retificação de meia onda é esboçada na Fig. 3.22. A intercessão desta com os pulsos senoidais resulta numa distribuição de pontos aproximadamente exponencial, com constante de tempo do tipo $\tau = KRC$. Foi considerada satisfatória a condição de indicação de disparo o tempo correspondente a 5τ , pois, nesse caso a variação percentual de energia entre um disparo ocorrido imediatamente após a indicação e outro, com o capacitor em plena carga é, para $t = 5\tau$.

$$\Delta E = \frac{E_c - E_m}{E_m} = \frac{\frac{1}{2} C [V_{\max} (1 - e^{-5})]^2 - v_{\max}^2}{\frac{1}{2} C V_{\max}^2}$$

$$= \frac{(1 - e^{-5})^2 - 1}{2} = 0,013 \text{ ou } 1,3\%$$

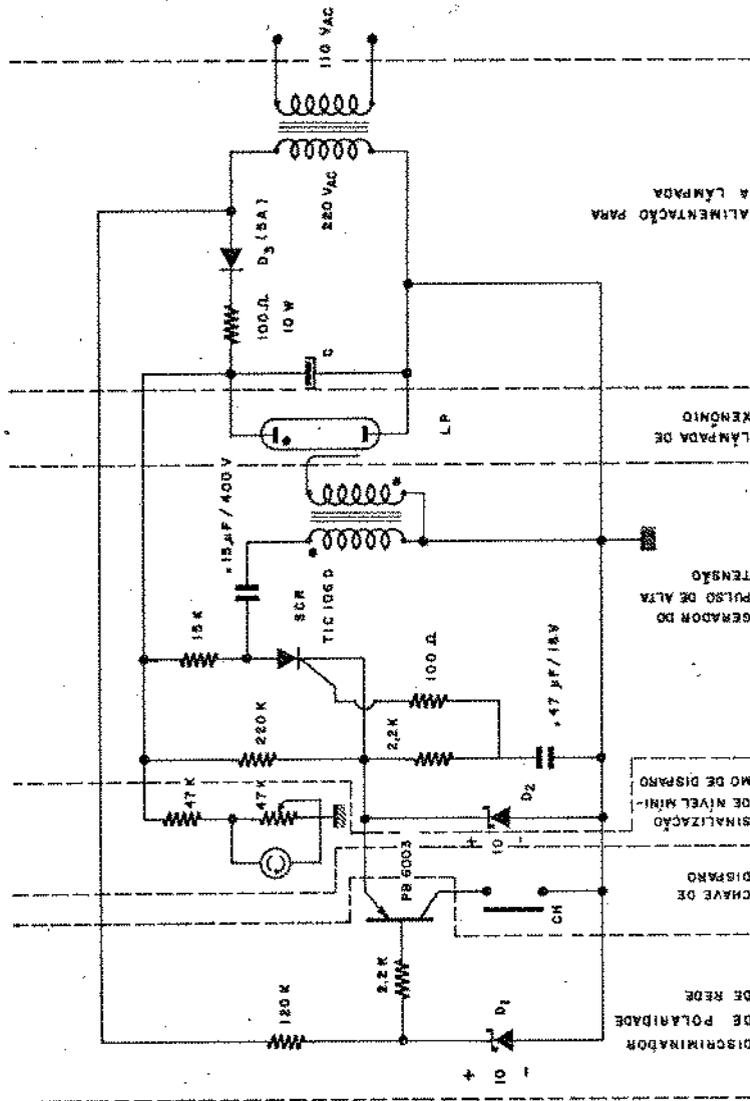


Figura 3.21 - Esquema elétrico do circuito de

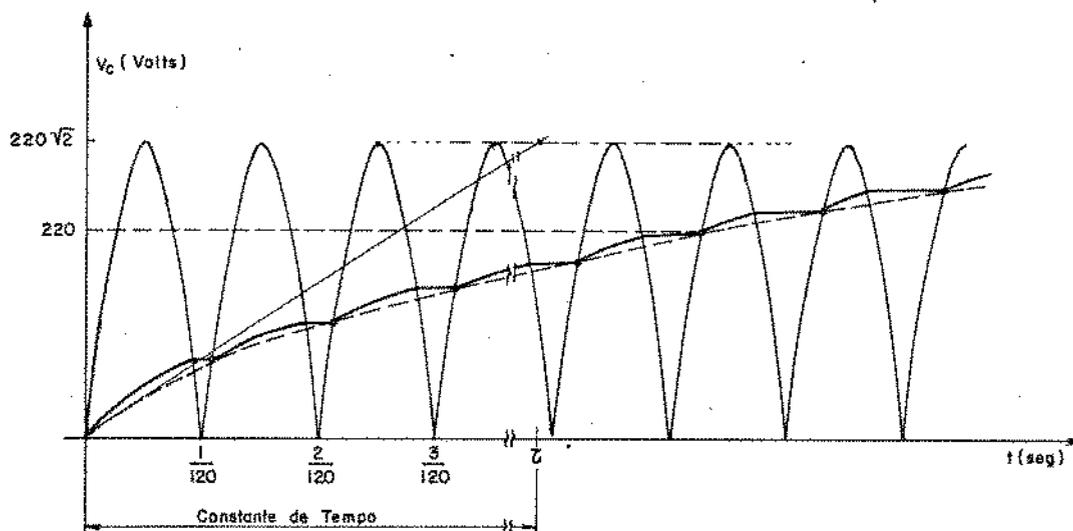


Figura 3.22 - Esboço da forma da onda de tensão sobre o capacitor, durante a carga.

Através dos testes de exposição das PARs relatados em Sec.2.3.3, determinou-se $C \approx 1600 \mu\text{F}$ e, considerando-se o tempo mínimo gasto de 15 seg. entre uma exposição e a seguinte, obteve-se $R \approx 250 \Omega$. Usou-se um resistor com capacidade de dissipação média de 25W.

A variação de 1,3% na energia não acarreta em variação apreciável do erro de espalhamento como se pode observar na Fig. 2.23.

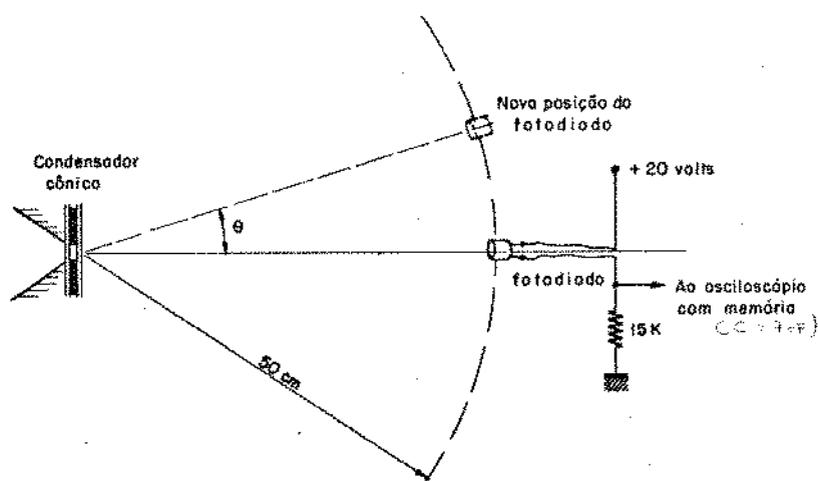


Figura 2.23 - Procedimento experimental para determinação da curva de irradiação x ângulo.

Uma vez montados o condensador e o circuito de disparo obteve-se a curva de intensidade de irradiação x ângulo da saída. Para isto foi empregado o arranjo ilustrado na fig. 3.23. A cada disparo da lâmpada, posicionada em um ângulo θ em relação ao eixo de referência, um osciloscópio com memória registra a forma do pulso luminoso. Com os valores de pico obtidos foi construída a curva de resposta, mostrada na Fig. 3.24.

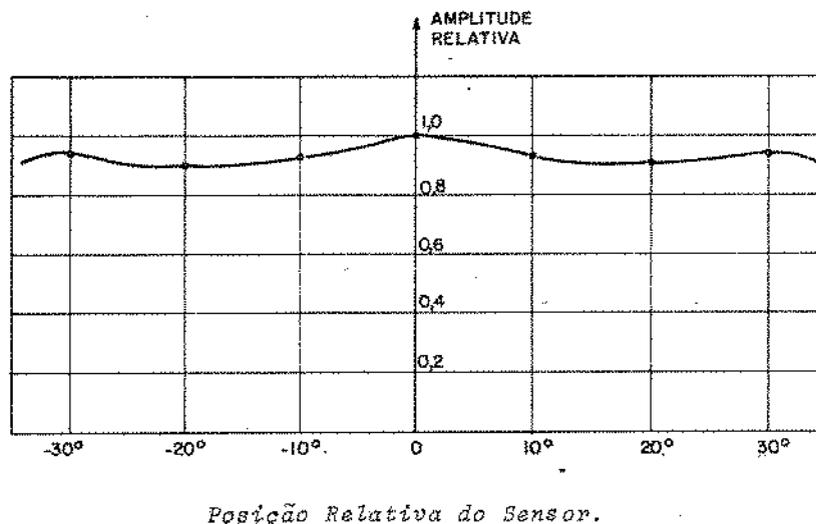


Figura 3.24 - Curva de resposta relativa, intensidade luminosa x ângulo.

3.2.8. O Condensador a Lentes

O condensador a lentes desempenha a função de captar energia da fonte, iluminando uniformemente a transparência através de um feixe levemente convergente, focalizado na pupila de entrada, como mostra o arranjo da fig. 3.25.

As emulsões de alta resolução são de baixa sensibilidade; assim, procura-se maximizar a energia captada da fonte; para isto a distância fonte-lente deve ser minimizada. Como o feixe deve ser convergente - a imagem da fonte é real - o comprimento focal do condensador deve ser minimizado. Alguns sistemas⁴⁸ começam com uma lente côncavo-convexa de pequeno raio de curvatura e portanto grande ganho. Esse elemento, entretanto, apresenta um perfil de aberração esférica muito acentuado exigindo um grupo complexo de outras lentes para corrigir tal efeito. Em virtude da dificuldade técnica de construção desses componentes por fabricante nacional e da simplicidade objetivada, tentou-se lograr os resultados propostos através de um sistema realizável, mais simples, uma vez que a perda de rendimento pode ser compensada aumentando-se a potência da fonte, o que já foi simplificado pela adoção do condensador cônico.

O sistema formado por duas lentes plano-convexas como mostra a Fig. 3.26 foi adotado. A simetria do sistema favorece a redução substancial³⁵ da aberração es

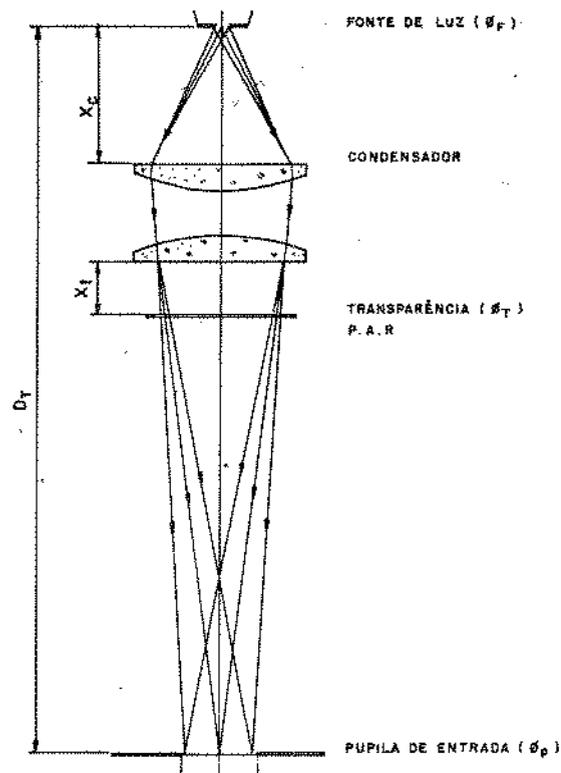


Figura 3.25 - Parâmetros associados à geometria do sistema de iluminação.

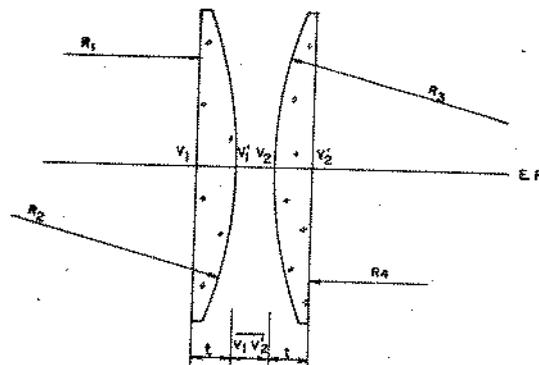


Figura 3.26 - Parâmetros associados ao condensador a lentes.

férica.

- Modelamento do Condensador a Lentes e do Iluminador

Em virtude do grande número de variáveis envolvidas, a definição dos parâmetros do condensador e dos elementos é feita iterativamente. Obtém-se uma con

figuração inicial através de simplificações e posteriormente aprimora-se cada característica visada em função da análise do sistema obtido. No nosso caso seguimos o seguinte procedimento. Os parâmetros são referidos à Fig. 3.25.

1. Determinou-se α a partir da curva de intensidade de irradiação x ângulo. Testes preliminares indicaram que uma redução de 10% na intensidade luminosa em relação ao nível necessário para sensibilizar a emulsão com densidade óptica ≈ 2 , tem efeito na prática desprezível.
2. A dimensão da transparência e a convergência do feixe conduzem à uma aproximação do diâmetro da lente e portanto da posição relativa da fonte.
3. A posição e o diâmetro da imagem da fonte, que deve ser focalizada na pupila de entrada, determinam a distância total e o fator de ampliação, que por sua vez, determinam o comprimento focal f do condensador.
4. Com o valor de f obtido, e o valor do índice de refração do vidro disponível $n = 1,523$ foram usadas as relações contidas no apêndice C para definir os parâmetros geométricos dos elementos e do sistema. Os valores $t = 10$ mm e $r = 100$ mm foram adotados como condições iniciais.
5. Procuram-se ajustar t e a separação das lentes mantendo-se o valor de f para a condição que conduz a menores valores de aberração esférica. Foi usada inicialmente, na análise, a técnica de traçado de raios ("ray-tracing"), posteriormente, um programa para as calculadoras programáveis⁴⁹.

Por estes princípios chegou-se aos resultados sintetizados a seguir:

$$R_1 = R_4 = \infty \text{ (superfícies planas)}$$

$$R_2 = R_3 = 110 \text{ mm}$$

$$t = 10 \text{ mm}$$

$$\overline{V_1'V_2'} = 15 \text{ mm}$$

destes valores resultam

$$f = 110 \text{ mm}$$

$$\Delta h = 6 \text{ mm}$$

$$\overline{V_1'H} = 6,57 \text{ mm}$$

$$\overline{H'V_2'} = 6,57 \text{ mm}$$

3.2.9. Procedimentos de Calibração do Sistema de Iluminação

Inicialmente, foi montado o conjunto de iluminador com o condensador ajustado conforme dados acima. A lâmpada de N_e foi substituída por uma incandescente para facilitar a focalização. Usou-se o mesmo princípio da secção 3.23 na medida de f . O "objeto" usado foi o próprio orifício de saída do condensador, $\phi = (2,6 \pm 0,05)$ mm. A variação de distância foi estabelecida pela própria rosca de ajuste do condensador.

dor cônico e uma escala no plano de foco. As imagens foram medidas com uma escala graduada de pré-focalização da fotorredutora, cuja resolução é $\pm 5\mu\text{m}$. ϕ representa o diâmetro da imagem. Todos os valores são em mm.

ϕ	ϕ	D_{t1}	D_{t2}	f	ΔH
5,85	5,50	510	(510+10)	112 \pm 0,5	7 \pm 2

Com estes resultados, e considerados ainda os parâmetros contidos na Fig. 3.12 e, a posição relativa da pupila de entrada da objetiva e diâmetro da transparência estabelece-se a posição relativa fonte/condensador; completando-se os parâmetros da estrutura óptica, conforme sintetizado na Fig. 3.27.

Roscas foram colocadas nos suportes dos condensadores de modo a permitir ajustes. Para isto, o primeiro passo consistiu em, isoladamente (sem a objetiva e transparência), focalizar-se a imagem a fonte em um anteparo situado à distância D_{fp} . Testes fotográficos em que se variou a posição da fonte indicaram a situação de maior definição da imagem.

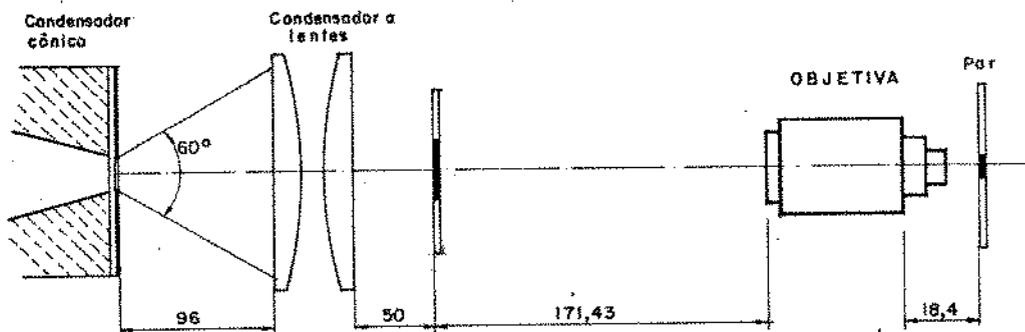


Figura 3.27 - Caracterização da geometria para a estrutura óptica.

3.2.10.

Resultados Experimentais

A Fig. 3.28 mostra os perfis de densidade óptica de uma emulsão (PAR), quando situada no plano da imagem final, e no plano de objeto produzido pelo sistema de iluminação. O resultado mostra que o limite adotado para o ângulo de capta-

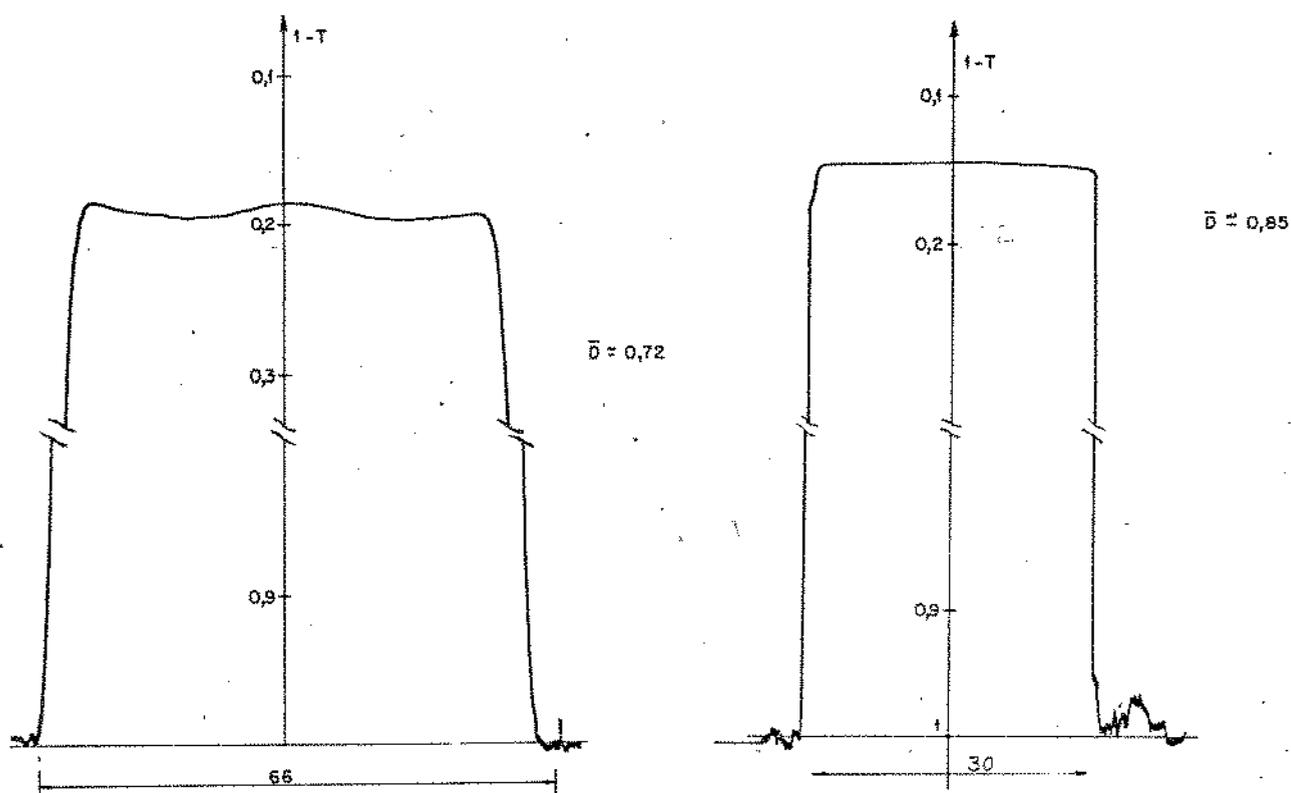


Figura 3.28 - Perfis de transmitância óptica obtidas em PAR no a) plano de objeto e b) plano de imagem.

ção de luz pelo condensador resultou em perfil uniforme. Foi usada no lugar de MI um círculo transparente de $\phi = 50$ mm e sensibilizados com baixa energia, fora da região de saturação da emulsão.

As fotografias a seguir mostram reproduções obtidas com iluminação "puntual" e difusa; nas PARs.

Figura 3.29 - Comparação entre as imagens obtidas por iluminação a) coerente e b) incoerente.

Observa-se no primeiro caso, que a resolução na imagem espacial é melhor que $2 \mu\text{m}$, uma vez que o grupo cuja largura nominal das barras é $2 \mu\text{m}$ e que na sensibilização a imagem sempre é ligeiramente degenerada pois a curva de transferência da emulsão não é abrupta. Isto evidencia a superioridade do primeiro tipo de iluminação no que diz respeito a formação de micro-imagens.

De outro lado observa-se ainda que, sendo 600 linhas/mm o limite de resolução da objetiva - o que resulta em barras com larguras de aproximadamente $1,3 \mu\text{m}$ - o efeito da aberração esférica (somado aos demais) é pequeno, indicando que a escolha do sistema simplificado do condensador a lentes foi suficiente para o propósito em vista.

3.2.11. O Sistema de Alinhamento

Este é composto basicamente por:

- microscópio de posição fixa e ocular filar;
- plataforma de deslocamento XY θ , comandada por parafusos micrométricos;
- referência com o eixo óptico principal.

Consideremos as partes:

O Microscópio de Alinhamento

O microscópio foi construído a partir de objetivas PZO disponíveis, cujas características nominais são:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| - Ganho padrão | 10x |
| - AN | 0,24 |
| - Comprimento de tubo | - 160 mm; (nominal) |

e oculares Bausch Lomb, de ganho igual 10x.

Para que fosse avaliada a distância entre a MI e a objetiva, determinaram-se os seus comprimentos focal e distância entre planos principais Δh .

Os princípios gerais das medidas são os mesmos usados na secção porém, sem o mesmo rigor uma vez que não há imposição quanto a exatidão do ganho.

Utilizou-se o banco óptico em virtude das facilidades de alinhamento e medidas e uma ocular para focalizar as imagens no plano do filme. O método utilizado é o mesmo da secção 3.2.3 apenas que a objetiva trabalha no sentido de ampliação. A partir do arranjo da Fig. 3.9 foram colhidos dados constantes do quadro abaixo.

	D_t	i	o	$1/R = G$
1)	$240,0 \pm 0,5$	$13,2 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,05$	6,5
2)	$110,2 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,05$	1,2

No sentido de minimizar os erros na medida de D_t usadas para obter-se Δh a focalização fina foi feita variando-se o plano de imagem porque a objetiva trabalha no sentido de ampliação; nesse caso, a profundidade de campo é menor; portanto, menor incerteza na posição de focalização; para isto foi usado um bloco com dimen-

são de $(130,2 \pm 0,5)$ mm, previamente medido para estabelecer D_{t2} .

Com os valores extraídos da Tabela, determinou-se os valores aproximados:

$$f = 15,8 \text{ mm}$$

$$\Delta h = 10,8 \text{ mm}$$

A Fig. 3.30 caracteriza a objetiva de $G = 10$, em termos dos planos e pontos principais.

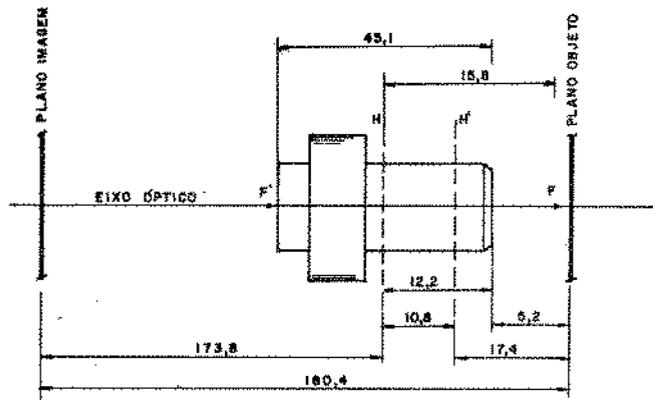


Figura 3.30 - Localização dos pontos e planos principais das objetivas P20, $G = 10x$

A distância objeto-imagem para o microscópio será,

$$D_t = f \left(G + \frac{1}{G} + 2 \right) + \Delta h = 15,8 \left(10 + \frac{1}{10} + 2 \right) + 10,8 = 180,4 \text{ mm}$$

e

$$v = f \left(\frac{1}{G} + 1 \right) = 15,8 \times \left(\frac{1}{10} + 1 \right) \approx 17,4 \text{ mm.}$$

Com estes resultados e considerando-se que a imagem nas oculares devem se situar a aproximadamente 25 cm do observador, a estrutura do microscópio é como mostra a Fig. 3.31.

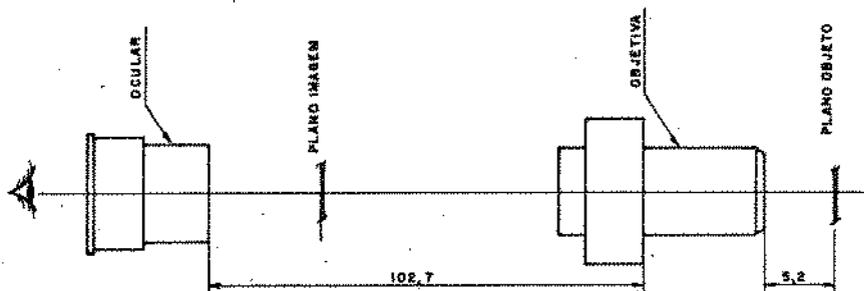


Figura 3.31 - A estrutura final do microscópio de alinhamento.

O Sistema Posicionador XY θ

A Fig. 3.32 mostra o desenho esquemático do posicionador XY θ . A plataforma B é construída de modo a encaixar de modo "justo-delizante" na plataforma A, permitindo o ajuste angular. Visto ser grande o raio onde é aplicada a pressão, consideramos ser suficiente o controle manual, atuando-se diretamente no parafuso. O parafuso P, permite ajustar levemente a pressão através do freio de nylon, que facilita o controle, retira a pequena folga e trava B, prevenindo rotações acidentais.

O deslocamento XY é feito através da plataforma C que contém o plano de objeto, comandada por dois parafusos micrométricos posicionados a 90°. As molas das extremidades opostas permitem o retorno da plataforma. Encostos terminados em ângulo introduzem uma componente que, somada ao peso tende a manter C sempre em contato com B. O encaixe e altura de B, e o peso de B com C não permite que o momento devido ao peso dos parafusos inclinem o plano de objeto.

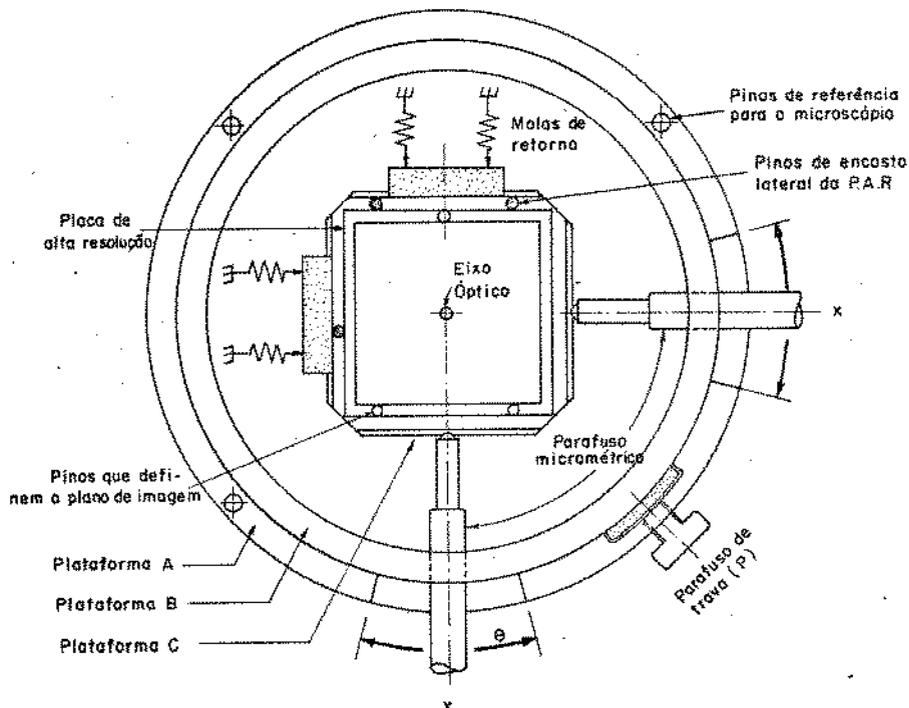


Figura 3.32 - Desenho simplificado do sistema de posicionamento XY θ para alinhamento de retículo.

Sobre a Construção das Peças

Os desvios de paralelismo e planicidade contribuem como foi visto

para a degradação da imagem devido aos efeitos de aberrações e desfocalização.

De acordo com a Eq. (3.9), alterações longitudinais de $10\ \mu\text{m}$ na distância objeto-objetiva modificam o plano de foco em $\sim 0,4\ \mu\text{m}$; portando bem menor que o valor da profundidade de foco, $= 7\ \mu\text{m}$. Adotou-se esse limite ($10\ \mu\text{m}$) como o desvio global de planicidade e paralelismo na construção do sistema, para posicionamento no campo compreendido entre $(x;y) = (\pm 2,5 \pm 2,5)\text{mm}$, $\theta = \pm 15^\circ$, considerando-se que ajustes poderão ser feitos no sentido de compensar o erro.

Visto que a tolerância de paralelismo e planicidade para os tornos e fresadoras comuns, não é normalmente inferior a $10\ \mu\text{m}$, procedimentos de construção mais cuidadosos foram adotados. Genericamente, são os seguintes:

- Escolha de materiais de boa qualidade, uniformes e livres de tensões internas;
- na obtenção da primeira superfície de referência, prender a peça com a menor tensão possível, o que implica em passos de usinagem abaixo do usual;
- pequenos passos reduzem o aquecimento da peça, flexões e desgaste da ferramenta;
- construir a peça em ambiente de temperatura constante de uma só vez.
- monitorar constantemente a usinagem com relógios comparadores de resolução $= 1\ \mu\text{m}$.

As peças do sistema acima foram construídas em aço inox 316, usando um torno ROMI, mod. P400, e uma fresadora KONDIA, mod. FV-1 durante a noite, quando a variação de temperatura era menos acentuada. Nas partes mais críticas foram usados passos de usinagem com a metade ou um terço dos padrões usuais.

No sentido de auxiliar ajustes foram ainda usados um desempenro de granito e rasquetes para ajustes locais.

Prontas as peças, e montado o conjunto encontrou-se, usando o esquema da Fig. 3.33 os seguintes desvios relativos máximos:

- | | | |
|---|---------------------|--------------------------------|
| a | → + 3 μm | |
| b | → - 2 μm | |
| c | → - 2 μm | desvio máximo: 5 μm |
| d | → 0 μm | |

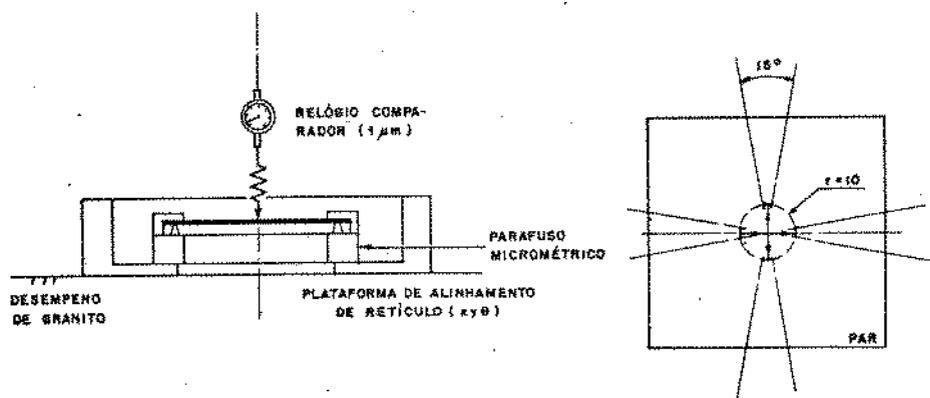


Figura 3.33 - Esquema utilizado para medida de variação longitudinal da matriz intermediária, introduzida pelo sistema de alinhamento XYθ.

3.3. O Sistema de Posicionamento XY

As principais prerrogativas do sistema de posicionamento são: a precisão de posicionamento e a repetibilidade de cada coordenada onde cada imagem de uma fotorrepetição será gravada. Os sistemas atuais funcionam operacionalmente, com erros da ordem de 0,2 a 1 μm . Técnicas de posicionamento automáticos que empregam raios-x e feixe eletrônico reduziram a frações de micron o erro de alinhamento^{14,15}.

Outro fator considerado no sistema de posicionamento é que a distância objeto/superfície do filme deve ser mantida dentro dos limites de profundidade de foco da objetiva - cerca de 7 μm em todo campo de posicionamento. Nos processos de "projeção direta sobre a lâmina", sistemas de focalização e alinhamento de paralelismo automáticos óptico-eletrô-mecânicos são usados, uma vez que as lâminas apresentam grandes variações de espessura.¹³

Na maioria dos sistemas de posicionamento das fotorrepetidas que empregam luz visível são usados parafusos micrométricos acoplados a escalas graduadas, motores passo-a-passo e circuitos eletrônicos para controle, como elementos posicionadores.

O alinhamento na direção do movimento é alcançado através de sulcos guias onde deslizam esferas ou prismas.⁵⁰ A Fig. 3.34 ilustra, simplificada-mente, esses princípios, para o deslocamento em uma direção.

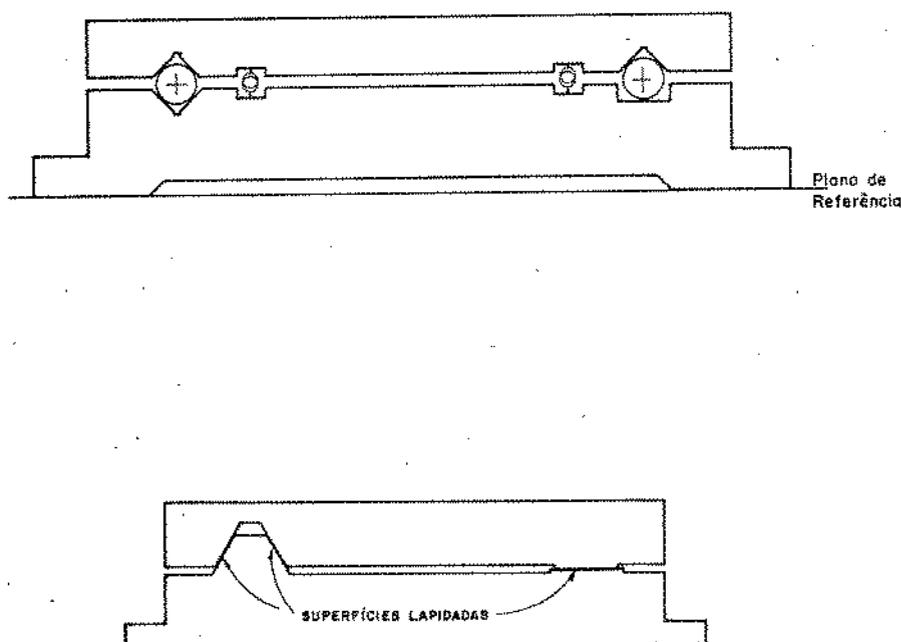


Figura 3.34 - Dois métodos possíveis de serem usados para deslocamentos de precisão.

Duas versões foram estudadas durante o projeto da FR: 1ª Versão, que combina o perfil básico da Fig. 3.34b com um parafuso micrométrico. A Fig. 3.35 mostra esquematicamente o sistema posicionador. Após construído, o perfil de erro de passos do fuso poderia ser obtido usando-se um interferômetro de Michelson.³⁵ A régua R teria um perfil complementar à curva e isto faz avançar ou retardar a matriz M, compensando o erro em cada ponto. Se em um dado ponto o erro no posicionamento de uma coordenada for E, então a haste deverá se deslocar de um ângulo α , tal que:

$$\alpha = 360^\circ \cdot E/p \quad (3.14)$$

o que corresponde ,

$$y = d \cdot \sin \alpha = d \cdot \sin(360^\circ \cdot E/p) \quad (3.15)$$

sendo

p = passo da rosca

y = valor de correção na régua

d = comprimento da haste

Considerando-se que o passo de 1 mm seja um bom compromisso entre resistência ao desgaste e a capacidade de resolução, que o número de divisões do tambor seja 500, e que seja adaptado um nônio a este, ter-se-ia para resolução da escala o valor

$$\alpha_p = \frac{p}{500} \times \frac{1}{10} = 0,3 \mu\text{m}.$$

O diâmetro (2R) do tambor se admitirmos separação de aproximadamente 1 mm entre divisões consecutivas será: $2R = \frac{500}{2\pi} = 79,5 \text{ mm}.$

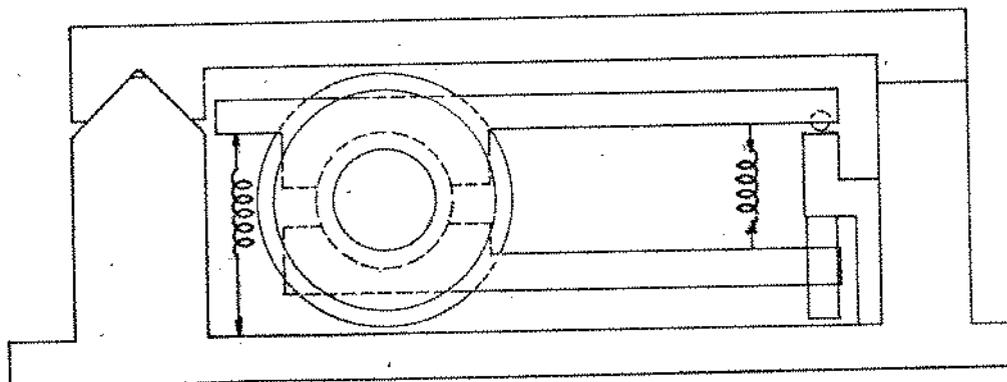


Figura 3.35 - Versão estudada para o sistema de posicionamento, que prevê compensação mecânica para o erro de passo do fuso.

Medidas interferométricas permitem com facilidade resolução de $1/4$ do comprimento de onda usado, ou seja, para um laser comum de He-Ne $6800 \text{ \AA}/4 = 0,17 \text{ \mu m}$. Podemos, ainda, estimar um valor aproximado para o erro devido à imprecisão na interpolação da curva e construção do perfil de régua. Considerando-se ser possível construir o perfil com desvio máximo de $0,2 \text{ mm}$ e se $d = 100 \text{ mm}$, então, pela combinação das equações (3.14) e (3.15) tem-se:

$$e = \frac{P}{360} \times \text{sen}^{-1} \frac{Y}{d} = \frac{10^3}{360} \times \text{sen}^{-1} \frac{0,2}{100} \approx 0,3 \text{ \mu m}, \quad \text{ou seja, o erro}$$

absoluto posicionado de coordenada é menor que $0,5 \text{ \mu m}$.

A segunda versão em que as coordenadas são posicionadas através de blocos de medida padrão como mostra o esquema simplificado da Fig. 3.36. Os detalhes mostram o encosto de referência, a localização do bloco, conexão com linha de vácuo para eliminar filmes de ar e sulcos que facilitam a remoção de possíveis partículas.

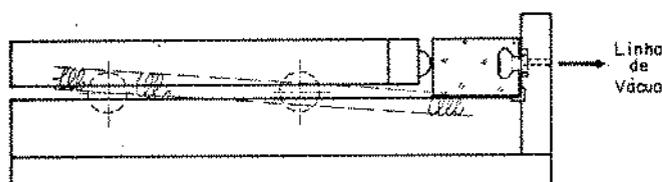


Figura 3.36 - Versão adotada para o sistema de posicionamento de coordenadas.

A manutenção da coordenada posicionada é feita através de pares de molas iguais duas a duas e localizadas de modo que não haja momento resultante nas plataformas. O peso da plataforma e ângulo dos sulcos tendem a anular o efeito de pequenos momentos resultantes.

Optou-se por construir a 2ª versão. As principais razões para isto foram:

- urgência na construção de um sistema para que fosse possível a realização dos primeiros testes dos processos de fabricação de micro-circuitos;
- impossibilidade de usinagem dos prismas na oficina do LED. As firmas locais consultadas na época não se dispuseram à tarefa.
- a 2ª versão poderia ser realizada com os recursos próprios da oficina mecânica no LED;
- a 2ª versão apresenta possibilidade de ser também automatizada no que diz respeito ao posicionamento.

Uma desvantagem do sistema de esferas é que o contato puntual des

tas com as superfícies dos sulcos origina grandes pressões tornando-se necessário selecionar aço de elevada dureza ou tratamento especial para evitar desgaste precoce da superfície.

3.3.1. Construção e Montagem do Sistema

Os sulcos em "V" foram construídos com fresas de 90° ; suas dimensões, bem como o sulco em "LL" foram determinadas para acomodar esferas de $\phi = 7$ mm. Na usinagem, desbastes de pequenos passos - 0,05 mm ou menos nos sulcos, e 0,1 a 0,3 em outras partes - foram feitos de modo a reduzir ao mínimo as pressões de aprisionamento da peça à fresadora e os esforços sobre as ferramentas.

Molas com constante de elasticidade de 200 gr/cm foram utilizadas.

Uma vez concluído o sistema foram selecionadas e separadas esferas com o auxílio de um micrômetro, de modo a corrigir pequenos desvios de paralelismo.

Na primeira série de medidas de paralelismo Fig. 3.37 verificou-se que havia de cerca de $8 \mu\text{m}$ em um dos sulcos da plataforma Y. Isto foi corrigido colocando-se um calço entre a plataforma e a base no ponto de maior desvio (próximo ao centro) e ajustada a pressão do parafuso central até que o desvio seja reduzido ao limite desejado. Após ajustes, o maior desvio encontrado foi cerca de $4 \mu\text{m}$, em um deslocamento de 40 mm, na direção y, aproximadamente, no centro do campo de deslocamento. Na medida o relógio padrão foi localizado nos lugares geométricos mostrados na fig. 3.37b tendo sido usada a menor pressão possível, ou seja, no início da escala.

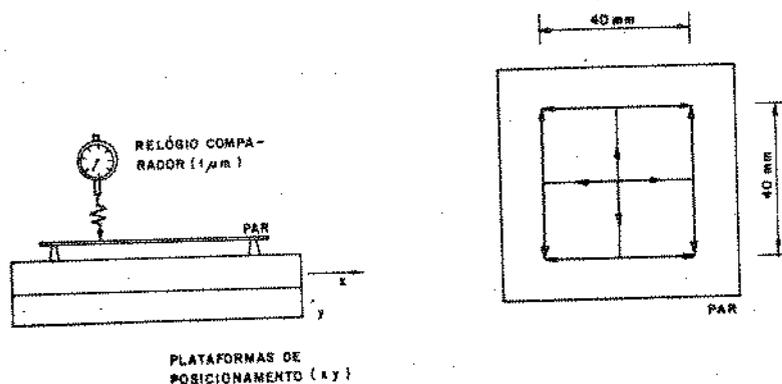


Figura 3.37 - Método usado na medida de paralelismo no deslocamento das plataformas.

- Os blocos de medida padrão usados têm as seguintes características:
- Desvio absoluto em relação ao valor nominal: $< 100 \text{ \AA}$.
 - Coeficiente de dilatação linear: $0,15 \times 10^{-6} \text{ m}^\circ\text{C}$.

3.3.2. O Sistema de Focalização

A fotorrepetidora opera com fator R fixo e, em consequência, D_T também o será. A focalização da imagem é obtida pela variação de posição objetiva através de uma rosca cujo passo é 0,5 mm. A Fig. 3.38 mostra o conjunto de suporte da objetiva, que permite retirar a folga da rosca de ajuste de foco e o travamento da mesma na posição selecionada. A flange 4 contém uma escala graduada tal que a variação angular correspondente a traços consecutivos é aproximadamente 1° , o que permite uma resolução de posicionamento da objetiva de:

$$\pm \frac{1}{2} \times \frac{500}{360^\circ} \mu\text{m} \approx \pm 0,7 \mu\text{m}$$

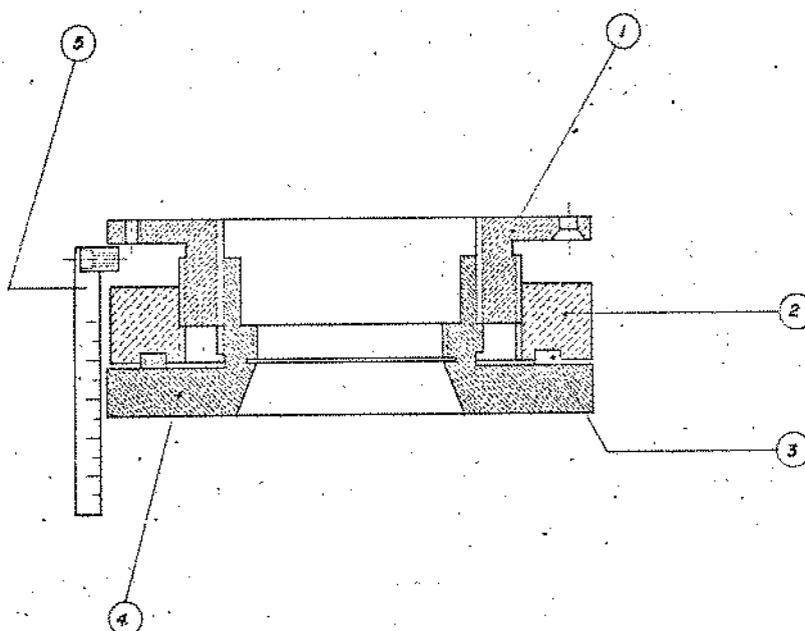


Figura 3.38 - O sistema de roscas para focalização da imagem.

Este limite de resolução é compatível aos procedimentos de focalização fina uma vez que está bem abaixo do limite de profundidade de foco anteriormente assinalado.

3.4. A Arquitetura do Sistema

3.4.1. Planos e Referência - Alinhamento

A estrutura da fotorrepetidora poderia ser montada de maneira direta, verticalmente como sugere o esquema da própria estrutura óptica; ou pela compactação vertical na qual se empregam prismas e/ou espelhos especiais. A redução da altura forma o sistema mais estável em relação a vibrações mecânicas cujos efeitos tendem a comprometer o desempenho do equipamento, à medida que as mínimas dimensões a serem reproduzidas se aproximem do limite de submicrom.

O limite pré-fixado de 5 μm para a menor dimensão de imagens nos motivou explorar a possibilidade de um sistema óptico linear, como se mostra na Fig. 3.39. Com este sistema, de um lado, prescinde-se da necessidade de componentes ópticos especiais, da usinagem de maior número de planos de referência - paralelos e/ou ortogonais - com alta precisão e de um refinado sistema de alinhamento do conjunto. De outro lado, na estrutura vertical o paralelismo dos planos de referência pode ser garantido através de monitoração e correção passo a passo das variações relativas de dimensões das peças construídas. Uma vez garantido o paralelismo dos planos de referência, apenas o alinhamento entre o eixo óptico da objetiva e a referência do microscópio de "alinhamento de retículo" pode ser considerado mais crítico, em função do fator de aberração de forma (distorção) da objetiva, resultante da variação do fator de redução em função da distância do ponto objeto ao eixo óptico da objetiva. O efeito, porém, de desalinhamento pode ser detetado e corrigido após a montagem do equipamento. A Fig. 3.40 mostra o desenho* do protótipo montado. O microscópio ocupa o lugar do iluminador durante a etapa de alinhamento de retículo. A referência em relação ao eixo óptico é mantida através de pinos guia.

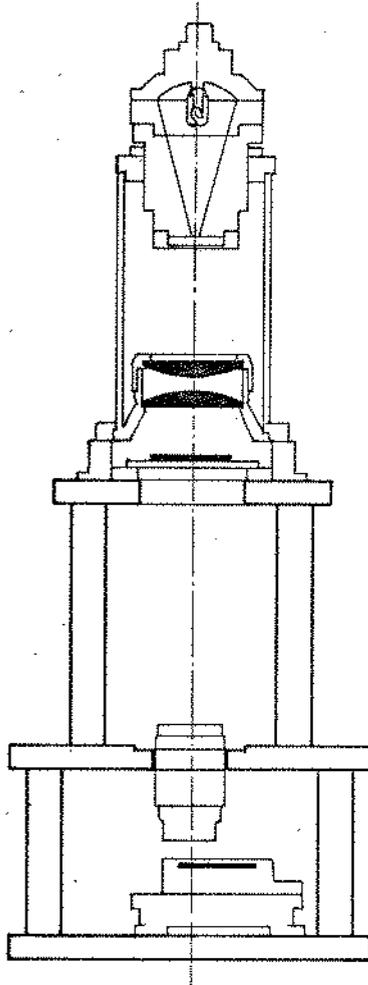


Figura 3.30 - A arquitetura básica da fotorrepetidora.

* Desenho de conjunto FO-023, LED.

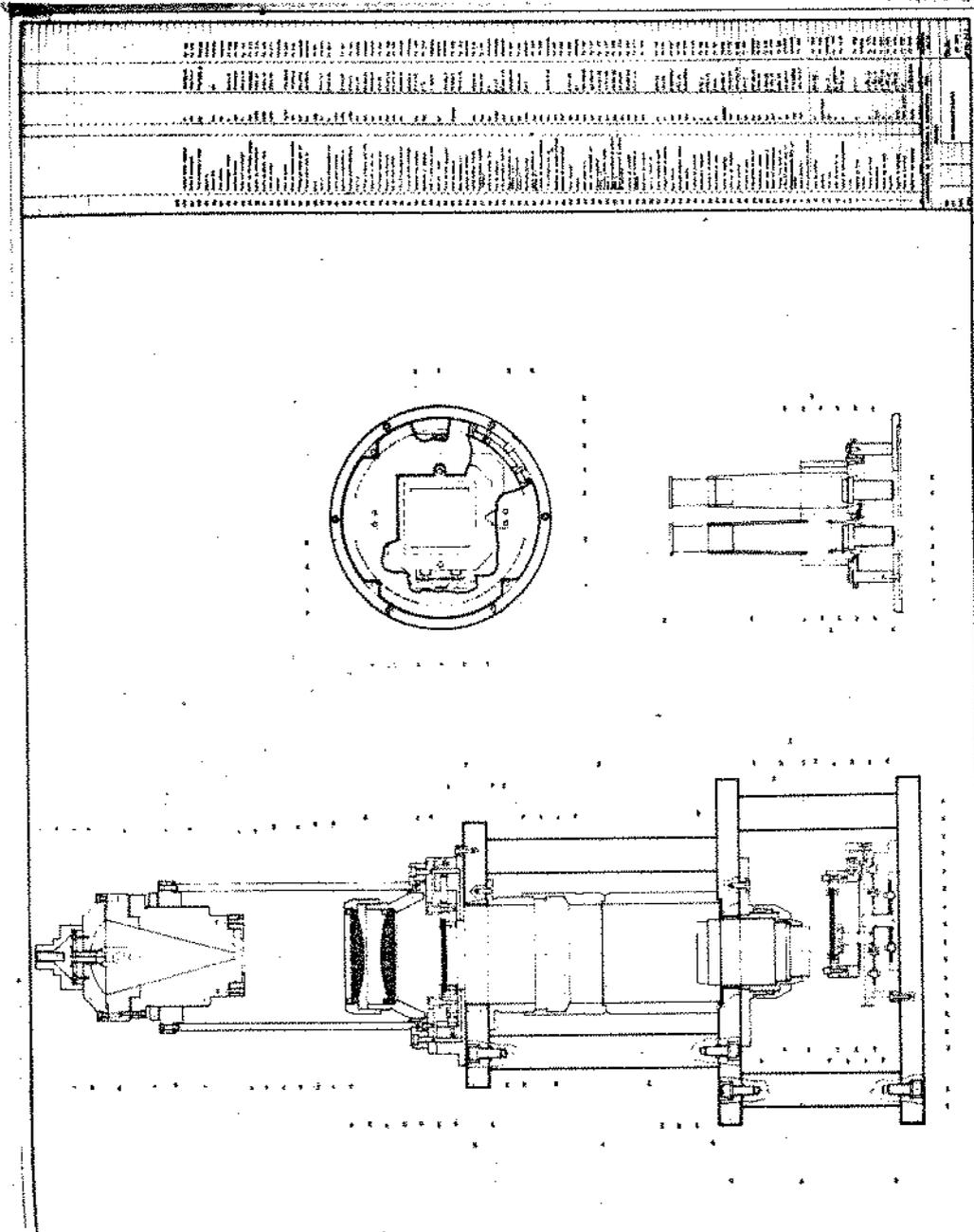


Figura 3.40 - Desenho de conjunto do protótipo da FR.

3.4.2 Erro do Fator R e as Tolerâncias de Confecção das Peças

Na secção (3.2.2) calculou-se a distância (D_T) entre os planos de objeto e imagem bem como expressou-se - eq. (3.9) - o desvio ΔR do fator de redução em função de pequenas variações ΔD_T . Considerando-se que foi objetivado ter-se $\Delta R < 0,5\%$, o correspondente limite para ΔD_T será:

$$\Delta D_T < f(1 - 1/R^2)$$

$$\Delta D_T < 49.72 (1 - 1/5^2) \times 0,005 \approx 0.24 \text{ mm}$$

Uma vez que a distância D_T é obtida pela superposição de 15 peças, um erro médio de aproximadamente 16 μm por peça, manteria o valor de ΔR dentro do limite esperado. Visto que o erro final será estatístico, foi estipulado que a tolerância para usinagem das peças estruturais seja 5 μm . A dimensão dos pinos que suportam a matriz intermediária foi aumentada de 20 μm para permitir correção do fator R.

Foi ainda adotado como critério de montagem o seguinte procedimento, com a finalidade de melhor controlar os erros de paralelismo e da distância objeto/imagem:

1. Medição das variações de espessura das plataformas nos pontos de apoio das hastes;
2. Medição das variações relativas das alturas das hastes;
3. em função dessas medidas, distribuir as hastes de modo que os erros parciais de paralelismo se compensem, e fazer, se necessário, ajustes manuais através de rasquetes;
4. Montagem do sistema de posicionamento XY na plataforma A segundo critérios já mencionados.
5. Montagem do sistema de alinhamento XY θ na plataforma C segundo critérios já mencionados;
6. Montagem do suporte da objetiva na plataforma B;
7. Montagem das hastes e plataformas.
8. Calibrar o sistema e obter imagens para possível correção de R através da variação de D_T por desbaste dos pinos que suportam a MI. O desbaste é quantizado pela eq. 39.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS GERAIS OBTIDOS

Neste capítulo discorre-se sobre os resultados alcançados com a fotorrepetidora e a fotogração. Números correspondentes são apresentados e no final do capítulo condensados através das denominadas regras de projeto. Resultados particulares a partes em subsistemas foram localmente comentados.

São as seguintes as grandezas ou propriedades mais gerais que caracterizam os resultados da fotorrepetição e fotogração.

- fator de redução - R
- resolução - linhas/mm
- erros de posicionamento de fotorrepetição

}	rotacional - er
}	translacional - et
- efeitos de bordas - transmitância
- propagação dos erros - efeito final

O passo inicial para a caracterização do acima descrito foi ajustar com precisão o foco da fotorrepetidora sobre a emulsão da PAR, utilizando, para isto, o procedimento descrito na secção 2.3.2 e os processos associados à revelação de imagens nas PAR, como descrito nas referências nºs 25 e 29. Assim, matrizes com características apropriadas a cada fim poderiam ser obtidas.

4.1. Medição do Fator de Redução (R)

Para medir o fator de redução, empregou-se um original como mostra a Fig. 2.11 na qual é definida a dimensão de referência X.

A medida da distância X, tanto no objeto quanto na imagem é feita da seguinte forma: inicialmente faz-se coincidir a reta definida pelos pontos A e B com a direção de deslocamento da mesa XY de microposicionamento do microscópio, em seguida usam-se as bordas indicadas na Fig. 2.11 como referências da medida, com isto a incerteza no posicionamento do retículo do microscópio é minimizado e a medida independente de possível erro de processo (espalhamento de imagem) como descrito na secção 2.3.4.

A escolha da dimensão do original (X_{objeto}) foi baseada nas considerações:

- maior X_{objeto} minimiza o erro devido a incerteza na localização do retículo sobre a borda de referência.
- X_{objeto} deve ser menor que o campo de deslocamento da mesa XY.
- a imagem (reduzida) deve estar contida no campo útil de imagem da objetiva da fotorrepetidora.

Com isto em vista, empregou-se um objeto tal que

$$X_{objeto} = 30,051 \pm 0,001 \text{ mm}$$

obtendo-se $6,058 \pm 0,001$ - este é o desvio obtido na medida.

$$X_{\text{imagem}} = 6,058 \pm 0,0008 \text{ mm}$$

portanto

$$R = 4,960 \pm 0,001$$

sendo

$$\Delta R = \approx (4,96 - 5,00)/5,00 = -0,8\%$$

a diferença percentual em relação ao valor esperado. Uma vez que $R < 5$ necessita-se aumentar a distância D_T por um valor

$$\begin{aligned} [\Delta D_T] &= [f(1 - 1/R^2) \cdot \Delta R] \\ &= [49,72(1 - 1/5^2) \cdot (4,96 - 5,00)] \\ &= 1,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

Após correção

$$X_{\text{imagem}} = 6,022 \pm 0,008 \text{ mm}$$

portanto

$$R = 4,990 \pm 0,001$$

A correção de D_T para ajuste de R na fotorrepetidora é relativamente simples, tendo sido conseguida através da troca dos pinos de apoio das matrizes objeto da mesa de posicionamento XY0, 1,9 mm mais longos.

Nas medidas acima foi empregado o microscópio Leitz com ocular reticulada e parafuso de microposicionamento de traço com resolução de escala por interpolação $\sim 0,3 \mu\text{m}$, aumento de 160 x, e mesa XY acoplada a parafusos micrométricos. Os valores apresentados correspondem às médias de uma série de 5 medições.

4.2. Medição da Resolução de Fotorrepetição e Fotogravação e Efeitos Associados

Existem quatro situações distintas relacionadas com o poder de resolução do sistema de fotogravação.

- Resolução associada à imagem espacial
- Resolução alcançada nas PAR
- Resolução alcançada no fotorresiste
- Resolução útil após ataque químico

A caracterização da resolução sobre as PAR, o fotorresiste e após o ataque químico foi feita através da carta de resolução mencionada na secção 3.1.7. Os valores aproximados correspondentes às larguras das barras após a redução da fotorrepetição são aqueles apresentados na Fig. 3.8 última coluna.

Na Fig. 4.1 pode ser observado o setor crítico em uma imagem típica obtida através da carta de resolução em uma PAR. Vê-se que o grupo de barras com largura de $2 \mu\text{m}$, embora não apresente contraste suficiente para o uso, aparecem distintas, indicando que a resolução na imagem espacial é ainda maior, pois na sensibilização da emulsão, a imagem é degradada. O poder de resolução (nominal) da objetiva Ultra-Micro-Nikkor é 600 linhas/mm, ou seja, uma linha tem aproximadamente $1,6 \mu\text{m}$. Isto indica que o sistema óptico permitiu aproveitar, em termos de resolução, sua quase total capacidade.

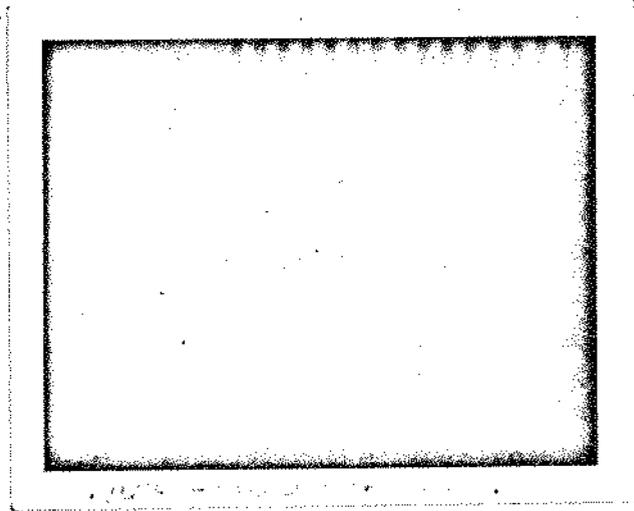


Figura 4.1 - Reprodução da imagem da carta de resolução gravada em uma PAR, com $R = 500X$.

Se a distância PAR/objetiva não for mantida constante dentro do limite de profundidade de foco da objetiva, para todo campo de deslocamento da mesa posicionadora XY, a desfocalização resultante tem efeitos negativos na capacidade de resolução da imagem. Na secção 3, foi medido o desvio máximo de $4 \mu\text{m}$, portanto, menor que a profundidade de foco ($7 \mu\text{m}$) prevista na secção 3.1.5. O efeito desse desvio foi verificado através da comparação entre as 25 reproduções obtidas em uma fotorrepetição, não tendo sido notada diferença visível - nas menores barras - em nenhuma delas; o que indica ter sido satisfatório o paralelismo alcançado.

A resolução útil alcançada nas PAR foi avaliada pelo seu efeito no fotorresiste empregando-se uma carta de resolução obtida com a fotorrepetidora calibrada para sensibilização conforme estabelecido na secção 2.3.3. As barras com largura de aproximadamente $3 \mu\text{m}$ para o fotorresiste positivo e $3,8 \mu\text{m}$ para o negativo ficaram claramente definidas como mostra a Fig. 4.2.

Outras características importantes associadas à definição das imagens são o arredondamento dos cantos, delimitado pela resolução e a regularidade da faixa de transição entre regiões de alto e baixo contraste. As fotografias da Fig. 4.3 reproduzem imagens típicas obtidas.

A resolução útil da fotografação pode ser representada pela menor largura de linha que se consegue abrir no óxido de silício, metalização ou alguma outra película. O caso mais crítico é a abertura de janelas em SiO_2 espesso, pois como observamos na secção 3.16, quando se trata de duas ou mais linhas próximas, a sua menor dimensão ou separação (L_{min}) entre elas é

$$L_{\text{min}} = 2 t_{\text{ox}} \quad (4.1)$$

onde t_{ox} é a espessura do óxido. Usualmente tem-se espessuras de aproximadamente 10000 \AA portanto, L_{min} é, nesses casos, limitado no melhor caso a cerca de $2 \mu\text{m}$.

Outra consideração quanto à capacidade de resolução da fotografa -

Figura 4.2 - Setores de imagem da a) carta de resolução gravada no fotorresiste b) positivo e c) negativo.

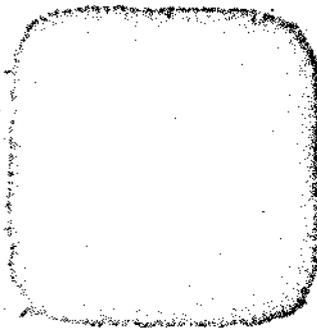


Figura 4.3 - Arredondamento dos cantos e uniformidade da faixa de transição de contraste.

ção está relacionada com o seguinte: à medida que fotografações vão sendo realizadas, a superfície do novo óxido exposta à nova etapa vai se tornando mais irregular. Isto faz com que o limite para L_{\min} fique ligeiramente prejudicado pelo efeito de difração da luz nas regiões em que não há contato máscara/fotorresiste. A Fig. 4.4 mostra como uma linha de 8 μm de largura é reproduzida em superfície que passou por uma gravação anterior. A altura do degrau (espessura do filme) é de aproximadamente 8500 \AA . A largura da linha resultante é de aproximadamente 6,5 μm .

Os resultados comentados acima mostram que o limite proposto -

Figura 4.4 - Fotografações superpostas

$L_{\min} = 5 \mu\text{m}$ - foi alcançado em termos de fotografação.

É possível o uso do SGM fora dos padrões gerais adotados (secção 4.5). Um caso particular é a gravação de linhas mais estreitas em estruturas que não requerem mais que dois níveis de máscaras com alinhamento rigoroso. A decisão quanto ao tipo da máscara e do fotorresiste (secção 2.2.5) adequados à finalidades particulares deve levar em conta o sentido do erro de fotografação originado por difração e espalhamento da luz nos filmes. Considere-se a proposição de se definir uma janela em algum filme sobre um substrato. Caso seja empregado resiste do tipo negativo, a máscara deve ser como ilustra a Fig. 4.5a., e como a Fig. 4.5b, se o tipo positivo for usado. Supondo-se as respectivas linhas (escura e clara) com mesma dimensão, o erro é no sentido de diminuir a largura da linha gravada, no primeiro caso, e de aumentar no segundo valores típicos de 0,5 a 1 μm tem sido encontrados, para os resistes positivos e negativos, respectivamente. O mesmo efeito pode ser propositadamente explorado em relação à máscara, em função do erro de espalhamento (ver Fig. 2.14).

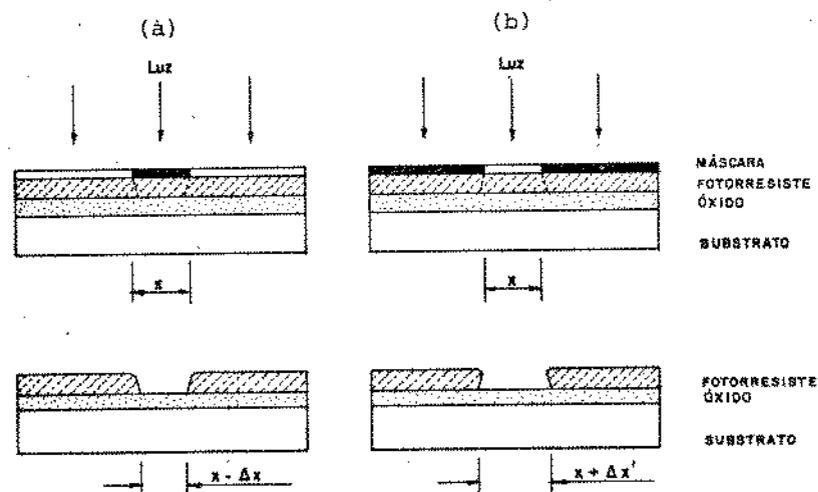


Figura 4.5 - O erro de gravação de uma linha empregando-se resiste a) negativo, b) positivo.

4.3. Erros de Posicionamento na Fotorrepetição

Foi visto anteriormente que o erro de posicionamento de fotorrepetição decorre de dois fatores:

- a) desvio translacional (ϵ_t) - direções xx e yy - em relação à coordenada posicionada.
- b) desvio rotacional (ϵ_r) da figura projetada em relação as direções de deslocamento xx e yy da mesa posicionadora.

No primeiro caso, os desvios são aleatórios e no segundo se matêm para todas configurações de uma mesma matriz.

4.3.1. Método de Medida do Erro de Posicionamento (Translação)

Vários métodos são descritos na literatura para a medição do erro de posicionamento e alinhamento. Aproveitando-se propriedades compatíveis com as facilidades disponíveis, foi empregada a configuração de teste mostrada na Fig. 4.6.

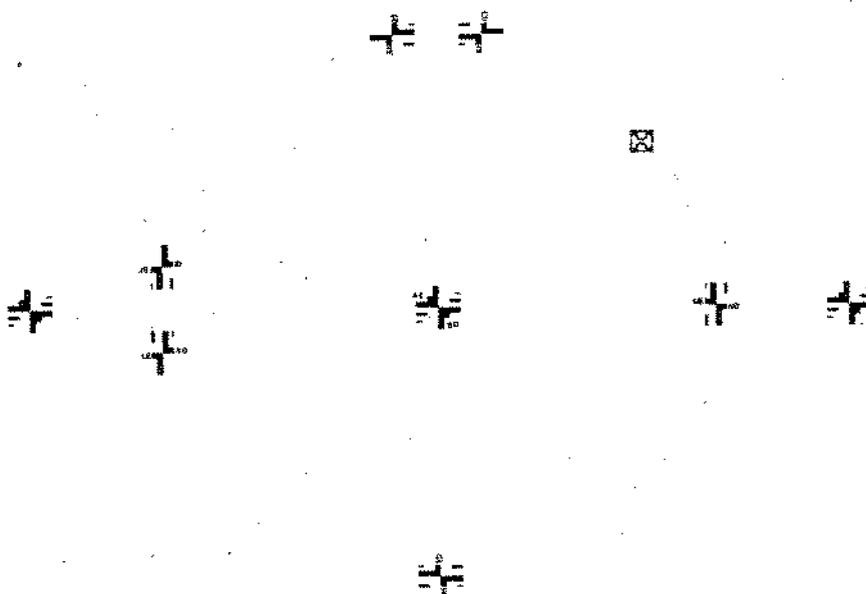


Figura 4.6 - Configuração empregada para medição dos erros de posicionamento e alinhamento.

- As marcas A servem para alinhar a matriz com a FR.
- As dimensões nela contidas permitem que as extremidades de uma célula se encaixem com a extremidade complementar da configuração adjacente ou ainda consigo mesma em caso de rotação de 180° .

Com estas propriedades pode-se isolar cada parcela de erro, adotando procedimentos específicos a cada teste.

Para a medida do erro de translação foi adotado como referência de coordenada o ponto central da imagem-intercessão do eixo óptico com a emulsão. Dessa forma são isolados os efeitos de possíveis desalinhamentos e (ou) distorções de imagens periféricas.

Procedimentos para obtenção da amostra de teste:

1. Alinhamento do retículo (marcas A na Fig. 4.6) com a FR.
2. Fotorrepetir segundo a sequência adotada na Fig. 4.7.
3. Retirar a máscara e realinhar o retículo com rotação de 180° em relação à posição anterior.
4. Fotorrepetir segundo a mesma sequência da Fig. 4.7.
5. Computar os erros $st = (\Delta x, \Delta y)$ segundo o modelo descrito em se guida.

A marca central (C) da Fig. 4.6 aparecerá após a superposição das imagens como se mostra na Fig. 4.8, a partir da qual pode-se escrever as seguintes expressões para o erro de translação:

$$\begin{aligned} st &= (\Delta x; \Delta y) \\ \Delta x &= (x_2 - x_1)/2 \\ \Delta y &= (y_2 - y_1)/2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

O sinal de diferença anula o efeito de um possível espalhamento de corrente dos processos de exposição ou revelação na medida de st . Desde que seja feita bem próxima ao centro do campo de imagem, a medida também independe da parcela de erro devida à rotação do retículo.

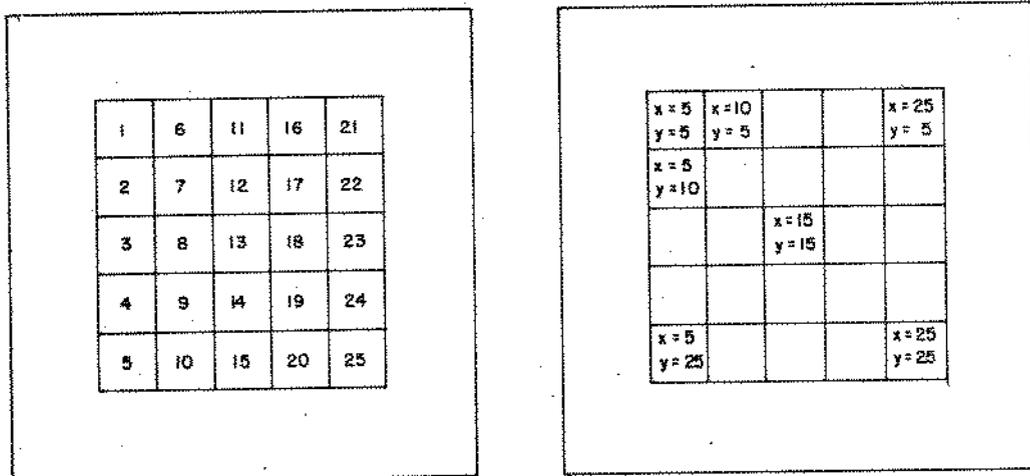


Figura 4.7 - A sequência da fotorrepetição e uso dos blocos de medida padrão.

As tabelas abaixo mostram um conjunto de medidas de $st = (\Delta x; \Delta y)$ colhidas em duas amostras típicas obtidas após identificação (vide seção 5) e controle parcial das fontes de erro introduzidas pelos sistemas de deslocamento e posicionamento das plataformas da mesa XY.

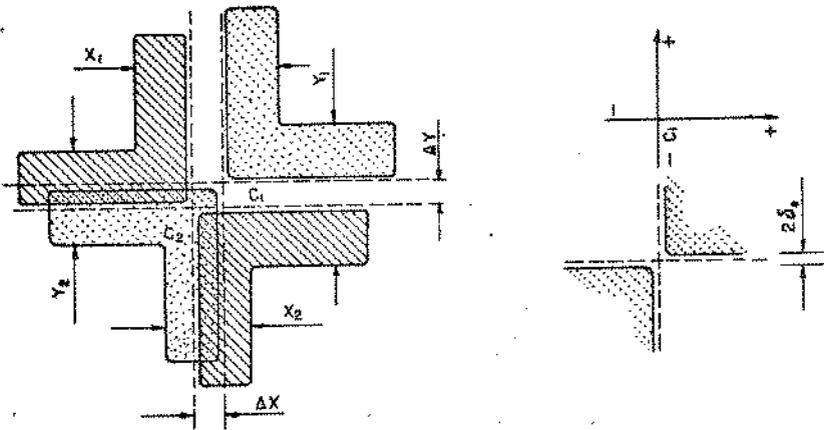


Figura 4.8 - a) Parâmetros usados na medida do erro de translação. As medidas são tomadas em direções normais às bordas. Considerando-se C_1 a projeção primitiva, Δx e Δy são negativos para a convenção de sinais definida em b).

Valor médio do erro $\bar{\epsilon}_t = (\Delta \bar{x}; \Delta \bar{y}) \mu m$	(1,4; 0,6)	(1,4; 0,9)	(0,6; 0,3)	(1,0; 0,3)	(-1,2; -0,3)
	(1,4; 0,6)	(1,4; 0,3)	(0,9; 0,2)	(1,0; 0,3)	(-1,1; -0,8)
	(0,6; 1,1)	(1,4; 0,3)	(-0,9; -1,0)	(0,9; 0,6)	(-1,7; -1,2)
	(1,4; 0,6)	(1,4; 0,6)	(0,8; 0,2)	(0,9; 0,3)	(1,0; 0,6)
	(0,9; 0,6)	(1,1; 0,6)	(0,8; 0,2)	(0,9; 0,8)	(1,0; 3,4)
	(0,7; 0,4)				

(a)

Valor médio do erro $\bar{\epsilon}_t = (\bar{\Delta x}; \bar{\Delta y})$	(*)	(1,8; 0)	(1,4; 2,4)	(1,1; 2,0)	(0,5; 3,1)
	(1,6; 2,1)	(1,8; 1,8)	(1,8; 1,8)	(1,6; 1,9)	(1,5; 1,9)
	(1,8; 2,4)	(1,7; 1,9)	(1,4; 2,0)	(1,7; 1,8)	(1,5; 2,1)
	(1,2; 2,1)	(1,6; 1,9)	(1,8; 1,9)	(1,6; 1,9)	(1,8; 2,8)
	(1,8; 2,0)	(2,0; 2,2)	(1,8; 1,9)	(1,8; 1,9)	(1,9; 4,5)
	(1,6; 2,0)				

(b)

Tabela 4.1 - Conjunto de valores para o erro de posicionamento tomados em duas amostras. Os pares $(\Delta x; \Delta y)$ correspondem às posições descritas na sequência definida na Fig. 4.9. Valores em μm .

A análise dos números contidos na tabela 4.1 conduz às seguintes observações:

- O valor médio $\bar{\epsilon}_t = (\bar{\Delta x}; \bar{\Delta y})$ pode ser interpretado como a parcela de erro de modo comum (ver seção 2.2.1) sendo decorrente de possível assimetria da matriz objeto e de alinhamento inadequado dos retículos. Visto que esta parcela pode ser compensada na etapa de alinhamento de máscara para exposição do fotorresiste, o erro efetivo de fotorrepetição é computado com referência a $\bar{\epsilon}_t$.

Uma maneira de observar os desvios é agrupá-los em classes, sendo possível definir um rendimento em função de limites arbitrariamente definidos. Para isto, com os dados da tabela 4.1, construiu-se a tabela 4.2, lembrando-se que o erro é classificado dentro de um limite se o mesmo for aplicável para Δx e Δy .

classe de erro (μm)	Número de projeção com erro de posicionamento dentro do limite especificado	
	1ª amostra	2ª amostra
< 0,5	12	19
< 1	20	21
< 1,5	20	22
< 2,0	23	23
< 2,5	23	23
Inúteis (>2,5)	2	1

Tabela 4.2 - Classificação do erro de fotorrepetição.

(*) Não foi aproveitada devido a dupla exposição.

- A tabela 4.1 mostra ainda, que, de uma maneira geral, os desvios relacionados com o eixo XX são menores que os em YY. Ora, a plataforma responsável pelo deslocamento em Y é mais pesada, portanto, mais estável, o que aparentemente contradiz os resultados. Esta observação nos levou a investigar e posteriormente concluir que a maior parcela do erro em conta não era proveniente do método de posicionamento por blocos de medida padrão. Algumas causas foram detetadas, as quais mencionamos na secção 5.2.

4.3.2. Métodos de Medida para o Erro de Rotação

Para medir-se o erro ocorrido no alinhamento (rotação) do retículo foi empregado o modelo abaixo descrito.

O desalinhamento do retículo em relação à referência (retículo do microscópio) produz na fotorrepetição o efeito mostrado na Fig.4.9 no caso de $\epsilon_+ = 0$, e que o passo de repetição é igual ao lado do quadrado que delimita a área do CI.

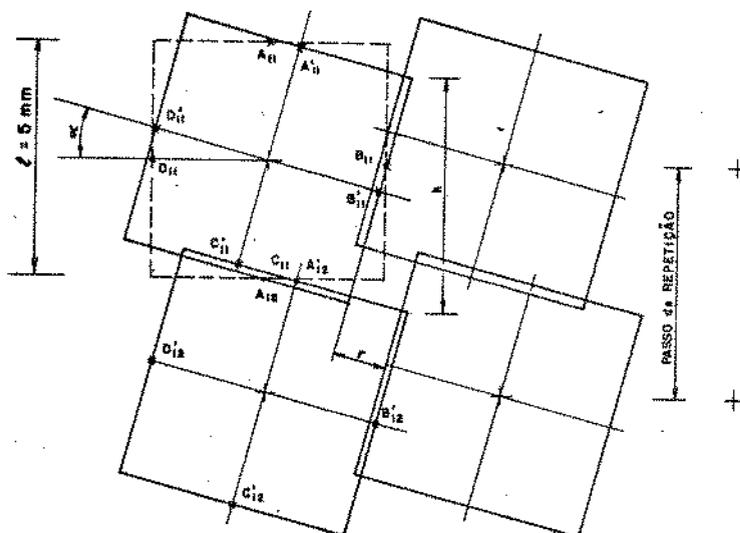


Figura 4.9 - Efeito do erro de alinhamento em uma fotorrepetição nas configurações resultantes.

A_{11}, \dots, D_{11} representam as posições ocupadas pelos pontos médios dos lados da imagem de um quadrado em que a dimensão do passo é igual à dimensão do lado. Quando não há erro de alinhamento, $\gamma = 0$ e, A_{11}, B_{11}, \dots coincidem com A_{11}', B_{11}', \dots , respectivamente. A distância, por exemplo, $\frac{A_{11}'C_{11}'}{11}$ pode ser relacionada ao erro de alinhamento da seguinte forma:

$$\overline{A_{12}^1 C_{11}^1} = r \quad (4.3)$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(r/k) \quad (4.4)$$

Foi usada a Fig. 4.6 com a qual se mediu o erro de translação. A Fig. 4.10 mostra como as configurações laterais das imagens adjacentes se encaixam em uma repetição, e como os parâmetros usados na medida de α se relacionam.

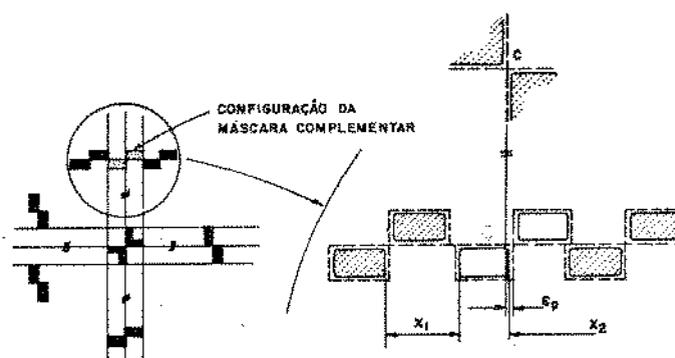


Figura 4.10 - Modelo para medição do α .

Na ocorrência de erros de posicionamento e espalhamento e , tendo-se em vista que o ângulo de desalinhamento é bem pequeno, pode-se escrever o erro de alinhamento da seguinte forma:

$$\alpha \approx \text{sen}^{-1}(z - 2\Delta e_e - \Delta \text{et}(x)/25 \text{ mm}) \quad (4.5)$$

ou

$$\Delta \alpha r \approx z - 2ee - \text{et}(x) \quad (4.6)$$

z é medido com o microscópio Leitz

$2ee = 3 \mu\text{m}$ para o nível de exposição da PAR. Nesse caso particular, medido conforme secção anterior. A magnitude desse erro decorre do fato de ter sido usado um baixo nível de sensibilização da emulsão para tornar possível observar-se possíveis superposições de áreas.

$\text{et}(x)$ é o erro de posicionamento, medido conforme a secção anterior..

Em 5 fotorrepetições diferentes, cuidadosamente realizadas, encontraram-se os seguintes resultados:

	ϵ_r (μm)
1	1,3
2	1,9
3	1,7
4	1,5
5	1,4

Tabela 4.3 - Valores associados às medidas do erro de rotação.

Da tabela 4.3 extrairam-se os valores:

1) $\bar{\epsilon}_r = 1,6 \mu\text{m}$
2) $\Delta\epsilon_{r_{\text{máx}}} = \pm 0,3 \mu\text{m}$

Ora, o erro de alinhamento apresenta duas componentes: uma fixa devido ao ajuste de montagem do microscópio de referência e a outra, devido à própria incerteza da superposição das marcas de alinhamento com a referência. Pode-se observar que os valores acima representam, respectivamente, as componentes mencionadas.

A primeira parcela não tem efeito direto na gravação porque, independentemente do seu valor, a orientação relativa se mantém para todas as matrizes fotorepetidas. Poderia, entretanto, prejudicar a clivagem para individualização dos CIs o que não ocorre, pois sua magnitude é muito menor que a largura do traço de clivagem; que é determinado em pelo menos 50 μm .

A segunda parcela, juntamente com o erro de posicionamento afetam diretamente os parâmetros de projeto de dispositivos em termos geométricos, pois contribuem para que a superposição entre configurações de máscaras consecutivas não seja como o desejado.

Um exemplo típico é ilustrado pelo caso de fotografações para a difusão dreno/fonte e a metalização de porta de um transistor MOS de um CI - Fig. 4.10. Uma margem de folga deve ser adicionada ao comprimento L , de modo a garantir a superpo-

$$2\Delta L = [\epsilon p] + [\epsilon \Delta r] \quad (4.7)$$

sição completa da área do canal pela metalização da porta. Isto tem como consequências imediatas a diminuição da densidade de "componentes" no circuito, e, nesse caso específico, aumentar as capacitâncias parasitas de cada transistor que compromete a resposta em frequência.

Podemos ainda observar que a parcela não constante do erro de rotação depende da atitude do operador, pois o alinhamento é feito por superposição de marcas e iterativo, havendo portanto uma incerteza devido a largura do traço e a transi-

ção do contraste . Com procedimentos cuidadosos obteve-se o valor contido na relação , o qual está de acordo com o previsto no Capítulo III, e que a faixa de variação é aproximadamente o limite de precisão da medida com o microscópio utilizado.

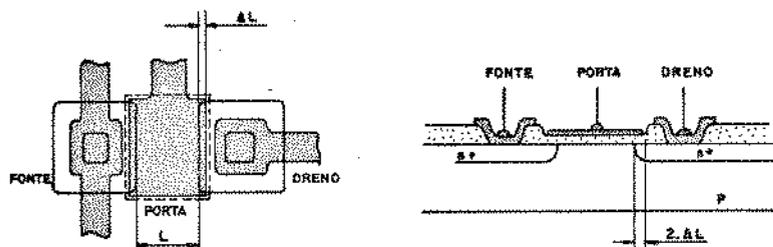


Figura 4.11 - Ilustração simplificada de um transistor MOS em um CI em que se mostram as implicações dos erros de alinhamento e posicionamento através da tolerância $2\Delta L$.

4.4 O Controle dos Processos

A densidade óptica da emulsão revelada é um parâmetro que permite controlar outra fonte de erro nas dimensões das imagens nas PARs, as quais são decorrentes dos processos associados à exposição e revelação das imagens. No caso da revelação influenciam:

1. estado dos reagentes - grau de oxidação do revelador por uso ou envelhecimento
2. temperatura ambiental
3. manipulação
4. tempo de revelação

A temperatura é, geralmente, mantida constante por controladores de temperatura em "banho-maria". Visto que não é praticável quantificar do estado do revelador, o incremento no tempo de revelação para compensar o enfraquecimento, é obtida na prática, segundo as facilidades disponíveis. Para o propósito de medir o erro de espalhamento com a exposição foi sempre usado revelador recém preparado, sem uso anterior, além de mantidas constantes a temperatura e os demais procedimentos. Com isto foi possível caracterizar a variação do erro de espalhamento decorrente da variação da energia de excitação da lâmpada de Xe da FR.

A disparos que ocorrem imediatamente após a sinalização por lâmpada piloto de que o nível mínimo de energia do capacitor de carga (limites definidos na secção 3.27) foi atingido e muito tempo depois, correspondem energias ligeiramente diferentes. Em testes realizados nessas condições não foi possível notar erro de espalhamento significativo.

Atitudes equivalentes são adotadas em relação aos processos de exposição e ataque químico.

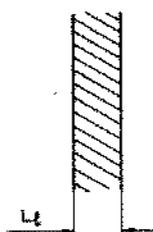
4.5 Regras para Projetos de Máscaras

A partir dos resultados obtidos e discutidos os parâmetros geométricos usados como regras de projeto mínimas para utilização no LED e considerando apenas a fotorrepetidora foram definidos.

1. Menor largura de linha sobre óxido ou metal

$$L = 5 \mu\text{m}$$

$$|\Delta L| < 1,5 \mu\text{m}$$

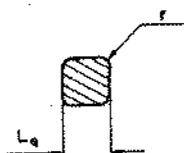


2. Menor configuração

$$L = 5 \mu\text{m}$$

$$|\Delta L| < 1,5 \mu\text{m}$$

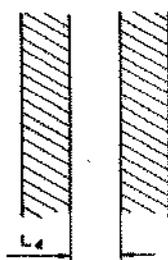
$$r \approx 2 \mu\text{m}$$



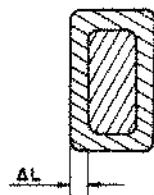
3. Menor espaço entre linhas na mesma máscara

$$L = 5 \mu\text{m}$$

$$|\Delta L| < 1,5 \mu\text{m}$$



4. Tolerância mínima entre bordas de configurações encaixantes em fotografações consecutivas.



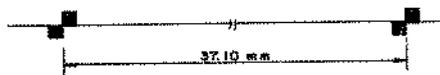
$$\Delta l = 2,5$$

5. Área total de circuito

a) $A = 2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$
ou
b) $A = 5 \times 5 \text{ mm}^2$

6. Distância entre marcas de alinhamento

Para a matriz imediatamente anterior à fotorepetição



CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A APLICABILIDADE DO SISTEMA

A litografia óptica ainda será largamente usada na fabricação de micro circuitos porque é uma técnica com parâmetros bem estabelecidos, por ter mantido comprovada viabilidade e por ter sido o seu uso bastante difundido, atendendo aos requisitos necessários em diversos segmentos do campo de fabricação de dispositivos eletrônicos.

Nos setores de vanguarda da pesquisa, a solicitação de maiores velocidades de processamento de sinais e maior versatilidade dos CIs evidenciam a exigência e empenho de esforços para que dimensões cada vez menores, sejam gravadas para circuitos cada vez mais complexos. Nesse domínio a tendência é a incorporação - onde houver disponibilidade de recursos - das técnicas litográficas por feixe eletrônico. Algumas indústrias começaram a explorar a confecção de máscaras em filmes metálicos por esse método, sendo usadas na exposição de fotorresistes pelo método convencional em contato.

A técnica intermediária - projeção óptica - representa, do ponto de vista técnico, apenas uma evolução dos métodos litográficos tradicionais no que tange a requisitos de sistemas óptico-mecânicos mais elaborados pois requerem sistemas de alinhamento e focalização automatizados.

Os métodos da litografia óptica, no que concerne às mínimas dimensões, esbarram nos limites impostos pelos efeitos de difração, pelos erros de superposição (alinhamento) das configurações introduzidos pelos sistemas de posicionamento de coordenadas e pelas características relacionadas ao ataque químico para abertura de janelas.

Na caracterização do SGM de que trata este trabalho, esses limites foram investigados.

A resolução foi determinada a partir de cartas de resolução (ver secções 3.1.6 e 3.1.7). O resultado observado é que linhas de 2 μm aparecem resolvidas quando gravadas em PAR, nas condições em que o equipamento deve operar normalmente. Tendo em vista que a resolução nominal na imagem espacial é de 600 linhas/mm, - o que corresponde a barras com largura de aproximadamente 1,3 μm - pode-se concluir que o sistema óptico adotado - estrutura óptica, arquitetura e método de construção - permitiu o aproveitamento da capacidade potencial de resolução de objetiva.

Para caracterizar o erro de alinhamento a situação real foi simulada em uma única PAR. Inicialmente uma fotorrepetição era feita; em seguida, a matriz intermediária era retirada e recolocada na posição invertida (180°) e, após, processada nova fotorrepetição nas mesmas coordenadas de antes (ref. secção 4.3.1).

Os erros de repetição foram observados durante dois anos de operação da fotorrepetidora. Os resultados tem evoluído de um valor médio de 2,5 μm em 1980 para 0,8 μm , em 1981, - operação em condições ótimas - após identificação das reais fontes de erro que, de início, acreditava-se residir na localização e manipulação dos blocos padrão. As causas, porém, eram originadas pela existência de pequenos sulcos devido à usinagem das superfícies guia das esferas, pela possível troca destas durante jor

nadas de manutenção e (ou) ainda pela irregularidade dos seus diâmetros. Essa identificação foi dificultada a princípio porque, nesse caso, o erro de alinhamento medido em uma direção era originado na plataforma que define a outra direção de movimento da plataforma superior e a utilização de apenas 3 esferas - 2 no sulco VV e uma no VL - para definir cada deslocamento foram as providências tomadas que possibilitaram alcançar os atuais limites para o erro de alinhamento. Na seção seguinte sugere-se o uso do sistema de definição do deslocamento por superfícies prismáticas como solução aos problemas acima expostos.

Além disso, a viabilidade do uso de blocos padrão como elemento posicionador foi verificada acoplando-se o relógio comparador de 1 μm de resolução na própria direção do deslocamento. O bloco era primeiramente colocado em sua posição através de pinças e posteriormente com o operador segurando-o (efeito de aquecimento por manuseio) pelas extremidades por 30 segundos, não tendo sido observadas variações perceptíveis na leitura.

Quanto ao erro de alinhamento por rotação, foi observada uma parcela de modo comum (fig. 2.2) que foi corrigida ajustando-se a orientação do microscópio.

A verificação do limite de utilização das máscaras obtidas com a fotorrepetidora foi feita primeiramente abrindo-se janelas no fotorresiste e posteriormente com ataque químico ao óxido. No primeiro caso procurou-se reduzir ao máximo a espessura das camadas aplicadas até o surgimento de irregularidades no sentido de minimizar os efeitos provocados por difração. Deste ponto aumentava-se a espessura do filme para verificar através da exposição de cartas de resolução a situação que conduzisse à maior resolução - efeito de onda estacionária no fotorresiste. No resiste positivo linhas com cerca de 3 μm foram abertas e, no negativo, em torno de 3,8 μm .

A resolução máxima alcançada para ataque químico no óxido fino-1000 Å - foi de aproximadamente 3,5 μm para o fotorresiste positivo e 4 μm para o negativo, em substrato plano. Esses números aumentam na prática após sucessivas fotografações, pois a superfície da lâmina vai se tornando mais irregular a cada etapa. A redução da resolução na etapa de exposição do fotorresiste decorre da redução do contraste máximo e da taxa de transição entre máxima e mínima densidade óptica na máscara para as menores dimensões. Aumentar a exposição para aumentar o contraste implicaria em erro de espalhamento maior, limitando, de outra forma, a resolução útil do SGM. Nesse caso linhas com largura nominal de 8 μm foram reproduzidas com 6 μm de largura, com degrau criado por uma gravação anterior em fotorresiste com 8500 Å de espessura.

5.1. Críticas e Modificações ao Projeto Inicial

- As considerações acima mostram que os resultados alcançados foram satisfatórios em relação às especificações iniciais, porém os parâmetros operacionais (padrão) finais foram modificados conforme descrito na sessão 4.5.

- Foi redefinido um sistema de apoio para as PAR em virtude de variações de sua espessura em valor maior que a profundidade de foco. A modificação consiste em fazer a referência de apoio da PAR, por cima, no plano da emulsão, conforme a Fig. 5.1.

Os resultados obtidos com essa mudança foram bons no que diz respeito à manutenção do foco - nenhum ajuste foi necessário após mais de seis meses desde a instalação - e permitiu, ainda, maior facilidade de manipulação da PAR.

- O movimento das plataformas através de esferas foi considerado crítico em virtude do processo de usinagem dos sulcos guias. Este mesmo sistema permitiria melhores resultados se as plataformas fossem lapidadas, tendo-se ainda esferas de

Tabela 5.1 - Características alcançadas com o SGM.

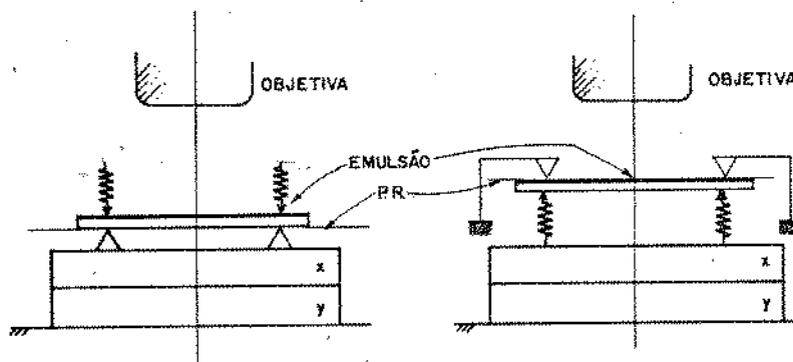


Figura 5.1 - Planos de referência para as PAR, (a) primeira (b) segunda versão.

precisão. Entretanto, ambos não eram disponíveis na época da confecção da mesa. Recomenda-se a modificação para o sistema de definição do movimento por superfícies prismáticas. O uso de ar comprimido permitiria facilitar o movimento com isenção de lubrificantes. A fixação das plataformas nas coordenadas selecionadas pode ser feita por vácuo. O controle do movimento por comandos eletrônico-pneumático.

- Um controle suave para o ajuste angular da plataforma de alinhamen

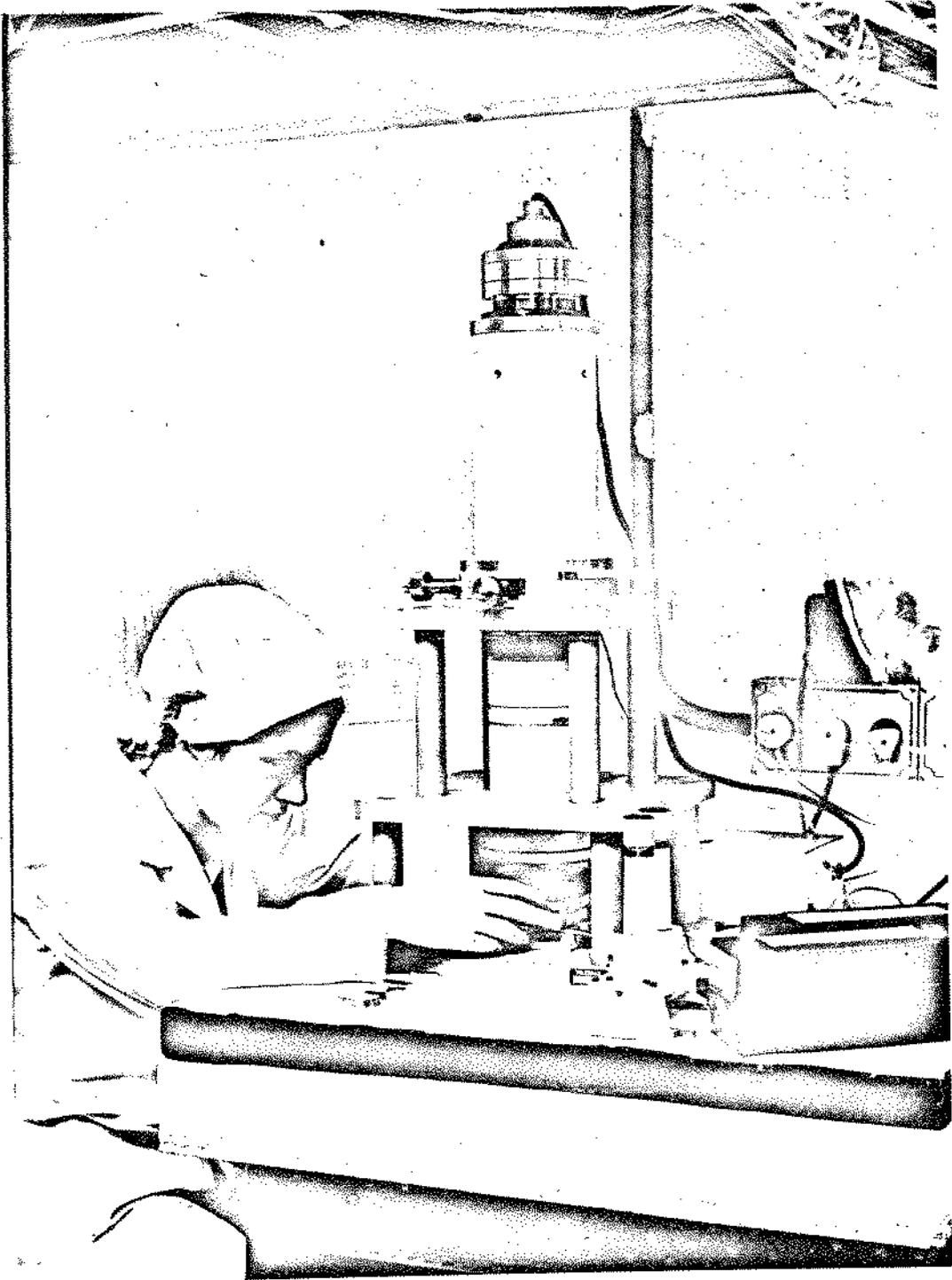


Figura 5.2 - A instalação da fotorrepetidora.

to XYθ tornaria os procedimentos mais cômodos.

5.2. O Uso do Sistema

A fotorrepetidora foi montada sobre uma mesa de granito, sob uma estação de fluxo laminar, junto a uma linha de nitrogênio, uma de vácuo e uma de força, como ilustra a Fig.

O tempo médio necessário para a realização de uma fotorrepetição é de cerca de 30 minutos.

Esta operação pode ser feita por um técnico com pouco tempo de treino. Alunos de colégio técnico, estagiários do laboratório, puderam conhecer e atualizar satisfatoriamente a máquina em uma semana.

As instruções de uso da fotorrepetidora e dos processos associados à fotografação estão documentados nas IEPs (Instruções para Execução de Processos) - publicações internas do LED - incorporadas a esse trabalho no Apêndice D.

5.3. Atitudes para Otimização de Projeto de Dispositivos

O conhecimento das características dos processos permitem um melhor aproveitamento da capacidade do sistema de geração de máscaras. As principais considerações dizem respeito à repetibilidade dos resultados e à grandeza e polaridade (\pm) dos desvios em relação ao valor esperado. Manter sob controle os parâmetros de atuação (e os interferentes) dos processos garante a repetibilidade dos resultados.

Para controle do desvio de dimensão gravada dois fatores devem ser considerados. O primeiro é o desvio decorrente do erro de espalhamento na emulsão, cuja magnitude foi considerada na secção 3. Outro fator é a natureza da máscara e, conseqüentemente, do fotorresiste (ou vice-versa) empregados. Se for desejado abrir uma janela numa fotorresiste, as tendências são aumentar a largura da janela se é empregado o tipo positivo e diminuir no caso contrário. Isto é ilustrado na Fig.

Estes efeitos podem ser usados, por exemplo, para possibilitar gravação de configurações simples, além do limite de resolução útil da fotorrepetidora.

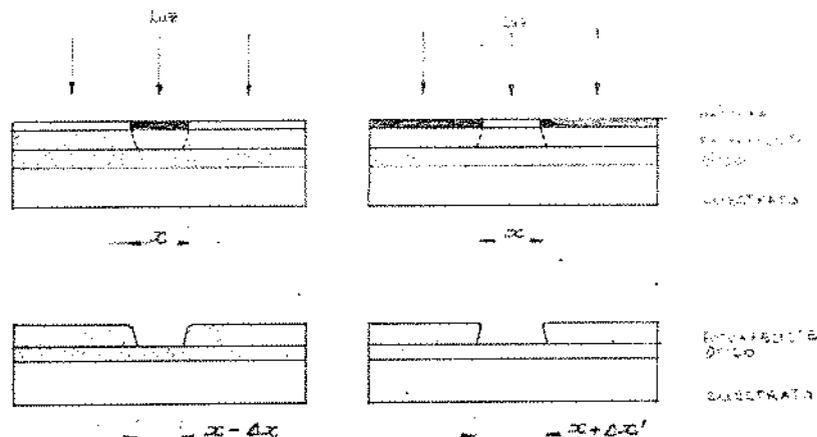


Figura 5.3 - Ilustração da conveniência de se empregar um ou outro tipo de fotorresiste (máscara).
Desvios típicos observados vão de 0,5 a 1 μ m.

5.4. Proposição para Futuro Desenvolvimento

A estrutura da fotorrepetidora e o aprendizado alcançado no seu desenvolvimento abrem a possibilidade de evolução para um sistema mais poderoso, ou seja o da projeção óptica, que apresenta como principais vantagens o aumento da resolução, a eliminação de etapas (em consequência os erros ou falhas associados) e ainda aumentar a vida útil das máscaras. Este sistema exige uma mudança na fonte de luz, de modo a acomodar uma lâmpada de mercúrio. A estrutura óptico-mecânica podem ser incorporados sistema de correção automática de foco e alinhamento da lâmina.

O sistema de posicionamento usando blocos padrão pode ser usado, confeccionando-se os gabaritos em uma única peça, sendo as superfícies lapidadas e definidas de modo a acomodar diversos passos de repetição e semi-automatizados por controles eletrônicos/pneumáticos. As esferas seriam substituídas por superfícies cilíndricas ou prismáticas, para maior precisão de deslocamentos.

APÊNDICE B

TRAÇADO DE RAIOS (RAY TRACING)

O método acima denominado consiste num procedimento através do qual pode-se determinar a trajetória de raios de luz, que são retratados ao atravessar uma superfície que separa meios com índices de refração n_1 e n_2 .

Desde que seja possível determinar a trajetória após a refração, a aplicação do método a classes particulares de raios (marginais e principais) conceituados dentro da óptica geométrica permite caracterizar parâmetros fundamentais que caracterizam o sistema óptico, tais como, localização de pontos focais, planos principais, pupilas, aberrações esféricas, etc.

Projetistas de sistemas ópticos têm se utilizado largamente do método para analisar e iterativamente atuar no sistema do ponto de vista da óptica geométrica. Inicialmente através do método gráfico em que se utilizam de esquadros e compasso para traçar os diagramas correspondentes em papel, recentemente, com o advento das calculadoras programadas e micro-computadores, programas para essa finalidade tem sido escritos.

Os fundamentos do método estão baseados em relações da geometria elementar e na Lei de Snell, sintetizada pela eq. (B.1).

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (\text{B.1})$$

sendo i o ângulo de incidência do raio que propaga no meio de índice de refração n_1 e r o ângulo de refração, como indica a Fig. B.1.

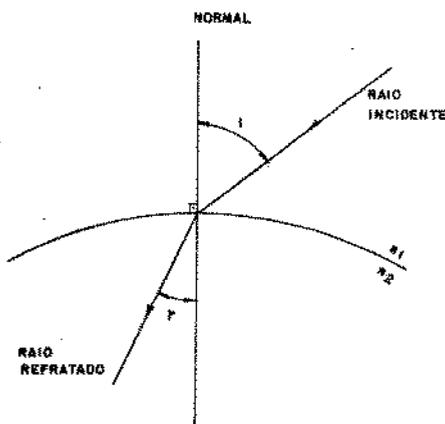


Figura B.1 - Denominação das variáveis no enunciado da Lei de Snell.

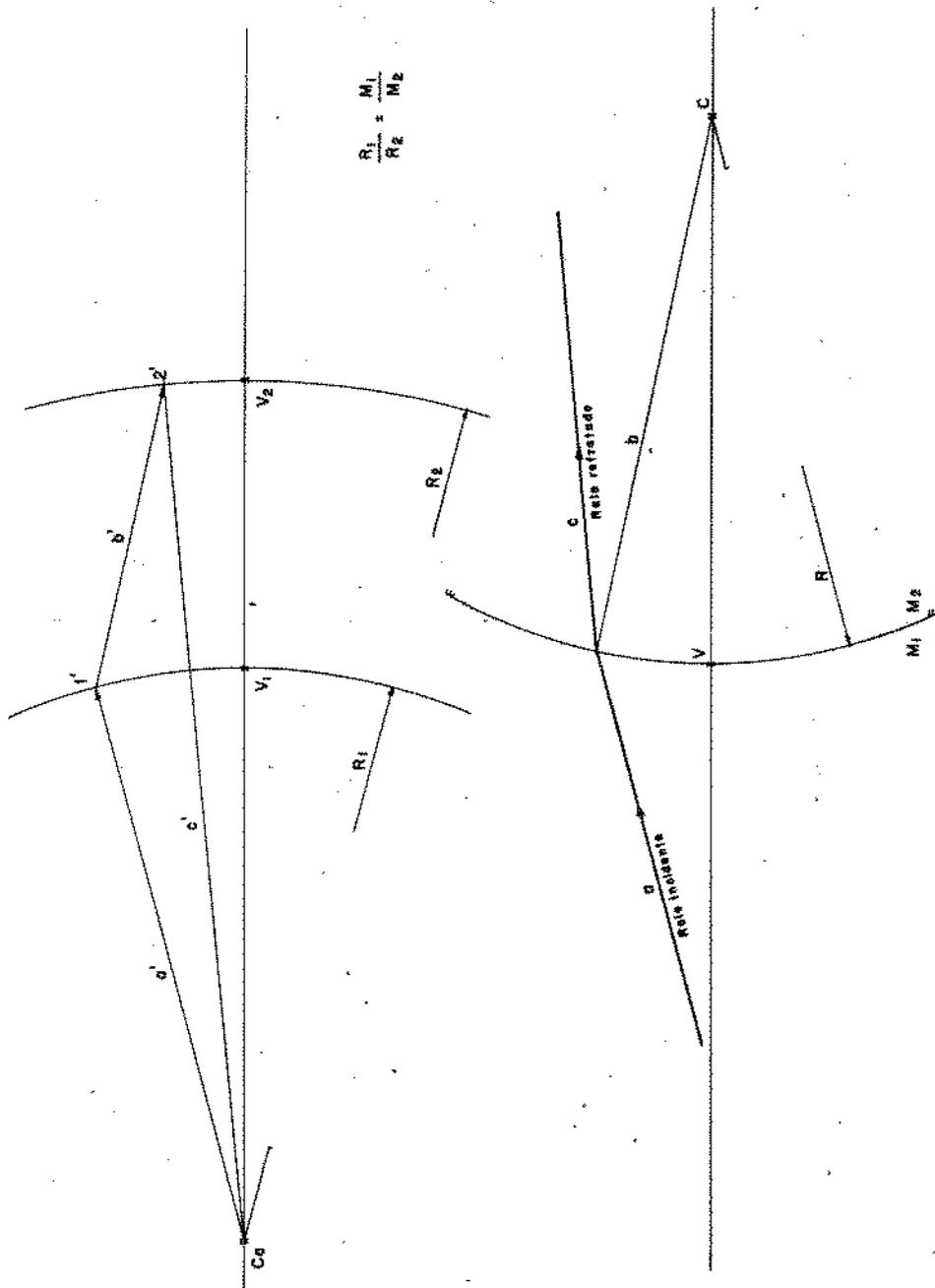


Figura B.2 - Corresponde aos passos do método de traçado de raios.

A demonstração do método descrito pelos passos abaixo relacionados pode ser encontrada nas refs.

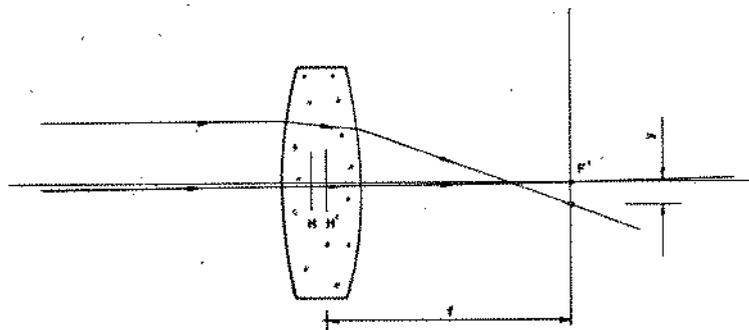
O Método Gráfico

Para referência considere-se a Fig. B.2. Os procedimentos se limitam a raios meridionais.

1. Traça-se o diagrama do dióptro, representando o eixo óptico principal (EOP) e o centro de curvatura (C).
2. Traça-se um diagrama auxiliar em posição arbitrária contendo um eixo auxiliar (EA), paralelo a (EOP) e arcos com raios proporcionais aos índices de refração.
3. Traça-se o raio a cuja trajetória após refração quer-se determinada. A interseção de a com o dióptro define o ponto 1.
4. Traça-se a' paralela a a, desde Ca até S₁, definindo aí, o ponto 1'.
5. Une-se o ponto 1 a C, resultando o segmento b.
6. Partindo de 1', traça-se o segmento b', paralelo a b, definindo em S₂ o ponto 2'.
7. Une-se 2' a Ca, resultando no segmento C'.
8. A trajetória resultante é definida pelo segmento C, traçado paralelo a C', partindo de 1.

A generalização do sistema para diversas superfícies e diversos meios é intuitiva.

A precisão dos resultados alcançados decorre da limitação de localização dos arcos e traçado das paralelas. Um desenho cuidadoso feito com lápis apropriados, esquadros para traçado das paralelas e usar escala ampliada - formato A₁, por exemplo conduzem a resultados precisos dentro de 5%. A Fig. B.3 mostra como a aberração esférica (AE) transversal é definida para uma lente. Na Fig. B.4 mostra-se a aplicação do método ao condensador a lentes (o doublet simétrico, na determinação dos pontos e planos principais, comprimento focal e perfil de aberração esférica.



$$(AE) = \frac{Y}{f} \times 100\%$$

()

Figura B.3 - Parâmetros da definição da aberração esférica.

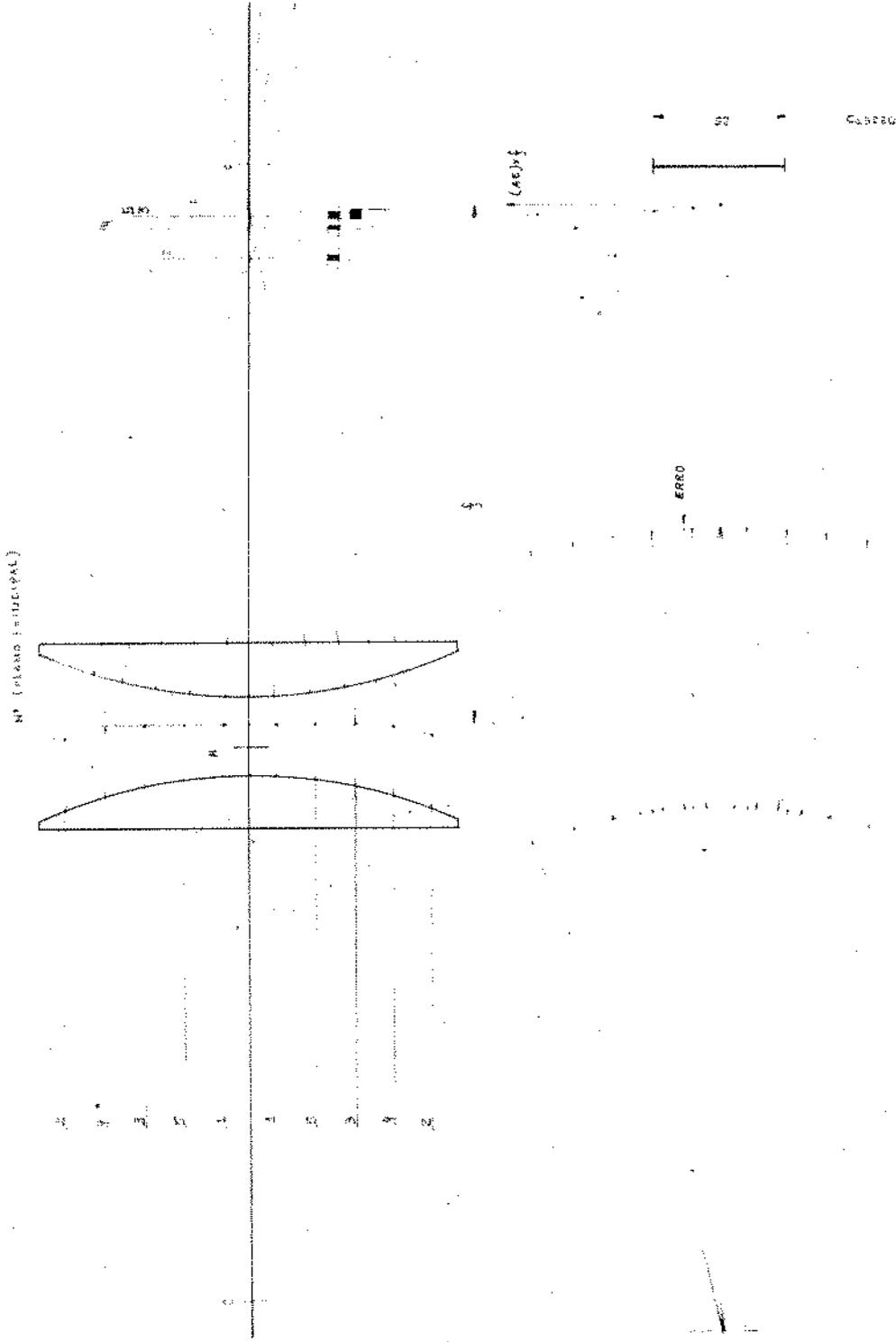


Figura B.4 - Análise do condensador a lentes pelo método de traçado de raios.

APÊNDICE C

O CONDENSADOR A LENTES - CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

Quando foi definida a estrutura óptica para o sistema de iluminação e de formação de imagem da fotorrepetidora - vide secção 3.2.8 - o comprimento focal do condensador foi arbitrado em $f = 100$ mm. Este valor foi considerado razoável por acomodar um compromisso em atender: 1) as especificações requeridas pela definição da estrutura óptica (diâmetros da transparência, fonte e imagem, localização relativa objeto/imagem, uniformidade da iluminação, etc.); 2) a gama realizável dos parâmetros de construção das lentes pelo fabricante consultado (raios de curvatura e o índice de refração do vidro); 3) maximizar a energia coletada da fonte, ou seja, procurar reduzir o comprimento focal do condensador para aumentar o ângulo sólido de captação de luz; 4) minimizar a dimensão vertical da estrutura para torná-la mais estável em relação a vibrações e; 5) minimizar as aberrações esféricas para o valor f adotado.

As relações matemáticas derivadas da Óptica Gaussiana e sumarizadas abaixo, foram usadas na obtenção de uma definição inicial do sistema para atender a especificação básica de partida ($f = 100$ mm), e nas reavaliações iterativas - juntamente com os procedimentos gráficos descritos no apêndice B - na procura de uma solução melhorada.

c-1. Definição e relações para Uma Lente Espessa.

As relações que estabelecem distâncias e dimensões entre objeto e imagem produzida por uma lente espessa ou um sistema de lentes são caracterizadas pelos planos principais e comprimento focal, os quais são definidos segundo a fig. 1.c.

Figura 1.c - Os planos principais (H, H'), pontos (F, F'), e comprimentos focais (f, f') para uma lente espessa ou sistema de lentes.

Com estes elementos e com o traçado de raios particulares - fig. 2.c - é possível estabelecer as relações de (1.c) a (5.c).

$$\overline{H'V'} = (n-1)t f/nR_1 \quad (8-c)$$

Figura 3-c - Parâmetros de uma lente espessa.

c-2. Combinação de Lentes Espessas.

Quando duas lentes espessas são combinadas, o sistema equivalente pode ser caracterizado através dos parâmetros de cada lente. Com os caracteres definidos na fig. 4.c, as relações finais são as de (9-c) a (12-c).

Figura 4-c - Um sistema formado por duas lentes espessas.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{a}{f_1 f_2} \quad (9-c)$$

onde

$$a = \overline{H_1' H_2} \quad (10-c)$$

$$\overline{H_1 H} = af_1 / (f_1 + f_2 - a) \quad (11-c)$$

$$\overline{H_1' H_2'} = 2af_2 / (f_1 + f_2 - a) \quad (12-c)$$

O "doublet" de de lentes plano-convexas foi a estrutura adotada, como foi visto no capítulo 3, para o qual estabeleceu-se os resultados que seguem pela aplicação dos critérios acima descritos.

TABELA 1-C

DADOS RELATIVOS ÀS LENTES	DADOS RELATIVOS AO SISTEMA
$R_1 = \infty$ (mm)	$f_1 = f_2 = 210,33$ (mm)
$R_2 = -110$ (mm)	$\overline{V_1 H_1} = \overline{H_2' V_2'} = 6,57$ (mm)
$R_3 = 110$ (mm)	$\overline{H_1' H_1'} = \overline{H_2' H_2'} = 3,43$ (mm)
$R_4 = \infty$ (mm)	$a = 18,43$ (mm)
$n = 1,523$	$t = 10$ (mm)
$ R_1 = R_4 = \infty$ (mm)	$f = 110$ (mm)
$ R_2 = R_3 = 110$ (mm)	$V_1 V_2' = 38,43$ (mm)
$n = 1,523$ (mm)	$\Delta h = (\overline{HH'}) = 6,0$ (mm)

A fig. 4.8 mostra a comparação desses resultados com a análise gráfica, na qual também é registrado o perfil de aberração esférica transversal para esta configuração.

BIBLIOGRAFIA

1. Wolf, M.F., "The Genesis of the Integrated Circuit", IEEE Spectrum, Vol.13, nº 8, August, 1976.
2. DIGIBRAS, "Semicondutores: A Indústria, a Tecnologia e sua Importância Estratégica", 10 de abril de 1978 - RJ.
3. Mammana, C.I.Z., "Processos de Construção de Microcircuitos", Dados & Idéias, Vol. 3, nº 5, abril/maio, 1978.
4. Mammana, C.I.Z., "Um Sistema de Implantação de Tecnologias de Confecção de Circuitos Integrados", VII SEMISH, Campinas, Julho, 1980.
5. Warner, R.M., and J.N. Fordemwalt, "Integrated Circuits: Design, Principles and Fabrication", McGraw Hill, NY. 1965.
6. De Forest, W.S., "Photoresist: Materials and Process", McGraw Hill, 1975.
7. V.L. Rideout, "VLSI Lectures", IBM Corporation Armonk, N.Y., July 1980.
8. Gordon, E.J., and Herrot, D.R., "Pathways in Device Lithography", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-22, nº 7, July, 1975.
9. Greenwich, J.S., "X-Ray Lithography: Part I - Design Criterion for Optimizing Resit Energy Absorption; Part II - Pattern Replication with Polymer Masks", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-22, nº 7, July 1975.
10. Yew, N.C., "Electron Beam - Now a Practical LSI Production Tool", Solid State Technology, August, 1977.
11. S. Middelhoek, "Projection Masking, Thin Protoresiste Layers and Interface Effects", IBM J.Res. Development, March, 1970.
12. Dill, F.H., "Optical Lithography", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-22, nº 7, July, 1975.
13. J.D. Cuthbert, "Optical Projection Printing", Solid State Technology, August, 1977.
14. A.N. Broers and T.H.P. Chang, "High Resolution Lithography for Microcircuits", IBM J.Res. Development, November, 1978.
15. Scott, J.P., "An Electron Image Projector with Automatic Alignment", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-22, nº 7, July, 1975.
16. Chang, T.H.P., "Instrumentation for Electron Beam Lithography", Solid State Technology, July, 1975.
17. Fink, D.G. "Electronics Engineers Handbook" , Sec. 6.1, McGraw Hill, 1975.
18. Sousa, M.F., "Sistema de Geração Automática de Máscaras de Processo para Confecção de Circuitos Integrados", Pub. FEC, dezembro, 1981.
19. Bezerra, P.C., "PAC-1: Um Sistema de Auxílio a Projeto de Circuitos Integrados", V SEMISH, Rio de Janeiro, julho, 1978.
20. Bezerra, P.C., "SPA-D: Um Sistema de Projetos Automatizados de Circuitos Digitais", Codex RT-021, LED-FEC/1980.
21. Harper, C.A., "Handbook of Materials and Process for Electronics", McGraw Hill, 1970.
22. Reis, Fº, C.A., "Gerador Automático de Máscaras usadas na Confecção de Circuitos Integrados", LED/FEC/UNICAMP, 1978.
23. Nippon Kogaku, K.K., "Ultra Micro Nikkor Lenses", December, 1977.

24. Hardy, L.H. and F.H. Perrin, "The Principles of Optics", McGraw Hill, 1932.
25. Eastman Kodak Company, "Kodak High Resolution Plate", Pamphlet nº P.47, Rochester, 1970.
26. Lobel, L. "Manual de Sensitometria. La Técnica de la Medición de Los Materiales Fotográficos", Omega, Barcelona, 1973.
27. Stevens, G.W.W., "Microphotography", 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. N.Y., 1968.
28. IEP - Publicação Interna do LED/UNICAMP - "Fotorredução Sobre Fotolito" - nºs FR-003 e FR-004, março, 1980.
29. IEP - Publicação Interna do LED/UNICAMP - "Fotorredução sobre Placas de Alta Resolução", nºs FR-001, FR-002 e FR-007, março, 1980.
30. Eastman Kodak Company, "Physical Characteristics of Glass for Kodak Photographic Plates", Pamphlet nº Q-35, Rochester, 1973.
31. IEP - Publicação Interna do LED/UNICAMP, "Fotorrepetidora LED/", nº FR-005, março, 1980.
32. Laski, D., "Emulsion Mask Processing Techniques", Solid State Technology, June, 1975.
33. O'Malley, A.J., "Technological Implications in the Photomasking Process", Solid State Technology, June 1975.
34. Altman, J.H., "A Simple Camera for the Measurement of Photographic Resolving Power", Photographic Science and Engineering, vol. 5, nº 1, Jan./Feb., 1961.
35. Born, M. and Wolf, E., "Principles of Optics", Pergamon Press, 5th ed. 1975.
36. Goodman, I.W., "Introduction to Fourier Optics", McGraw Hill Book Co., N.Y., 1968.
37. Eastman Kodak Company, "Techniques of Microphotography", Pamphlet nº P-52, 1976.
38. E. Hecht, A. Zajack; "Optics", Addison-Wesley, 1974.
39. Gaskill, J.D., "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics", John Wiley & Sons, 1978.
40. U.S. Department of Commerce/NBS, "Semiconductor Measurement Technology", NBS Special Publication 400-19, sec. 7-1, Jan./Feb., 1975.
41. Klein, M.V., "Optics", John Wiley & Sons, 1st ed. 1970.
42. Teledyne Gurley, "Precision Resolution Targets", Bulletin 8000, October, 1974.
43. Reis, C.A., "Projeto de Um Banco Óptico", Des. nº F0-001 - LED, 1975.
44. Williamson, D., "Cone Channel Condenser Optics", J. Opt. Soc. Amer. August 1963.
45. Kapany, N.S., "Fiber Optics-I; Optical Properties of Certain Dielectric Cylinders", J. Opt. Soc. Amer., N.Y. May, 1957.
46. Edgerton, H., "Electronic Flash, Strobe", Cap. 2, John Wiley & Sons, N.Y. 1970.
47. Markiewicz and Ammett, "Design of Flash Lamp Driving Circuits", IEEE - Journal of Quantum Electronics, Nov. 1966.