

CDU: 526.918.1

DENIZAR BLITZKOW

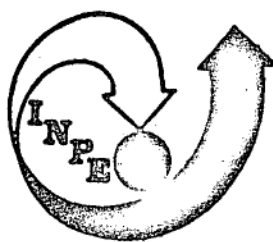
LIC. MATEMÁTICA

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO
APLICAÇÃO AO ESTUDO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS
AEROFOTOGRAFICOS

Tese apresentada ao Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Paraná como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre em Ciências
com grau em Geodésia

CURITIBA - PARANÁ

1973

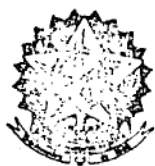


INPE-525-LAFE

*FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO
APLICADA AO ESTUDO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS
AEROFOTOGRAFICOS*

Setembro de 1974

Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq)
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE)
José dos Campos - SP - Brasil



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
CONSELHO NACIONAL DE PESQUISAS
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS
São José dos Campos - Estado de S. Paulo - Brasil

*FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO
APLICADA AO ESTUDO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS
AEROFOGRÁFICOS*

Este trabalho foi apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciência, pelo Sr. Denizar Blitzkow de este Instituto e a presente publicação foi autorizada pelo abaixo assinado,

Fde Mendonça
Fernando de Mendonça
Diretor Geral

*Minha profunda homenagem ao meu
saudosos pai e à minha querida mãe.*

Agradeço profundamente,

ao Prof. Placidino Machado Fagundes, pelo conselho, orientação e apoio durante o trabalho.

ao Dr. Camil Gemael, pela generosa colaboração, colocando à disposição todo o material do Centro de Estudos e Pesquisa de Geodésia e além disso, facilitando em tudo o que estava ao seu alcance a aquisição da bibliografia na sua totalidade estrangeira.

ao Abraham Szule pela valiosa colaboração prestada na fase final da tese.

à Direção do Instituto de Pesquisas Espaciais pela colaboração, disponibilidade de tempo e franquia a todos os setores de apoio do referido órgão.

à Tereza Tokiko Takahashi, à Sueli Aparecida de Godoi e à Jurema Aoyama pelos serviços de datilografia.

a todos os colegas e amigos que de alguma maneira prestaram sua colaboração e incentivo.

RESUMO

Considerando que no Brasil nada se escreveu sobre Função de Transferência de Modulação e que a bibliografia estrangeira apresenta poucos trabalhos que conceituem e definam de maneira clara o assunto, procuramos fazer um trabalho o mais objetivo possível. Primeiramente, definiremos "Transformadas de Fourier" dando as propriedades fundamentais. Em seguida, conceituaremos Função de Transferência de Modulação. Desenvolveremos, posteriormente, um estudo sobre os três principais elementos que interessam à fotogrametria: Função de Transferência de Modulação Fotográfica, Função de Transferência Óptica e Função de Transferência de Modulação do Movimento da Imagem. Ao depois, dedicaremos um capítulo ao estudo da precisão e da exatidão dos métodos de determinação das Funções de Transferência de Modulação, questões ainda bastante discutidas, sobretudo no que diz respeito à exatidão dos vários processos de determinação. Finalmente, analisaremos o problema da padronização das frequências e dos dados, relativos à Função de Transferência de Modulação. Neste sentido, dedicaremos uma atenção particular ao que diz respeito à simplificação dos dados fornecidos ao usuário, defendendo no final um padrão de especificações do filme e da lente.

RESUMÉE

En considérant qu'au Brésil rien n'a été écrit sur la Fonction de Transfert de Modulation et que la bibliographie étrangère présente très peu des travaux qui conceptent et définissent d'une manière, très claire le sujet, nous avons cherché à faire un travail le plus objectif possible. Nous définirons, d'abord les "Transformées de Fourier" en donnant les propriétés fondamentales, puis le concept de Fonction de Transfert de Modulation et nous développerons une étude sur les trois principaux éléments que intéressent la photogrammétrie: la Fonction de Transfert de Modulation Photographique, la Fonction de Transfert Optique et la Fonction de Transfert de Modulation du mouvement de l'image. Ceci fait, nous consacrerons un chapitre à l'étude de la précision et de l'exactitude des diverses méthodes de détermination des Fonctions de Transfert de Modulation questions encore bien pendentes, en particulier pour l'exactitude des différentes manières de détermination. Enfin, nous analyserons le problème du modèle type pour des fréquences et des données à être présenter à l'utilisateurs. Dans ce sens, nous insisterons sur l'aspect de simplification des données fournies à celui-ci et nous défendrons un modèle type sur les specifications des films et des objectifs.

ÍNDICE

TÍTULO	i
ASSINATURAS	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
RESUMEE	vi
ÍNDICE	vii
INTRODUÇÃO	i
I - TRANSFORMADAS DE FOURIER	3
1.1 - Introdução	3
1.2 - Transformadas integrais	4
1.3 - Transformadas de Fourier	4
1.4 - Propriedades elementares	5
1.4.1 - A TF é linear	5
1.4.2 - Translação	6
1.4.3 - A TF é simétrica	7
1.4.4 - Dilatação de abcissa	8
1.4.5 - Relações de simetria	9
1.5 - Transformada inversa	11
1.6 - Transformada co-seno	11
1.7 - Transformada seno	12
1.8 - Teorema da convolução	12

II - CONCEITOS E DEFINIÇÕES	14
2.1 - Introdução	14
2.2 - Conceitos	14
2.3 - Definições	15
III - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO	20
3.1 - Introdução	20
3.2 - Conceito de FTM	22
3.3 - A FTM a partir de imagens	26
3.4 - FTM e Poder Resolutivo	27
IV - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO FOTOGRÁFICA	29
4.1 - O filme fotográfica	29
4.2 - Determinação da FTM de emulsões fotográficas	32
4.2.1 - Alvo senoidal	32
4.2.2 - Uso de uma fenda estreita	35
4.2.3 - Análise de gradiente de borda	36
4.3 - Dificuldades na determinação da FTM fotográfica	40
4.3.1 - O microfotômetro e o microdensitômetro	40
4.3.2 - Granulosidade	41
V - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA ÓPTICA	49
5.1 - Introdução	49
5.2 - Função Pupila	50
5.3 - Cálculo da FTO a partir da Função Pupila	52
5.3.1 - Cálculo da FEL a partir da Função Pupila	55
5.3.2 - FTO para um sistema livre de aberrações.	56

5.4 - Análise de gradiente de borda na avaliação da FTO	58
5.5 - Aparelho de análise de FTO	62
VI - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO DO MOVIMENTO DA IMAGEM .	66
6.1 - Introdução	66
6.2 - Movimento da Imagem e FTM	67
6.3 - Formulação matemática	69
6.4 - Outros movimentos	71
VII - EXATIDÃO E PRECISÃO NO CÁLCULO DE FTM	74
7.1 - Introdução	74
7.2 - Precisão	74
7.3 - Exatidão	76
7.3.1 - 1a. Experiência	77
7.3.1.1 - Equipamento	78
7.3.1.2 - Resultados	79
7.3.2 - 2a. Experiência	82
VIII - CONCLUSÃO	84
8.1 - Introdução	84
8.2 - FTM é Poder Resolutivo	85
8.3 - Padronização da FTM Fotográfica e da FTO	92
BIBLIOGRAFIA	98

- INTRODUÇÃO -

O emprego das funções de transferência como meio de analisar o desempenho de um sistema aerofotográfico, tem sido objeto de um minucioso estudo, nas duas últimas décadas, por parte de diversas entidades no mundo inteiro. O antigo poder resolutivo tornou-se pouco aceitável como fator de análise de sistemas aerofotográficos devido às suas limitações. Em vista da importância a que chegaram as Funções de Transferência de Modulação, a Comissão I do Congresso Internacional de Fotogrametria em Lausanne, 1968, acatou a resolução do Grupo de Trabalho sobre a Qualidade da Imagem, em subdividir o mesmo em dois grupos: um sobre Função de Transferência de Modulação Fotográfica e outro sobre a padronização das Funções de Transferência Óptica. A finalidade desses grupos de trabalho, além de efetuar pesquisas dentro de seu campo específico, é a de trazer ao conhecimento, em cada Congresso Internacional, os resultados das pesquisas levadas a efeito no mundo inteiro sobre os referidos assuntos.

O primeiro fruto da divisão dos dois grupos foi a apresentação de um duplo relatório no Congresso realizado no Canadá, em julho-agosto de 1972 [6, 11].

Contudo, muitos problemas ainda restam por resolver com relação ao emprego das funções de transferência de modulação em fotogrametria. Esses problemas dizem respeito sobretudo à padronização sob

um duplo ponto de vista: padronização do método de determinação e padronização nas especificações ao usuário. Com relação a este último aspecto, a Função de Transferência de Modulação, unicamente, nem sempre proporciona informação completa, particularmente em se tratando do filme. Daí a importância de outras especificações.

Com relação ao método, muito embora o Grupo de Trabalho sobre Função de Transferência de Modulação Fotográfica da Comissão I, no Congresso Internacional de Fotogrametria em Ottawa, julho-agosto de 1972, tenha concluído que o método de Análise de Gradiente de Borda dá resultados satisfatórios na prática, a exatidão do mesmo em condições operacionais ainda não foi estudada.

Assim sendo, procuramos desenvolver um trabalho visando abrir horizonte para que em nosso país também se faça alguma pesquisa contribuindo para a solução dos problemas que ainda persistem, ao mesmo tempo em que defendemos uma padronização da Função de Transferência de Modulação Fotográfica e da Função de Transferência Óptica dentro das necessidades do usuário.

CAPITULO I

TRANSFORMADAS DE FOURIER

1.1 - INTRODUÇÃO

A matemática, tal qual a conhecemos hoje em dia, desenvolveu-se a partir de certos problemas intrinsecamente interessantes, os mais antigos dos quais estão relacionados com a contabilidade, a topografia e a astronomia. Nos primórdios do século XIX, apresentaram-se à análise, problemas tais como a vibração de cordas e a condução do calor com bastante êxito, e um dos principais instrumentos que tornaram isso possível foi o emprego das séries infinitas de senos e cosenos. (O primeiro a aplicar, extensivamente, tais séries foi Joseph Fourier, daí o nome de Séries de Fourier).

As transformadas de Fourier desenvolveram-se após as Séries de Fourier, porém, adquiriram maior importância, tanto para a matemática pura como para a aplicada. Existem razões para isso, relacionadas entre si. A primeira delas é que as Transformadas de Fourier são mais maleáveis para o cálculo; outra razão é que as Séries de Fourier adaptam-se somente a funções periódicas, enquanto a teoria da transformação é aplicável a classes de funções mais gerais.

1.2 - TRANSFORMADAS INTEGRAIS

Frequentemente, em física-matemática, encontramos pares de funções relacionadas entre si por uma expressão da forma:

$$g(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) k(\alpha, t) dt \quad (1.2.1)$$

A função $g(\alpha)$ é chamada (integral) transformada de $f(t)$ pelo núcleo $k(\alpha, t)$. [2].

1.3 - TRANSFORMADAS DE FOURIER

Seja x uma variável real que admite valores desde $-\infty$ a $+\infty$. Chamaremos de R o conjunto dos números reais. $t \in R$ quer dizer que t é um número real qualquer, positivo, negativo ou nulo.

$f(t)$ é uma função de valores reais ou complexos de $t \in R$.

$f(t) \in L$ quer dizer que: $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt = \|f\|$ existe. $\|f\|$ é chamada norma de f .

Dos inúmeros tipos de transformadas possíveis, uma das mais usadas é a Transformada de Fourier (TF). Por definição a TF da função f da variável real t é a função de uma variável real $\alpha \in R$, dada por: [4].

$$g(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt \quad (1.3.1)$$

sempre que esta expressão tenha sentido. Isto ocorre sempre que $f \in L$.

Com efeito:

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt \right| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt \leq \|f\| \quad (1.3.2)$$

Então, $g(\alpha)$ existe para todo α , e é uniformemente limitada:

$$g(\alpha) \leq \|f(t)\|$$

1.4 - PROPRIEDADES ELEMENTARES

Representa-se por:

$$f(t) \xrightarrow{\text{TF}} g(\alpha)$$

a TF que transforma $f(t)$ em $g(\alpha)$.

1.4.1 - A TF é linear.

Sejam f_1 e $f_2 \in L$ duas funções somáveis. Quaisquer que sejam as constantes a_1 e a_2 resulta:

$$a_1 f_1 + a_2 f_2 \in L$$

e esta tem por TF, segundo a definição:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} (a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)) e^{-2\pi i \alpha t} dt &= a_1 \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt + \\ &+ a_2 \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt. \end{aligned} \quad (1.4.1.1)$$

Podemos concluir que:

$$\begin{aligned} f_1(t) &\xrightarrow{TF} g_1(\alpha) \\ f_2(t) &\xrightarrow{TF} g_2(\alpha) \\ a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) &\xrightarrow{TF} a_1 g_1(\alpha) + a_2 g_2(\alpha) \end{aligned} \quad (1.4.1.2)$$

"A TF de uma combinação linear de funções é a combinação linear das TF destas funções".

1.4.2 - Translação

Se $f(t) \in L$, $f(t - t') \in L$, qualquer que seja $t' \in \mathbb{R}$.

Calculemos a TF de $f(t - t')$. Conforme a definição temos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') e^{-2\pi i \alpha t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i \alpha (t + t')} dt =$$

$$= e^{-2\pi i \alpha t'} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt = g(\alpha) e^{-2\pi i \alpha t'} \quad (1.4.2.1)$$

Temos então o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} f(t) &\xrightarrow{\text{TF}} g(\alpha) \\ f(t - t') &\xrightarrow{\text{TF}} g(\alpha) e^{-2\pi i \alpha t'} \end{aligned} \quad (1.4.2.2)$$

Se se translada a função f de t' , sua TF é simplesmente multiplicada por $e^{-2\pi i \alpha t'}$.

1.4.3 - A TF é simétrica

Se $f(t) \in L$, $f(t) e^{+2\pi i \alpha' t} \in L$, pois tem o mesmo módulo que f . Sua TF é dada por:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{+2\pi i \alpha' t} e^{-2\pi i \alpha t} dt &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i (\alpha - \alpha') t} dt = \\ &= g(\alpha - \alpha') \end{aligned} \quad (1.4.3.1)$$

Portanto, concluímos:

$$\begin{aligned} f(t) &\xrightarrow{\text{TF}} g(\alpha) \\ f(t) e^{+2\pi i \alpha' t} &\xrightarrow{\text{TF}} g(\alpha - \alpha') \end{aligned} \quad (1.4.3.2)$$

É importante notar a semelhança entre as fórmulas (1.4.2.2) e (1.4.3.2) nas quais uma translação de uma das funções f ou g implica na multiplicação da outra por uma exponencial complexa.

1.4.4 - Dilatação de abcissa

Seja "a" uma constante real. Procuremos a TF de $f(at)$. Se $a = 0$, $f(at) = f(0)$ se reduz a uma constante e não pode ser integrada sobre $(-\infty, +\infty)$.

Suponhamos então $a \neq 0$. Tomamos primeiramente $a > 0$. Conforme a definição, a TF de $f(at)$ é:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(at) e^{-2\pi i \alpha t} dt$$

Façamos $at = y$. Se $t \longrightarrow \infty$, como $a > 0$, $\implies y \longrightarrow \infty$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(at) e^{-2\pi i \alpha t} dt &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} f(y) e^{-2\pi i \alpha y/a} dy = \\ &= \frac{1}{a} g(\alpha/a). \end{aligned} \tag{1.4.4.1}$$

Concluimos então que:

$$f(at) \xrightarrow{\text{TF}} \frac{1}{a} g(\alpha/a) \quad \text{se } a > 0. \tag{1.4.4.2}$$

Suponhamos por outro lado "a" negativo. A mesma mudança de variável é possível, mas visto o sinal de "a", se $t \rightarrow +\infty$, $y \rightarrow -\infty$, de tal modo que os limites de integração são inversos:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(at) e^{-2\pi i \alpha t} dt &= -\frac{1}{a} \int_{+\infty}^{-\infty} f(y) e^{-2\pi i \alpha y/a} dy = \\ &= -\frac{1}{a} g(\alpha/a) \end{aligned} \quad (1.4.4.3)$$

Concluimos que:

$$f(at) \xrightarrow{\text{TF}} -\frac{1}{a} g(\alpha/a) \quad \text{se } a < 0.$$

Podemos reunir estes dois resultados numa só fórmula:

$$f(at) \xrightarrow{\text{TF}} \frac{1}{|a|} g(\alpha/a).$$

Um caso particular importante é aquele onde $a = -1$

$$f(-t) \longrightarrow g(-\alpha)$$

1.4.5 - Relações de simetria

Procuramos a TF de $f^*(t)$. (f^* significa a conjugada de f).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^*(t) e^{-2\pi i \alpha t} dt = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i (-\alpha)t} dt \right)^* = g^*(-\alpha) \quad (1.4.5.1)$$

Então:

$$f^*(t) \xrightarrow{\text{TF}} g^*(-\alpha).$$

Se $f(t)$ tem valores reais, $f(t) = f^*(t)$, então:

$$\begin{aligned} g^*(-\alpha) &= g(\alpha) \\ \text{ou} \quad g^*(\alpha) &= g(-\alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Se } f(t) \text{ \u00e9 real e par, } f(t) &= f^*(t) = f^*(-t) & (1.4.5.2) \\ g(\alpha) &= g^*(\alpha) = g^*(-\alpha) \end{aligned}$$

Conclus\u00e3o: Se $f(t)$ \u00e9 real e par $\implies g(\alpha)$ \u00e9 real e par.

$$\begin{aligned} \text{Se } f(t) \text{ \u00e9 real e \u00edmpar: } f(t) &= -f(-t) = f^*(t): \\ g(\alpha) &= -g(-\alpha) = g^*(-\alpha) \\ \text{o que implica em } g^*(\alpha) &= -g(\alpha). & (1.4.5.3) \end{aligned}$$

g \u00e9 da forma $iG(\alpha)$, onde G \u00e9 real e \u00edmpar.

Se $f(t)$ \u00e9 real e \u00edmpar $\implies g = iG$, com G real e \u00edmpar. |4|.

1.5 - TRANSFORMADA INVERSA

A relação inversa será dada por [4], [63]

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\alpha) e^{+2\pi i \alpha t} d\alpha \quad (1.5)$$

Notamos que as equações (1.3.1) e (1.5) são quase, mas não totalmente simétricas, diferindo no sinal de i .

1.6 - TRANSFORMADA CO-SENO

Se $f(t)$ é ímpar ou par, as Transformadas de Fourier podem ser expressas numa forma diferente. Consideremos primeiro $f(t) = f(-t)$, par. Escrevendo o expoente da equação (1.3.1) na forma trigonométrica, temos:

$$\begin{aligned} g(\alpha) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)(\cos \alpha t - i \sin \alpha t) dt = \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{+\infty} f(t) \cos \alpha t dt \end{aligned} \quad (1.6.1)$$

a dependência de $\sin \alpha t$ anulando na integração sobre o intervalo $(-\infty, +\infty)$. De modo semelhante, a equação (1.5.1) transforma para:

$$f(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{+\infty} g(\alpha) \cos \alpha t d\alpha \quad (1.6.2)$$

As equações (1.6.1) e (1.6.2) são conhecidas como as transformadas de Fourier do co-seno. [4], [37].

1.7 - TRANSFORMADA SENO

O correspondente par de transformadas seno de Fourier é obtido admitindo que $f(t) = -f(-t)$, ímpar, e aplicando os mesmos argumentos simétricos. As equações são: [4], [37].

$$g(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{+\infty} f(t) \operatorname{sen} \alpha t \, dt \quad (1.7.1)$$

$$f(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{+\infty} g(\alpha) \operatorname{sen} \alpha t \, d\alpha \quad (1.7.2)$$

Obs.: - O fator i foi absorvido na função $g(\alpha)$.

1.8 - TEOREMA DA CONVOLUÇÃO

Consideremos duas funções $f(x)$ e $g(x)$ com transformadas de Fourier $F(\alpha)$ e $G(\alpha)$, respectivamente.

Definimos a operação:

$$f * g = \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) f(x-y) \, dy \quad (1.8.1)$$

como a convolução das duas funções f e g sobre o intervalo $(-\infty, +\infty)$.
 [4], [21]. Mas

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) f(x-y) dy &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) \int_{-\infty}^{+\infty} F(\alpha) e^{+i\alpha(x-y)} d\alpha dy \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\alpha) e^{+i\alpha x} d\alpha \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) e^{-i\alpha y} dy = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} F(\alpha) G(\alpha) e^{+i\alpha x} d\alpha \end{aligned} \quad (1.8.2)$$

mudando a ordem de integração e transformando $g(y)$. Este resultado pode ser interpretado como segue: "a transformada inversa de Fourier de um produto de transformadas de Fourier é a convolução das funções originais, $f*g$ ". Podemos resumir o item 1.8 no quadro ilustrativo seguinte:

$$\begin{aligned} f(x) &\xrightarrow{\text{TF}} F(\alpha) \\ g(x) &\xleftarrow{\text{TF}} G(\alpha) \\ f*g &\xleftarrow{\text{TF}} F.G \\ f.g &\xrightarrow{\text{TF}} F*G \end{aligned} \quad (1.8.3)$$

CAPÍTULO II

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 - Introdução

Com a finalidade de deixar claro e definido o uso que faremos de determinados termos, bem como a idéia básica dentro da qual serão entendidos e explicados certos conceitos, achamos por bem especificar, num capítulo a parte, alguns tópicos.

2.2 - Conceitos

Um sistema óptico pode ser esquematizado, em termos simples, como mostra a fig.2.2.0 retângulo O representa o conjunto óptico. Um sinal de entrada passando através do mesmo produz um sinal

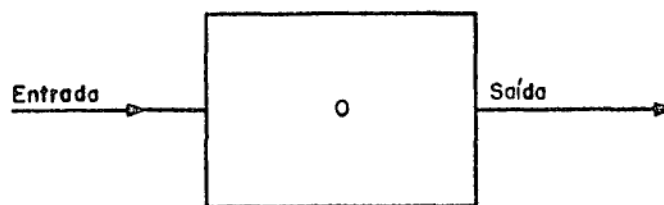


Fig. 2.2 - Esquema de um sistema óptico.

de saída. Se este for proporcional ao sinal que entrou, dizemos que o sistema é linear; em outras palavras, que se verifica o princípio da superposição. Neste caso, poderemos aplicar os conceitos de Função de Transferência de Modulação que estudaremos no presente trabalho.

Uma fonte luminosa é denominada fonte de luz coerente ou incoerente, dependendo do comportamento das ondas luminosas que partem de dois pontos distintos da mesma fonte. Dentro das condições de nosso trabalho, supomos sempre que se trate de fonte de luz incoerente.

Sempre que falarmos em aumento ou diminuição de contraste entre áreas de pequenas dimensões, queremos entender que as mesmas estejam próximas umas das outras, como é o caso, por exemplo, do alvo tipo "barras", usado na determinação do poder resolutivo e do qual falaremos no capítulo seguinte. Um aumento ou diminuição do contraste fará com que os pequenos objetos apareçam mais ou menos nítidos na fotografia.

2.3 - Definições

- Todo elemento limitador do campo de um sistema óptico, inclusive a própria armadura para manter os elementos ópticos em suas posições relativas, constitui um diafragma, o qual limita o feixe luminoso que incide no sistema. De um modo geral, nas câmaras aerofoto

geométricas modernas, o diafragma propriamente dito encontra-se aproximadamente no meio do sistema de lentes. O orifício de diâmetro variável, existente no centro do diafragma, é chamado de pupila do diafragma. Esse orifício possui uma imagem na parte anterior e outra na parte posterior do sistema, as quais são denominadas respectivamente pupila de entrada e pupila de saída.

- Diz-se que um sistema óptico é limitado pela difração, quando um trem de ondas esféricas, que nele incide, produzido por um ponto objeto, for convertido num novo trem de ondas que converge para um ponto imagem e cuja figura será aquela devida aos fenômenos de difração. Se outros fatores desviarem a frente de onda da forma perfeitamente esférica; dizemos que o sistema tem aberrações.

- A exposição, a qual um filme é submetido, é definida como o produto do aclaramento (iluminância) pelo tempo. Se o aclaramento é I e o tempo de duração da incidência de luz T , teremos:

$$E = I \times T \quad (2.3.1)$$

A exposição é definida para cada ponto.

- A transmitância $T(x,y)$ do filme revelado é definida por

$$T(x,y) = \left\langle \frac{F(\text{transmitido em } (x,y))}{F(\text{incidente em } (x,y))} \right\rangle_A \quad (2.3.2)$$

onde F é o fluxo e $\langle \rangle_A$ indica a média local sobre um pequeno elemento de área A , mas grande comparado com o tamanho dos grãos do filme e dentro desta área a função $T(x,y)$ é significativamente constante. A transmitância é normalmente a grandeza característica medida no filme.

- Em 1890, F. Hurter e V. C. Driffield publicaram um trabalho onde demonstraram que $\log\left(\frac{1}{T}\right)$ é proporcional à massa de prata por unidade de área do filme revelado. Definiram assim a densidade D :

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.3.3)$$

Os valores da densidade e do logaritmo da exposição $\log(E)$ quando plotados num sistema cartesiano de referência fornecem a curva característica

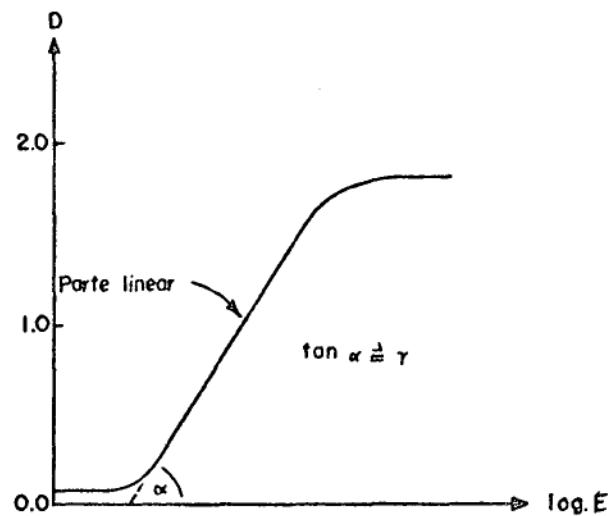


Fig. 2.3(a) - Curva D-log E.

tica D-log E (às vezes chamada curva H - D em homenagem a Hurter-Driffield). A fig. 2.3(a) mostra uma dessas curvas características.

Notamos que quando a exposição está abaixo de um certo nível, a densidade é independente da mesma e igual a um valor mínimo. Segue-se uma região da curva na qual a densidade é linearmente proporcional ao logaritmo da exposição; a tangente do ângulo α que a parte linear da curva forma com o eixo dos x é chamada gama (γ) do filme. Esta grandeza dá informações acerca do contraste do filme. Se o valor de γ for grande dizemos que o filme é de alto contraste, enquanto um filme com um γ menor é dito de baixo contraste. Quando as variações de densidade de um filme são medidas após uma exposição do tipo senoidal, por exemplo, elas podem ser referidas à exposição através da curva D-log E, obtendo-se então a "exposição efetiva". (fig. 2.3(b))

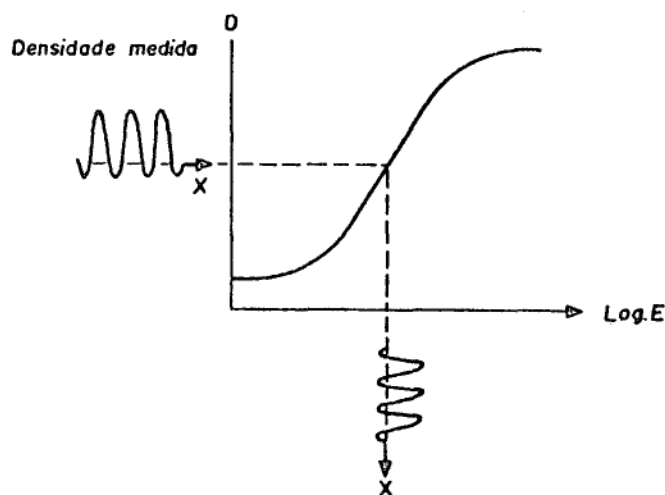


Fig. 2.3(b) - Determinação da "exposição efetiva".

- A abertura numérica (AN) de uma lente é dada pela expressão:

$$AN = n \sin \beta \quad (2.3.4)$$

onde n é o índice de refração do meio e β o valor máximo possível do ângulo compreendido pelo eixo óptico e um raio, proveniente de um ponto objeto axial, que passe pela lente.

- Um raio proveniente de um ponto-objeto fora do eixo, que passe pelo centro da lente, é chamado raio principal daquele ponto. O plano meridiano que contém o raio principal é chamado plano tangencial; e o plano que contém o raio principal e é perpendicular ao plano tangencial, chama-se sagital ou radial. [20, 39, 49].

- A frequência usada no decorrer do texto será sempre considerada frequência espacial, mesmo quando não especificada. Será da em ciclos (ou linhas) por unidade de comprimento.

- Empregamos o termo iluminância para especificar a distribuição luminosa no objeto ou na imagem.

- Definiremos genericamente modulação através da fórmula

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.3.5)$$

onde I_{\max} e I_{\min} são respectivamente iluminância máxima e mínima.

CAPITULO III

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO

FTM

3.1 - Introdução

O método convencional de análise dos sistemas fotogrâficos, usados em aerofotogrametria, com o fim de avaliar a qualidade da imagem consistia em obter a imagem de um alvo de resolução do tipo "barras". (fig.3.1) |62|

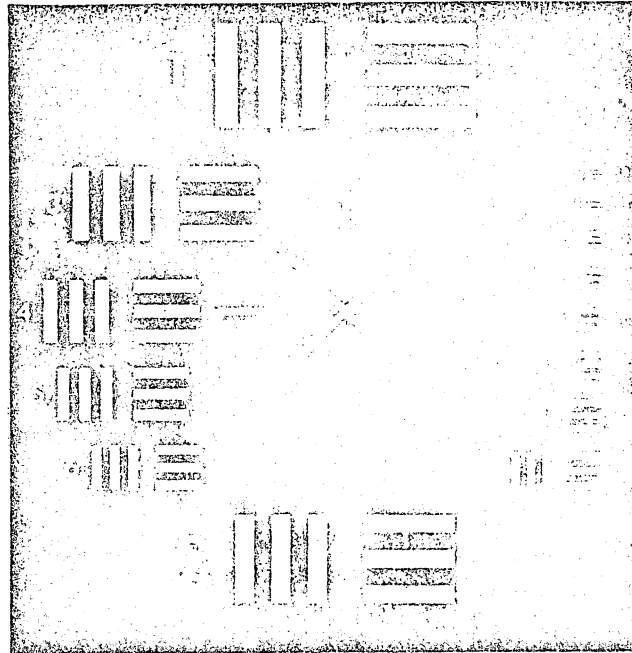


Fig. 3.1 - Alvo de resolução do tipo "barras".

Este procedimento resulta na determinação do valor (ou

valores) de resolução para cada sistema, denominado "Poder Resolutivo" (PR). A finalidade do PR é indicar a capacidade do sistema em separar e lementos pequenos e próximos uns dos outros. É dado em linhas por unidade de comprimento (linhas/mm). Entretanto, o PR não dá informações com pletas acerca da capacidade imageadora dos sistemas fotográficos. Em consequência, vários métodos de análise da qualidade da imagem foram de senvolvidos durante as últimas décadas. Entre eles, tem recebido uma a tenção particular em razão de suas vantagens, aquele que diz respeito às "Funções de Transferência de Modulação" (FTM), objeto do presente traba lho.

Desde a publicação do trabalho inicial de P. M. Duffieux [16] sobre a aplicação dos métodos de Fourier aos sistemas ópticos, as funções de transferência passaram a ocupar uma posição importante na a nálise do desempenho dos sistemas ópticos modernos.

Na década de 50, os conceitos de FTM foram desenvolvidos com o objetivo de estudar o desempenho dos sistemas fotográficos usados em aerofotogrametria.

A FTM, porém, não pode ser considerada como u'a mera substituição do poder resolutivo, mas sim, como uma ferramenta utilí s sima na análise da capacidade imageadora de um sistema fotográfico. Ha verá sempre necessidade de avaliar o desempenho desses sistemas por me do poder resolutivo ou equivalente, que indique o tamanho do menor objeu

to cuja imagem pode ser identificada na fotografia, desde que não tenhamos meios de traduzir a FTM em qualidade visual da imagem [11].

3.2 - Conceito de FTM

O conceito de FTM \bar{e} , de um modo geral, ignorado pelo fotogrametrista. Contudo, \bar{e} por demais conhecido o fato de que, uma pequena diferença de iluminância entre dois objetos, ou duas áreas relativamente grandes no solo, \bar{e} reproduzida com fidelidade na fotografia aerea. Particularmente, se for usada uma emulsão vigorosa o contraste poder \bar{a} ser mais acentuado na fotografia do que no terreno. Entretanto \bar{e} mais dif \bar{e} cil obter uma boa definiç \bar{a} o, na fotografia, entre \bar{a} reas pequenas e vizinhas, mesmo com uma diferen \bar{c} a de iluminância bem acentuada. Neste caso as arestas tornam-se indefinidas e o contraste diminui. Este fato constitui uma ilustraç \bar{a} o simples e pr \bar{a} tica do conceito de FTM [6].

A determinaç \bar{a} o da FTM \bar{e} obtida, fundamentalmente, imageando um alvo especial cuja iluminância varie de modo senoidal, com a frequ \bar{e} ncia aumentando de maneira cont \bar{i} nua (fig. 3.2(a)). A frequ \bar{e} ncia

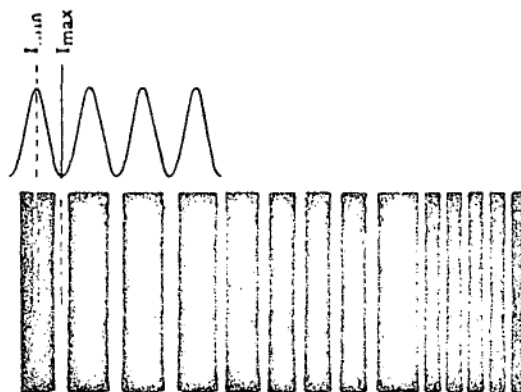


Fig. (3.2(a) - Alvo do tipo "senoidal"

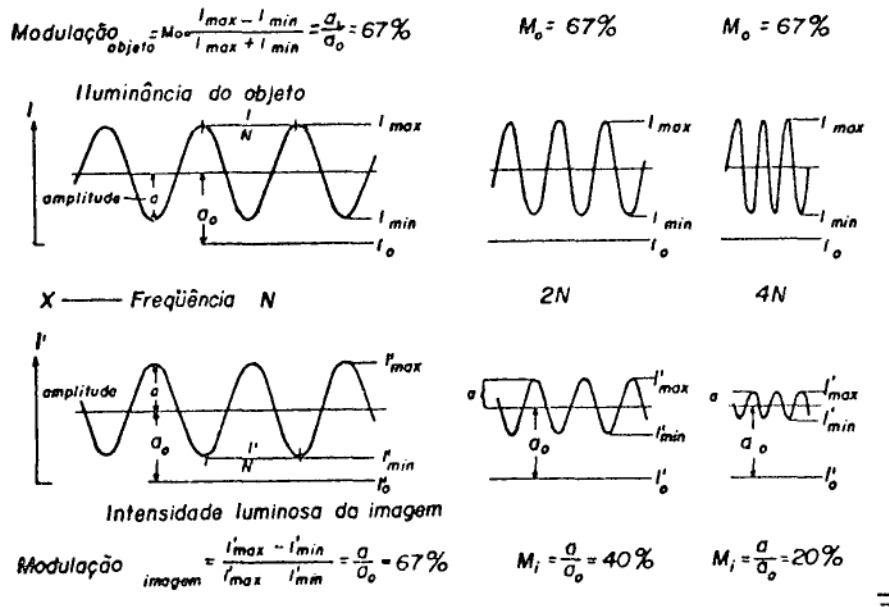
na imagem, obtida sobre um filme ou elemento foto-sensível, permanece invariável, respeitando o fator escala. A distribuição de iluminância será modulada. A modulação M_a do alvo será dada por:

$$M_a = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.2.1)$$

onde I_{\max} e I_{\min} são, respectivamente, as iluminâncias máxima e mínima. A partir de medidas de iluminância na imagem contida no filme revelado, obtemos a modulação da imagem M_i :

$$M_i = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (3.2.2)$$

Definimos o fator de FTM como a razão entre a modulação da imagem M_i e a modulação do alvo M_a em cada frequência espacial determinada. (fig. 3.2(b))



$$FTM(\text{fator}) = \frac{M_i}{M_o} = \frac{67}{67} = 100\% \quad FTM(\text{fator}) = \frac{40}{67} = 60\% \quad FTM(\text{fator}) = \frac{20}{67} = 30\%$$

Fig. 3.2(b) - Conceito de Modulação

$$\text{FTM}_{\text{fator}}(\alpha) = \frac{M_i}{M_a} \quad (3.2.3)$$

Se o contraste C , for definido como:

$$C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (3.2.4)$$

então teremos:

$$M = \frac{C - 1}{C + 1} \quad (3.2.5)$$

e

$$C = \frac{1 + M}{1 - M} \quad (3.2.6)$$

O fator de FTM é então plotado num sistema cartesiano em função da frequência espacial, obtendo-se a curva de FTM. (fig. 3.2(c))

Na prática a curva de FTM indica o grau de redução do contraste, em função da frequência espacial [62]. Podemos obter a FTM individual para lentes, filmes e demais componentes do sistema fotográfico assim como para os movimentos da imagem.

Na definição do fator de FTM dada acima eq((3.2.3)),faz-se necessário uma observação.

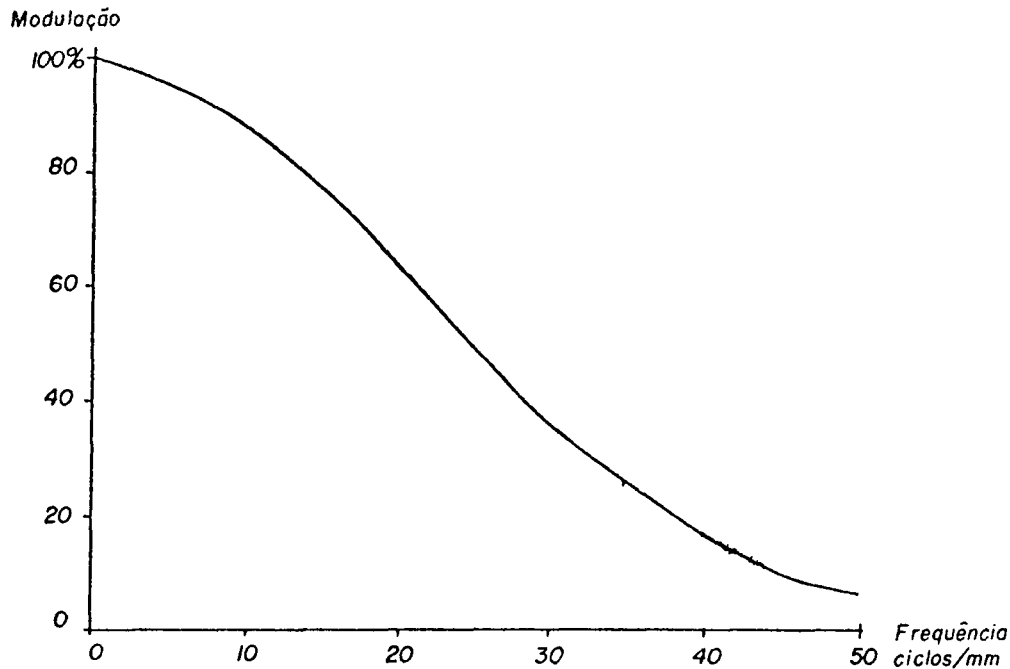


Fig. 3.2(c) - Função de Transferência de Modulação.

Primeiramente, na frequência espacial zero convenciona
mos fazer $FTM_{\text{fator}}(0) = 1$.

Para as outras frequências é necessário levar em considera
ção o fato de que o sistema óptico produz uma variação em es
cala. Assim a razão $\frac{M_i}{M_a}$ não pode ser estabelecida simplesmente pela medida
da modulação da imagem produzida pela lente e do alvo objeto, mas deve-
se usar um fator de escala.

A FTM é sempre 1 ou 100% na frequência zero e é menor

do que 1 ou 100% para qualquer frequência finita. [29]

3.3 - FTM a partir de imagens

Os alvos senoidais, ideais para a determinação das funções de transferência de modulação, não são empregados na aerofotogramtria. Isto deve-se ao fato de sua confecção ser muito difícil e em geral economicamente dispendiosa.

As técnicas de microdensitometria e procedimentos matemáticos baseados em análise de Fourier que se desenvolveram extensivamente em FTM, tornaram possível estimar o desempenho de sistemas aerofotográficos pela análise de negativos, sem necessidade de alvos de resolução. [29] É necessário, para tanto, que o terreno fotografado apresente uma linha de descontinuidade de brilhância denominada "aresta viva", isto é, um degrau de iluminância equivalente a uma função degrau. A fig. 3.3 mostra graficamente a distribuição de intensidade luminosa da função degrau.

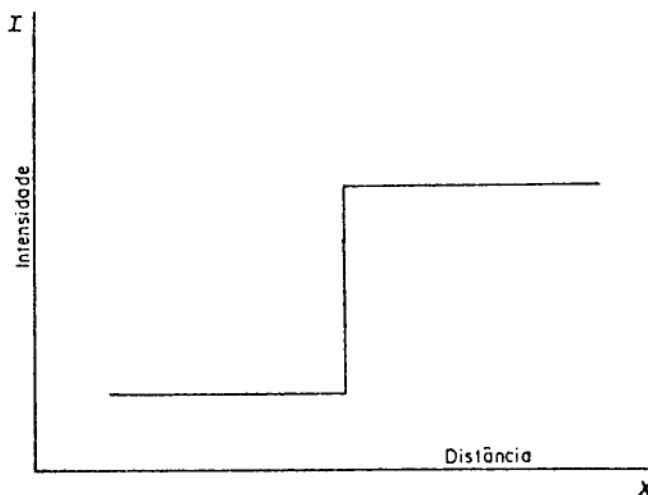


Fig. 3.3 - Gráfico da Função Degrau.

Uma vez obtido, por meio de um microfotômetro ou microdensitômetro, o traço correspondente à aresta viva, a derivada primeira dará a função de espalhamento de linha (FEL). [27] Em seguida é obtida a transformada de Fourier da FEL determinando-se a FTM. Nos capítulos seguintes este método será estudado com pormenores.

3.4 - FTM e Poder Resolutivo

Do ponto de vista da fotografia aérea, a FTM difere do clássico poder resolutivo, nos seguintes pontos:

- a expressão da modulação versus frequência espacial, dá uma idéia geral do desempenho do sistema para todo um espectro de frequência, e não apenas a frequência limite, a qual é a única informação dada pelo poder resolutivo.

- a FTM para qualquer número de componentes do sistema pode ser obtida por multiplicação direta de FTM individuais, frequência por frequência, num processo chamado de cascateamento [13].

- a FTM relaciona-se somente com a imagem óptica efetiva; não leva em conta fatores tais como: gama, granulosidade e acuidade visual humana que entram em consideração no poder resolutivo, e não transmitem informação direta acerca da imagem fotográfica revelada.

- não é possível conseguir uma grande precisão na aplicação de FTM para processo fotográfico, por causa da não linearidade do sistema. [6]

CAPÍTULO IV

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO FOTOGRÁFICA

4.1 - O Filme Fotográfico

O filme fotográfico, de um modo geral, é composto de uma emulsão disposta sobre uma base plástica. A emulsão ou meio sensível, como é chamada, é constituída por uma mistura heterogênea de grãos de halogeneto de prata dispersos em gelatina. [13]

Muito embora outros componentes da emulsão contribuam para a sua sensibilidade, os grãos de halogeneto de prata são as partículas foto-sensíveis da emulsão. Atingem tamanhos que vão desde uma pequena fração do micron até alguns microns. A sensibilidade de um filme depende do tamanho dos grãos de halogeneto de prata. Assim, a exposição e o conseqüente contraste são determinados, em princípio, a partir da distribuição da frequência de tamanhos dos grãos de halogeneto de prata.

Quando um grão é exposto à luz, parte desta é absorvida e transmitida através do mesmo, e parte é refletida. Se uma quantidade suficiente de luz for absorvida pelo grão e agir sobre este um revelador, o halogeneto se reduz a prata metálica. Se a quantidade de luz não for suficiente para provocar a redução, ou se o grão não for exposto totalmente, dissolver-se-á na solução fixadora. [54, 13, 20].

A luz refletida por um grão atinge muitas vezes outro grão, tornando-o sujeito à redução. Assim, parte da luz incidente numa determinada área sobre o filme, é espalhada para áreas adjacentes dentro da camada da emulsão. Este fenômeno, denominado "dispersão da imagem", é uma das causas fundamentais de sua degradação. [54] A fig. 4.1(a) ilustra a distribuição dos grãos expostos a uma incidência luminosa do tipo "gume de faca".

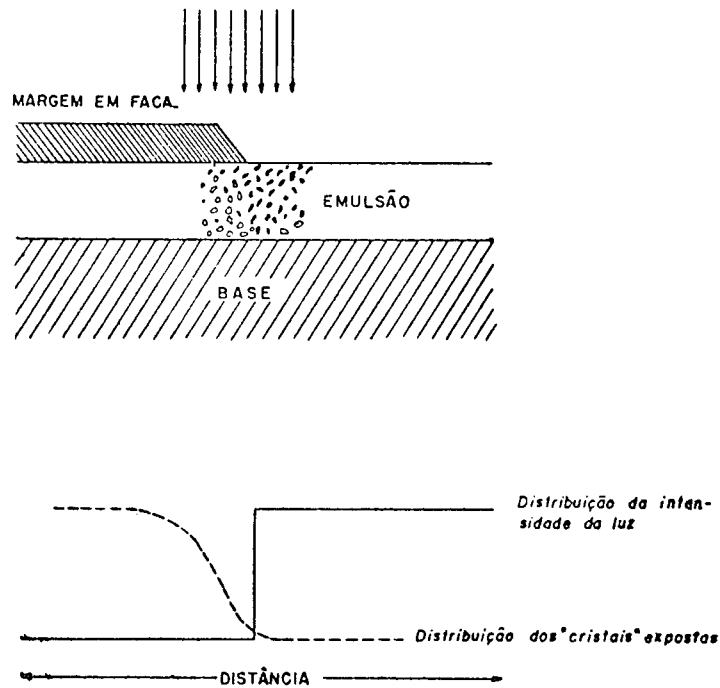


Fig. 4.1(a) - Imagem de uma aresta do tipo "gume de faca".

A fig. 4.1(b) apresenta o resultado da imagem, sobre um filme, de um alvo de resolução do tipo "barra" em três frequências espa

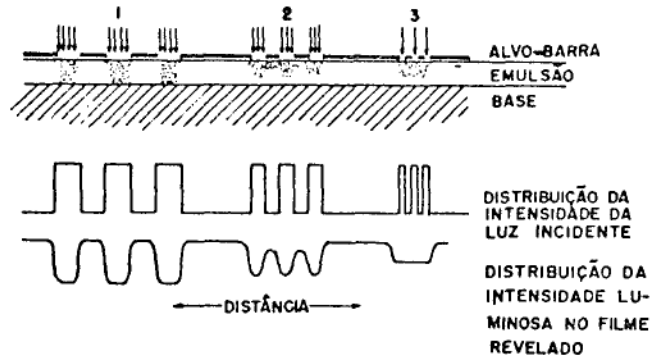


Fig. 4.1(b) - Imagem de um alvo do tipo "barra".

ciais distintas: 1, 2 e 3. Para a frequência 1, as áreas expostas são suficientemente separadas, resultando, na imagem sobre o filme, uma distribuição de densidade que se assemelha àquela de intensidade da luz incidente. Menos semelhança ou menos fidelidade notamos quando as barras se tornam menores e menos espaçadas, como ocorre na frequência 2. Na frequência 3 as áreas expostas são tão próximas que na imagem não é possível distinguir a separação das barras. [54] É importante notar que à medida que a frequência do alvo tipo "barra", usado no caso, aumenta, o contraste ou modulação da imagem diminui. Este fenômeno constitui o princípio das funções de transferência de modulação aplicadas ao filme. E muito embora, a fig. 4.1(b) considere uma resposta do tipo onda-retangular, as conclusões são as mesmas para a resposta em onda senoidal, normalmente usada em FTM.

4.2 - Determinação da FTM de Emulsões Fotográficas

Na determinação da FTM de emulsões fotográficas podem ser empregados três tipos diferentes de alvos-teste: um alvo senoidal, uma fenda estreita ou ainda uma aresta viva. Cada um deles apresenta certas vantagens, como também algumas desvantagens.

4.2.1 - ALVO SENOIDAL

O uso de um alvo senoidal concorda perfeitamente com o conceito fundamental de função de transferência de modulação.

A FTM seria obtida conforme o esquema da fig. 4.2.1. A imagem de um alvo senoidal através de um sistema óptico é examinada por meio de uma fenda e um dispositivo fotoelétrico. A modulação M_a é obtida aplicando a fórmula já conhecida:

$$M_a = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4.2.1.1)$$

onde I_{\max} e I_{\min} são as iluminâncias máxima e mínima, medidas pelo dispositivo fotoelétrico. A fenda é então substituída pelo filme, obtendo-se sobre o mesmo a imagem do alvo. Uma vez revelado, o filme é examinado* num microdensitômetro, o qual fornece os valores de densidade máxima e mínima, que, por sua vez, são traduzidos em valores de exposição

* O exame com microdensitômetro será sempre do tipo varredura.

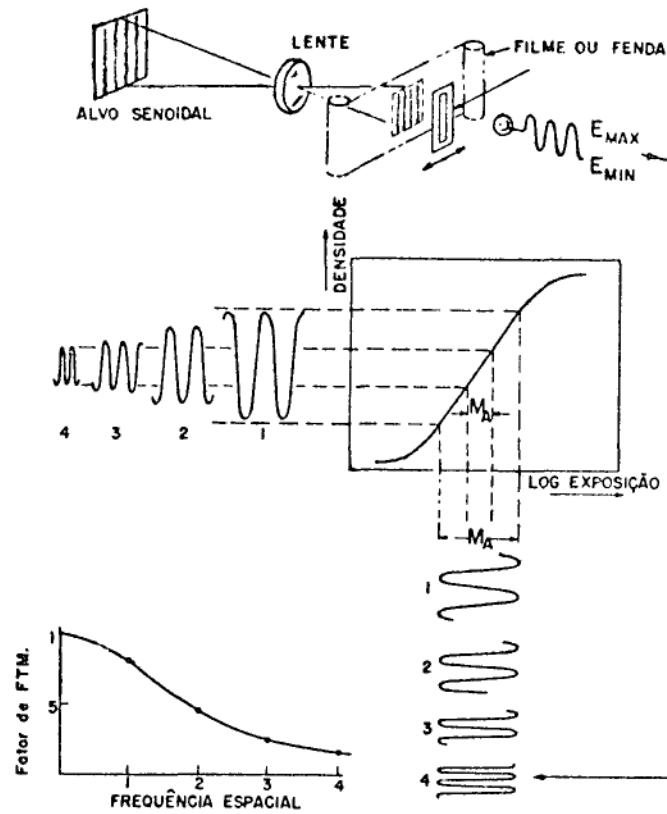


Fig. 4.2.1 - Representação esquemática da medida de FTM.

máxima e mínima, através da curva D-log E. A modulação M_i da imagem sobre o filme seria:

$$M_i = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (4.2.1.2)$$

A razão entre a modulação da imagem M_i e a modulação do alvo M_a para uma frequência espacial particular fornece o fator de FTM.

$$FTM_{\text{fator}}(\alpha) = \frac{M_i}{M_a} \quad (4.2.1.3)$$

Repetindo este procedimento para outras frequências espaciais, obtemos a curva FTM do filme, plotando o fator de FTM no eixo das ordenadas e a frequência espacial no eixo das abscissas. [20, 13, 54].

Chamamos a atenção para um particular. Aquilo que denominamos modulação do alvo M_a no presente parágrafo, na realidade é a modulação da imagem deste alvo, fornecida pelo sistema óptico; a modulação da imagem M_i em termos de exposição é a modulação da imagem obtida sobre o filme.

Em razão dos "efeitos de adjacência" que ocorrem no processo de revelação, os quais serão estudados oportunamente, e cuja influência é difícil de ser eliminada na avaliação da FTM, usamos o nome de Função de Transferência de Modulação Fotográfica para a FTM do filme, com a finalidade de distinguir da FTM real, que não inclui efeito de adjacência*. [6].

As dificuldades já mencionadas anteriormente tornam o uso de um alvo senoidal impraticável. Por esta razão, outros métodos foram desenvolvidos e são usados na prática.

* Resolução do Grupo de Trabalho sobre Qualidade da Imagem aprovada no Congresso Internacional de Fotogrametria, julho-agosto, 1972.

4.2.2 - USO DE UMA FENDA ESTREITA

Quando uma fenda muito estreita é imageada por um sistema fotográfico, a imagem da fenda no filme, não apresentará o aspecto de uma linha (faixa estreita). Devido aos fenômenos de dispersão da luz na emulsão, a distribuição de intensidade luminosa na imagem da fenda sobre o filme terá o aspecto da fig. 4.2.2. Esta curva da intensidade

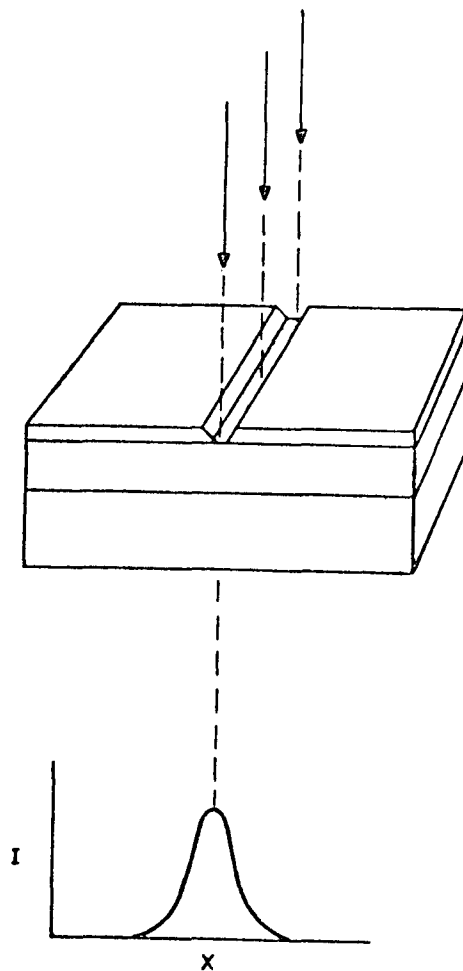


Fig. 4.2.2 - Função de Espalhamento de Linha.

em função da distância é denominada "Função de Espalhamento de Linha" (FEL). [27]. Como já dissemos, a transformada de Fourier da FEL fornece a FTM fotográfica. No capítulo seguinte, estudaremos de um modo particular o problema da transformação de Fourier da FEL. Na prática, a FEL é obtida de outra maneira, como veremos no parágrafo seguinte. A imagem da fenda torna-se difícil devido a problemas de difração e outros.

4.2.3 - ANÁLISE DE GRADIENTE DE BORDA

Este é o método mais aplicado na obtenção de FTM por ser o mais prático e o mais econômico. Este método é usado na determinação tanto da FTM fotográfica como da Função de Transferência Óptica (FTO) da lente.

Conforme mostra a fig. 4.2.3(a) podemos considerar a distribuição luminosa de um objeto do tipo "gume de faca", como formada por uma série de linhas estreitas luminosas, muito próximas umas das outras. Cada linha produz sua própria FEL que chamaremos: $L(x)$. A distribuição de energia total na imagem deste alvo é simplesmente a soma das contribuições das FEL individuais. Podemos, deste modo, supondo o número de linhas crescendo indefinidamente, escrever para a intensidade total no ponto x_0 :

$$A(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} L(x) dx \quad (4.2.3.1)^*$$

* Observamos que a integral (4.2.3.1) só é válida para o caso de luz incoerente.

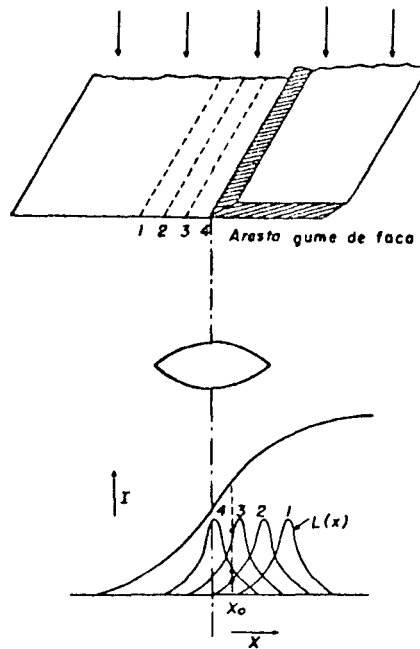


Fig. 4.2.3(a) - Determinação do "Traço de Aresta".

onde $A(x_0)$ é denominada função "traço de aresta". [28]. Logo, se a FEL de um sistema óptico é conhecida, assim como a distribuição de luz no objeto, é possível calcular a distribuição de luz na imagem.

Por outro lado, a FEL será a derivada da função "traço de aresta" ou seja:

$$L(x) = \frac{dA(x)}{dx} \quad (4.2.3.2)$$

Desta maneira podemos obter a FTM fotográfica a partir da função "traço de aresta". Para tanto, uma aresta viva é examinada

com um microfotômetro ou microdensitômetro, obtendo-se o traço de aresta $A(x)$. A derivada primeira de $A(x)$ será a FEL. Finalmente a transformada de Fourier da FEL dará a FTM fotográfica.

Este método é conhecido há algum tempo. Foi aplicado por Erik Welander e apresentado em 1962 no Simpósio Internacional de Delft. Robert A. Jones desenvolveu uma técnica especial para a aplicação do método, usando um microdensitômetro digitalizado. A fig. 4.2.3(b) mostra

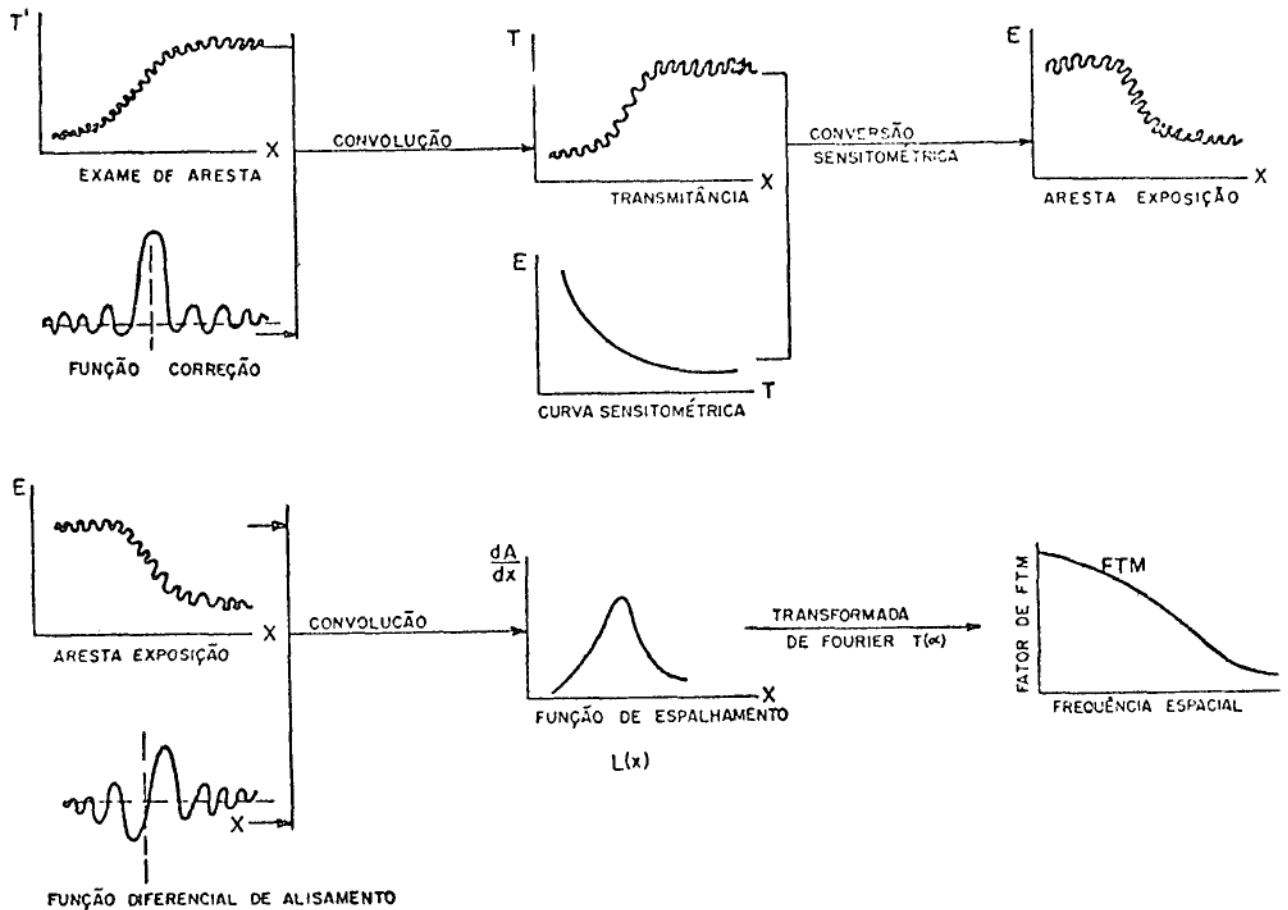


Fig. 4.2.3(b) - Esquema do método de AGB.

o esquema do procedimento. Um programa elaborado para um computador recebe os dados de análise da aresta, produz a adequada correção do microdensitômetro [31], realiza a conversão sensitométrica para passar da transmitância para a exposição, obtém a função de espalhamento corrigida do ruído e finalmente determina a FTM. [7]. A principal vantagem deste método reside no fato de que o mesmo pode ser usado sem alvo especial, mas aproveitando uma aresta viva já existente no terreno, tal como, a borda de uma estrada ou de um canal, a sombra de uma casa ou de um muro, projetada no solo, etc. A fig. 4.2.3(c) mostra uma comparação

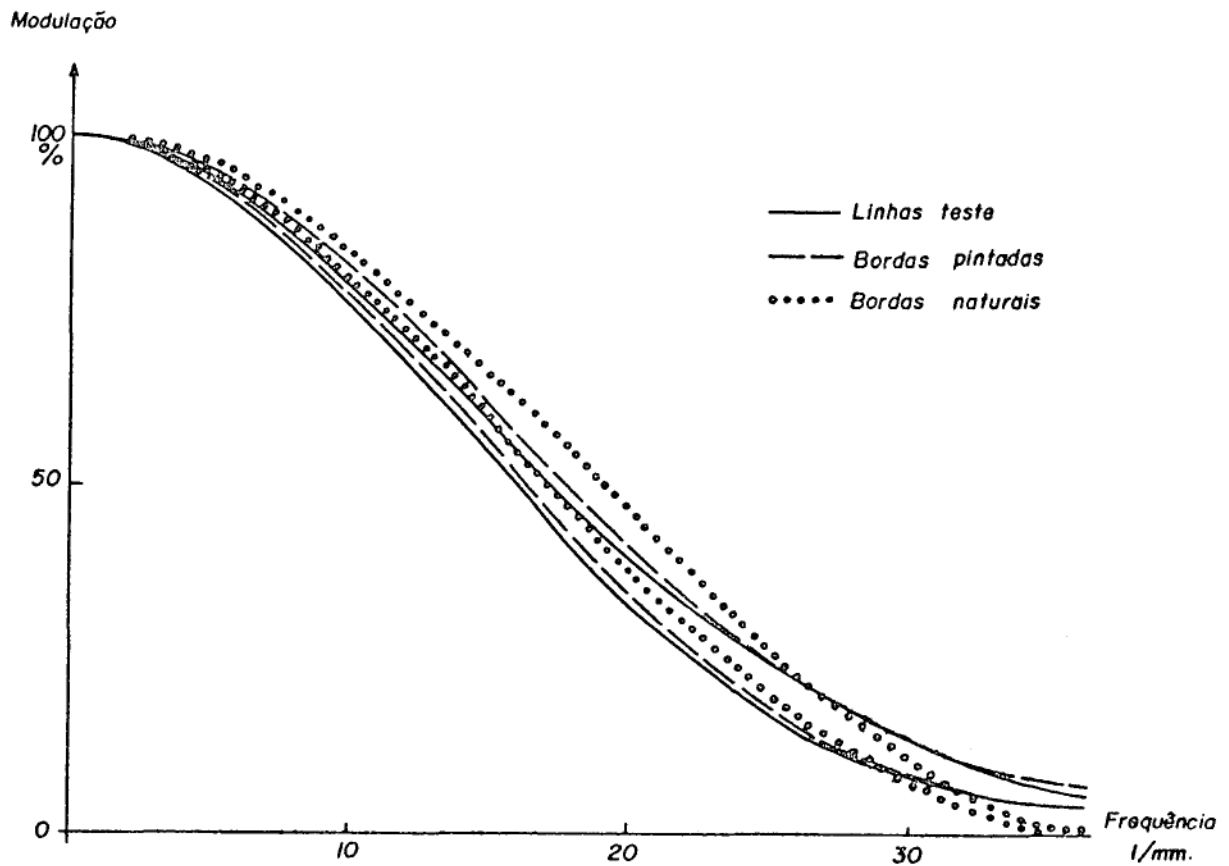


Fig. 4.2.3(c) - Comparação entre FTM.

entre FTM obtidas a partir de uma aresta pintada (linha tracejada) e uma borda já existente no terreno (linha pontilhada). No capítulo seguinte será dispensada particular atenção ao aspecto matemático da aplicação do método.

4.3 - Dificuldades na Determinação da FTM Fotográfica

O problema da aplicação do método de Fourier à emulsão fotográfica é bastante delicado, merecendo atenção muito especial.

4.3.1 - O MICROFOTÔMETRO E O MICRODENSITÔMETRO

Quando se faz uso destes aparelhos na determinação da FTM, deve-se tomar certas precauções.

Primeiramente, as medidas efetuadas com o microfotômetro conduzem a erros provenientes dos fenômenos de difração, limitações do aparelho e outros. Cada microfotômetro tem sua FTM própria, a qual deve ser levada em consideração. Um meio de reduzir o erro, é possivelmente pelo uso de uma fenda de largura muito pequena. Isto implica, contudo, em que a razão sinal-ruído fica muito baixa. Por isso, é necessário o uso de uma fenda de largura razoável. Se nenhuma correção do instrumento for aplicada, a FTM calculada será muito baixa. Dividindo a FTM da imagem fotográfica pela FTM do microfotômetro, será obtida uma correção

relativamente boa para frequências mais baixas. Por outro lado, análises de borda mostram que este método causa erros bastante grandes em frequências mais altas, onde uma correção particular deve ser efetuada.

Igualmente para o microdensitômetro é necessário determinar uma função de correção que é levada em consideração na determinação da FEL. Robert A. Jones e John F. Coughlin [31] determinaram essa função de correção a partir da análise de um alvo em "gume de faca". A convolução da função de correção com o "traço de aresta" resulta no "traço de aresta" corrigido.

4.3.2 - GRANULOSIDADE

Um fenômeno que reduz de maneira não tanto sensível a qualidade da imagem é a natureza estocástica da interação entre a luz e os grãos de halogeneto de prata. A densidade, numa emulsão exposta e revelada uniformemente, apresenta flutuações de ponto a ponto na camada da mesma, conhecida como ruído; essas flutuações, menores numa emulsão de grão fino, são medidas pela grandeza denominada granulicidade.

Assim, a granulicidade é uma propriedade estatística da estrutura granular. Seu efeito é introduzir uma incerteza no enegrecimento fotográfico de cada área pequena do negativo, em uma fotografia qualquer, tomada sob determinadas condições de exposição e revelação.

Esta incerteza $\bar{\epsilon}$ é de grande importância em fotografias científicas, porque limita a exatidão de medidas efetuadas sobre a mesma. A fig. 4.3.2

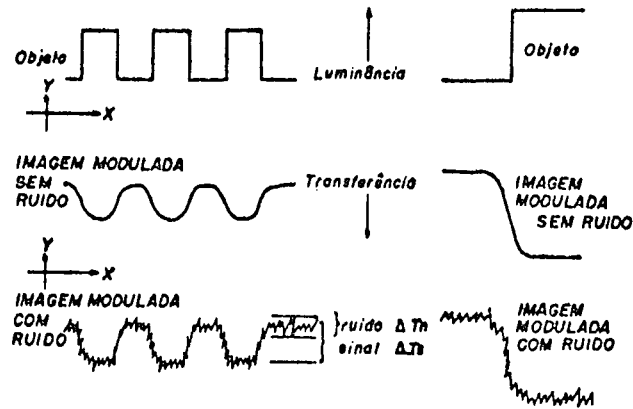


Fig. 4.3.2 - Efeito de Granulosidade.

mostra a análise de uma imagem com distribuição retangular de iluminação e o ruído provocado pela estrutura granular.

A grandeza que mede a granulosidade é o desvio médio quadrático (DMQ). Este é obtido pela conhecida fórmula da estatística como a raiz quadrada da somatória dos quadrados dos desvios dividido pelo número de leituras menos um. Efetuando um grande número de leituras de densidade num microdensitômetro para uma determinada área, podemos calcular a densidade média. O DMQ será:

$$\rho(D) = \sqrt{\frac{\sum \Delta D_i^2}{n-1}} \quad (4.3.2.1)$$

onde n é o número de leituras e

$$\Delta D_i = D_i - \bar{D} \quad (4.3.2.2)$$

sendo D_i as leituras feitas e \bar{D} a densidade média. Na prática, a chou-se mais conveniente obter o DMQ em termos da transmitância. A ex pressão que relaciona $\rho(D)$ e $\rho(T)$ é a seguinte: [3].

$$\rho(D) = 0,434 \frac{\rho(T)}{\bar{T}} \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\rho(T)}{\bar{T}} \right)^2 + \frac{1}{80} \left(\frac{\rho(T)}{\bar{T}} \right)^4 + \dots \right] \quad (4.3.2.3)$$

onde $0,434 = \log_{10} e$

Em casos particulares, quando os desvios são pequenos, podemos conside rar a fórmula reduzida:

$$\rho(D) = 0,434 \frac{\rho(T)}{\bar{T}} \quad (4.3.2.4)$$

Uma particularidade importante do ruído é seu efeito na interpretação de pormenores de baixo contraste nas fotografias aéreas. Quando conside ramos pormenores cada vez menores, eles gradualmente se perdem no ruído; isto é, torna-se impossível dizer se uma pequena variação local em den sidade no negativo é a imagem de um pequeno objeto ou é simplesmente uma contingência da flutuação na distribuição dos grãos. [28, 3, 60, 40]. Uma medida real da qualidade de imagem precisa levar em consideração a

granulosidade. Para isso, em análises de borda se faz a convolução da função "traço de aresta" com uma função de alisamento apropriada [14], como vimos no método AGB.

4.3.3 - NÃO LINEARIDADE

A aplicação da análise de Fourier e a consequente avaliação de um sistema fotográfico por meio das funções de transferência exige que o sistema seja linear, como já observamos anteriormente. Por esta razão, o uso destes conceitos para emulsões fotográficas, se torna bastante delicado pelo fato de que as mesmas apresentam certas não linearidades. A grandeza medida com muita frequência em filmes fotográficos é a transmitância. A relação entre a transmitância e a exposição, curva T - E, não é linear. [27]. A fig. 4.3.3(a) ilustra este fato. Um

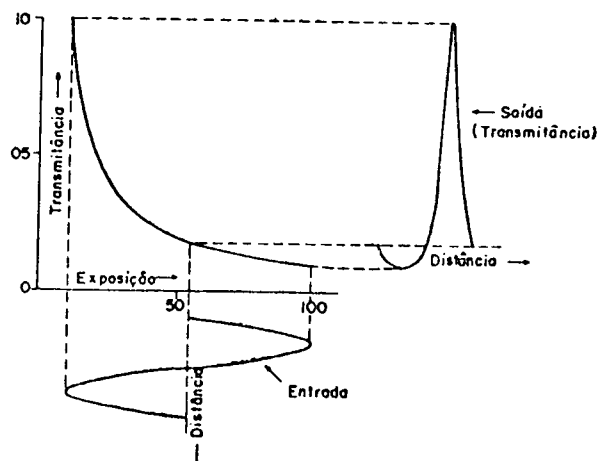


Fig. 4.3.3(a) - Distorção na conversão de exposição para transmitância.

sinal senoidal de entrada analisado através da curva T - E se apresenta, na saída, com distorção.

Outro problema que se apresenta com muita frequência no processo de revelação e que aumenta a não-linearidade do sistema, é o chamado "efeito de adjacência".

Quando duas áreas com diferentes intensidades luminosas, separadas por uma linha bem definida, são imageadas, notamos que a área de maior contraste apresenta uma região, próxima à linha de separação, com uma densidade ainda maior; por outro lado, a parte com menor intensidade luminosa, aparece na imagem, nas proximidades da linha de separação, com densidade ainda menor do que em regiões mais afastadas. Isto provoca um aumento de contraste na linha limite e portanto um aumento na modulação, tornando a FTM mais alta.

Por esta razão, a modulação é calculada em termos de valores de exposição máxima e mínima obtidos através da curva D-log E após as leituras de densidade num microdensitômetro. Como já vimos anteriormente a exposição assim obtida é denominada "exposição efetiva". (Cap. II, § 2.3).

Os efeitos de adjacência podem ser diminuídos pela combinação adequada do revelador e condições de revelação. O revelador Kodak

D-76 aumenta o efeito de adjacência tornando a FTM inclusive maior do que 1 ou 100% para frequências mais baixas. Por outro lado, o revelador Kodak D-19, de grão mais fino que o D-76, produz menos efeito de adjacência.

A fig. 4.3.3(b) mostra duas FTM fotogrâficas de um fil

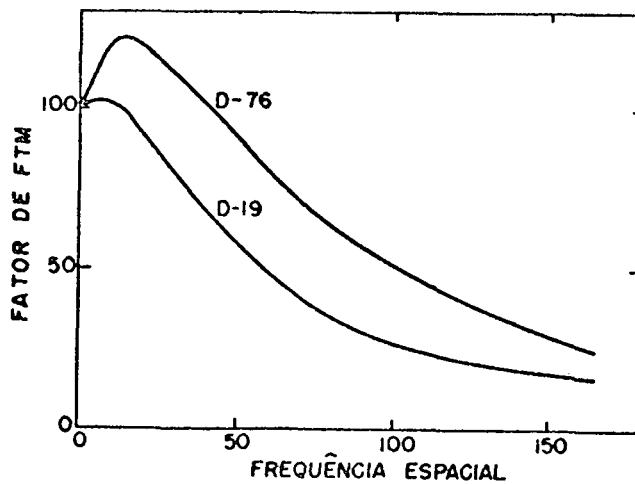


Fig. 4.3.3(b) - FTM fotogrâfica com diferentes reveladores.

me Kodak Panatomic-X; uma em que se usou o revelador D-76 (7 min, 20°C) e a outra, o D-19 (4 min, 20°C). Em ambos os casos o revelador foi agitado durante todo o tempo de revelação. [41, 42]. Esses efeitos podem ainda ser amenizados agitando o revelador durante a revelação como acabamos de observar, evitando super-exposições e diminuindo o tempo de revelação.

A fig. 4.3.3(c) mostra o aspecto dos efeitos de adjacên

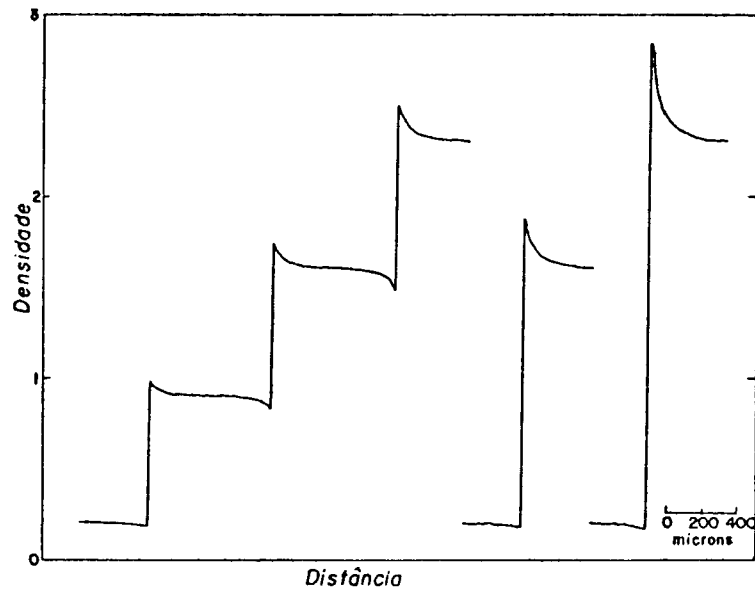


Fig. 4.3.3(c) - Efeitos de adjacência nas imagens de aresta viva.

cia sobre a imagem fotogrãfica de um alvo do tipo degrau. Verifica-se, numa análise de microdensitômetro, um aumento de densidade no topo, chamado "efeito de borda" e uma diminuição de densidade na parte inferior, "efeito de franja".

A avaliação dos efeitos de adjacência é feita por meio da "Função de Espalhamento Química" (FEQ). Na determinação da FEQ os fenômenos de dispersão da luz, que são os únicos levados em consideração na FEL, devem ser eliminados. Por isso a FEQ é obtida fazendo-se uma exposição com RAI0-X. C. N. Nelson [43] descreve um método de determina

ção da FEQ e a maneira de levá-la em consideração no cálculo da FTM.

CAPÍTULO V

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA ÓPTICA

FTO

5.1 - Introdução

A Função de Transferência Óptica (FTO) tem tido uma crescente aceitação como elemento eficaz de avaliação do desempenho de um sistema óptico-fotográfico. Além disso, tem se mostrado de grande utilidade como fator de análise no projeto e fabricação de lentes.

Em consequência, diversos laboratórios desenvolveram um esforço particular no sentido de elaborar uma metodologia e uma técnica precisas e exatas de avaliação da FTO. Como exemplo, podemos citar os laboratórios da Itek Corporation, da Perkin-Elmer, o SIRA (Scientific Instrument Research Association), o PTB (Physikalische Technische Bundesanstalt) e o JOERA (Japan Optical Engineering Research Association). Muito embora se tenha conseguido uma excelente concordância de resultados desses laboratórios em medidas efetuadas sobre o eixo óptico das lentes, fora do eixo ainda existe alguma divergência.

Numa tentativa de padronização, uma lente grande-angular "Covogon" foi medida por seis laboratórios diferentes, dois dos quais tornaram a medi-la dois anos depois. Sobre o eixo óptico, a divergên

cia máxima não excedeu 0,05, a qual é satisfatória para a desejada padronização. Porém, fora do eixo óptico, a divergência raramente foi inferior a 0,2 |11|, o que não é aceitável para uma padronização.

5.2 - Função Pupila

As características básicas de formação de uma imagem a través de um sistema óptico dependem da natureza da onda de luz, e são definidas, mais precisamente, considerando os efeitos de difração associados com a frente de onda emergente.

Assim, é possível obter informação acerca de um sistema óptico, analisando o caminho dos raios luminosos que incidem sobre esse sistema, após atravessá-lo. Se todos os raios convergirem para um mesmo ponto imagem, a menos da difração, dizemos que o sistema é isento de aberrações. Nessas condições, uma frente de onda, emergindo de um ponto objeto, não se desvia, após atravessar o sistema, de uma esfera de referência com centro no ponto objeto.

Lembremos ainda que os raios são normais à frente de onda.

Considerando um sistema com aberrações, podemos plotar o desvio da frente de onda da esfericidade, traçando raios através do mesmo (fig. 5.2). Para cada ponto (x', y') da abertura, ou mais exata

mente, da pupila de saída do sistema óptico, podemos calcular a distância $d(x', y')$ da frente de onda emergente até a esfera de referência.

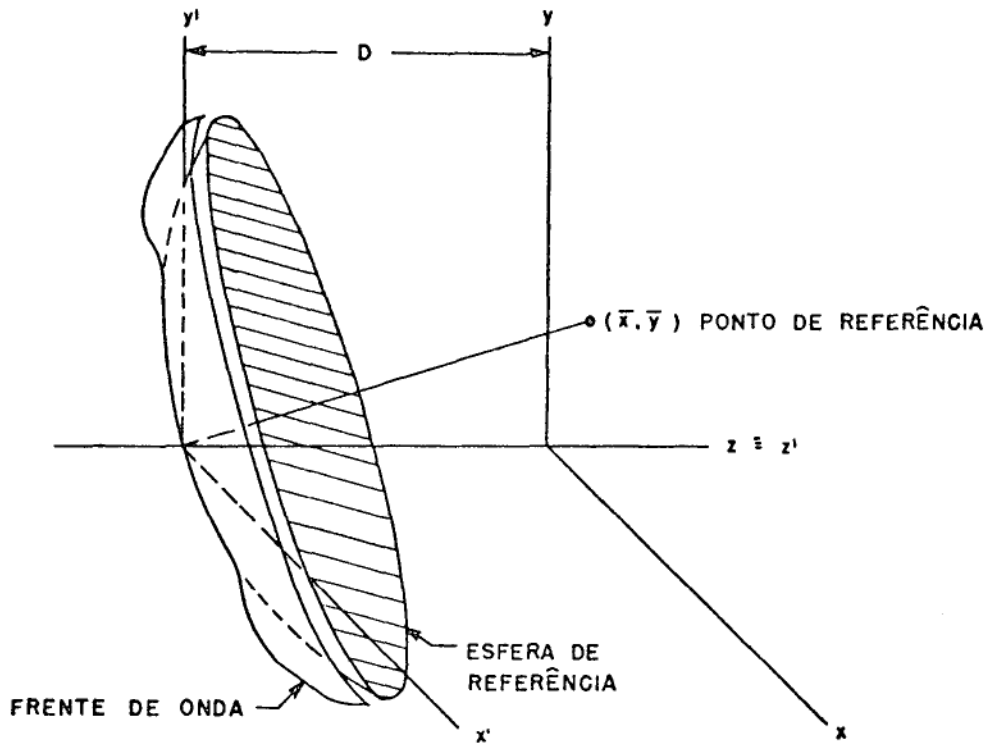


Fig. 5.2 - Desvio da frente de onda da esfera de referência.

Se λ for o comprimento de onda da luz que produz a imagem, $2\pi d(x', y')/\lambda$ será a variação de fase quando a luz percorrer uma distância $d(x', y')$. Em qualquer ponto (x', y') da pupila de saída, mede-se a fase relativa pela seguinte função:

$$G(x', y') = \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} i d(x', y') \right] \quad (5.2)$$

onde \exp é a exponencial de base "e". Esta função é chamada "Função Pupila" [42,47]. A grandeza $d(x', y')$ é conhecida como "Diferença de Caminho Óptico" (DCO). Para (x', y') fora da pupila, $G(x', y')$ é nula por definição. O módulo de G é constante sobre a pupila.

5.3 - Cálculo da FTO a partir da Função Pupila

A Função Pupila \bar{e} usualmente especificada por uma distribuição de valores em elementos de uma malha estabelecida na pupila do sistema (Fig. 5.3). [42]

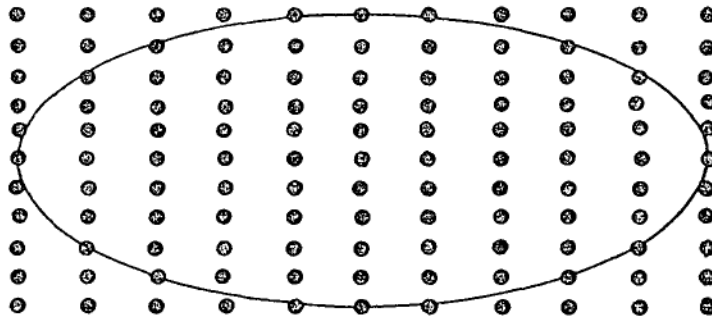


Fig. 5.3 - Função pupila digitalizada

A FTO de um sistema pode ser calculada a partir da frente de onda emergente, ou seja da função pupila [46]. Para tanto, \bar{e} estabelecido um sistema de coordenadas retangulares x' , y' , z' na pupila de saída, por exemplo, com o plano z' , y' como plano meridiano e o eixo z' coincidindo com o eixo óptico do sistema. A expressão da função pupila será:

$$G(x', y') = \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} i d(x', y') \right] \quad (5.3.1)$$

A FTO será obtida como a auto correlação da função pupila quando a iluminação \bar{e} incoerente.

$$FTO(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x' + \Delta x', y' + \Delta y').$$

$$G^*(x', y') dx' dy' \quad (5.3.2)$$

onde

$G^*(x', y')$ é a complexa conjugada de $G(x', y')$.

A é a área da pupila.

f_x, f_y são as componentes da frequência espacial.

$$f_x = C_1 \Delta x' / \lambda R$$

$$f_y = C_2 \Delta y' \cos I / \lambda R$$

C_1 e C_2 são as razões entre as dimensões das pupilas de entrada e de saída segundo as componentes sagital e tangencial respectivamente.

I é o ângulo de incidência do raio principal com a superfície da imagem.

R é o raio da esfera de referência.

λ é o comprimento de onda da luz.

A equação (5.3.2) pode ser escrita na seguinte forma:

$$FTO(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \left[-d(x' + \Delta x', y' + \Delta y') + d(x', y') \right] \right\} dx' dy' \quad (5.3.3)$$

O cálculo da equação (5.3.3) envolve a avaliação de duas integrais definidas. Para resolvê-las a pupila de entrada pode ser dividida em uma malha cujos elementos tem dimensões $2\epsilon_1 \times 2\epsilon_2$. Podemos então avaliar a equação (5.3.3) como uma soma de integrais sobre os elementos da malha.

$$FTO(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \sum_k \sum_j \int_{y'_k - \epsilon_2}^{y'_k + \epsilon_2} \int_{x'_k - \epsilon_1}^{x'_k + \epsilon_1} \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \left[-d(x' + \Delta x', y' + \Delta y') + d(x', y') \right] \right\} dx' dy' \quad (5.3.4)$$

onde

x'_j, y'_k são as coordenadas do ponto central de um elemento da malha.

H.H. Hopkins [46] propôs a substituição na integral (5.3.4) de $d(x', y')$ por uma série de Taylor truncada obtendo-se então a seguinte expressão para a FTO:

$$FTO(f_x, f_y) = \frac{1}{N} \sum_k \sum_j \exp \left\{ i K(x'_j, y'_k) \right\} \times \frac{\text{sen } \epsilon_1 K_{x'}}{\epsilon_1 K_{x'}} \times \frac{\text{sen } \epsilon_2 K_{y'}}{\epsilon_2 K_{y'}} \quad (5.3.5)$$

onde

N é o número de elementos da malha na pupila.

$$K(x'_j, y'_k) = \frac{2\pi i}{\lambda R} \left| -d(x'_j + \Delta x', y'_k + \Delta y') + d(x'_j, y'_k) \right| \quad (5.3.6)$$

5.3.1 - Cálculo da FEL a partir da Função Pupila:

Como veremos no parágrafo seguinte, a FTO pode ser calculada a partir da FEL. Por esta razão, a melhor alternativa para obter a FTO por meio da função pupila, consiste em obter a FEL a partir desta, para em seguida determinar a FTO através da FEL.

A FEL é obtida como o quadrado do valor absoluto da transformada inversa de Fourier da função pupila.

$$L\left(\frac{x}{c_1}, \frac{y}{c_2}\right) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x', y') \exp \left[\frac{2\pi i}{\lambda R} (x'x + y'y) \right] dx' dy' \quad (5.3.1.1)$$

A FTO será:

$$FTO(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x,y) \cdot L^*(x,y) e^{-2\pi i (xf_x + yf_y)} dx dy \quad (5.3.1.2)$$

A avaliação das integrais (5.3.1.1) e (5.3.1.2) é feita por meio do algoritmo de Cooley-Tukey [12].

5.3.2 - FTO para um sistema livre de aberração

Quando o sistema não tem aberrações a função pupila é constante e igual a unidade em todos os pontos. Neste caso a FTM pode ser facilmente calculada. Para tanto, tomamos uma abertura como mostra a parte superior da fig. 5.3.2 e traçamos uma segunda abertura deslocada em relação a primeira (parte inferior da fig. 5.3.2). A área comum a

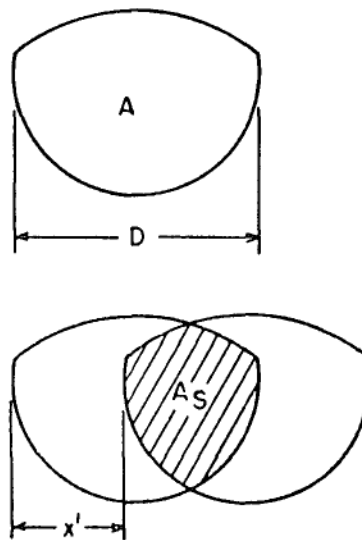


Fig. 5.3.2 - Abertura da pupila - Área comum

estas duas aberturas \bar{e} proporcional \bar{a} função de transferência de modulação obtida com a referida abertura, numa frequência proporcional \bar{a} quantidade de deslocamento x' . Então:

$$FTM(x'/\lambda R) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx' dy' \quad (5.3.2)$$

$\frac{x'}{\lambda R}$ \bar{e} a frequência espacial em linhas por milímetro se x' e R são expressos na mesma unidade, e o comprimento de onda λ em milímetro. A tabela 5.3.2 apresenta valores de FTM normalizados para frequências também normalizadas.

Chamamos a atenção que os limites de integração são tomados adequadamente quando se efetua o cálculo prático.

FREQUÊNCIA	FTM
0	1
0,125	0,76
0,250	0,56
0,375	0,39
0,500	0,25
0,625	0,14
0,750	0,06
0,875	0,01
1,000	0,00

Tabela: 5.3.2 - Valores de FTM

5.4 - Análise de Gradiente de Bordã na Avaliação da FTO.

O método de Análise de Gradiente de Bordã (AGB), usado na determinação da FTM fotogrãfica, também é empregado com as mesmas vantagens na avaliação da FTO [34].

A FTO é uma função complexa: o módulo é conhecido como Função de Transferência de Modulação (FTM) e o argumento como Função de Transferência de Fase (FT ϕ).

A FTO é obtida matematicamente a partir da Função de Espalhamento de Linha (FEL). Sendo $A(x)$ a distribuição de iluminância na aresta fotografada em função da distância, a função de espalhamento será dada por: (Cap. IV, § 4.2.3)

$$L(x) = \frac{dA(x)}{dx} . \quad (5.4.1)$$

A FTO será a transformada de Fourier da função de espalhamento.

$$FTO(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-2\pi i \alpha x} dx \quad (5.4.2)$$

onde α é a frequência espacial.

A (5.4.2) pode ser escrita da seguinte forma:

$$FTO(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) \cos(2\pi\alpha x) dx - i \int_{-\infty}^{\infty} L(x) \operatorname{sen}(2\pi\alpha x) dx \quad (5.4.3)$$

Esta expressão é uma função complexa constituída de uma parte real e uma imaginária. Fazendo as substituições:

$$R(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) \cos(2\pi\alpha x) dx \quad (5.4.4)$$

$$I(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) \operatorname{sen}(2\pi\alpha x) dx \quad (5.4.5)$$

obtemos:

$$FTO(\alpha) = R(\alpha) - iI(\alpha) \quad (5.4.6)$$

As componentes da FTO serão dadas por: |1|

$$FTM(\alpha) = \left| (R(\alpha))^2 + (I(\alpha))^2 \right|^{1/2} \quad (5.4.7)$$

$$FT\phi(\alpha) = \operatorname{arc\,tg} \left| \frac{R(\alpha)}{I(\alpha)} \right| \quad (5.4.8)$$

Assim como ocorre com a determinação da FTM fotográfica, o método de AGB permite a determinação da FTO de sistemas fotográficos a partir de testes em laboratórios ou em condições operacionais. Para

tanto, é examinada, com um microdensitômetro, uma margem na imagem fotográfica, correspondente a uma função degrau no plano objeto. Os valores de exposição em função da distância fornecem a função traço de aresta. Esta função traço de aresta resultante não será uma função degrau, mas a representação da resposta do sistema fotográfico.

A derivada do traço de aresta dará a FEL, cuja transformada de Fourier será a FTM.

A aplicação deste método envolve certas dificuldades:

- 1) A aresta precisa ser examinada com um microdensitômetro, o qual introduz uma degradação [14].
- 2) Dados sensitométricos devem ser obtidos para o filme e os dados do exame da aresta devem ser transformados em valores de exposição.
- 3) Devido à granulosidade do filme, a imagem-aresta contém ruídos que devem ser removidos.

Estas dificuldades podem resultar em sérios erros no método de AGB. R. A. Jones (64) desenvolveu uma técnica para uso do método baseada nos seguintes cuidados:

- 1) Exata correção para a degradação do microdensitômetro sobre os valores de transmitância.
- 2) Conversão sensitométrica precisa dos valores de transmitância para a exposição.
- 3) Um procedimento exato de alisamento para eliminação do ruído.

- 4) Um cuidado especial para estimar a frequência de corte.
- 5) Obtenção e cálculo automático dos dados exigindo um mínimo de esforço e tempo. A fig. 5.4 mostra, esquematicamente o procedimento [7].

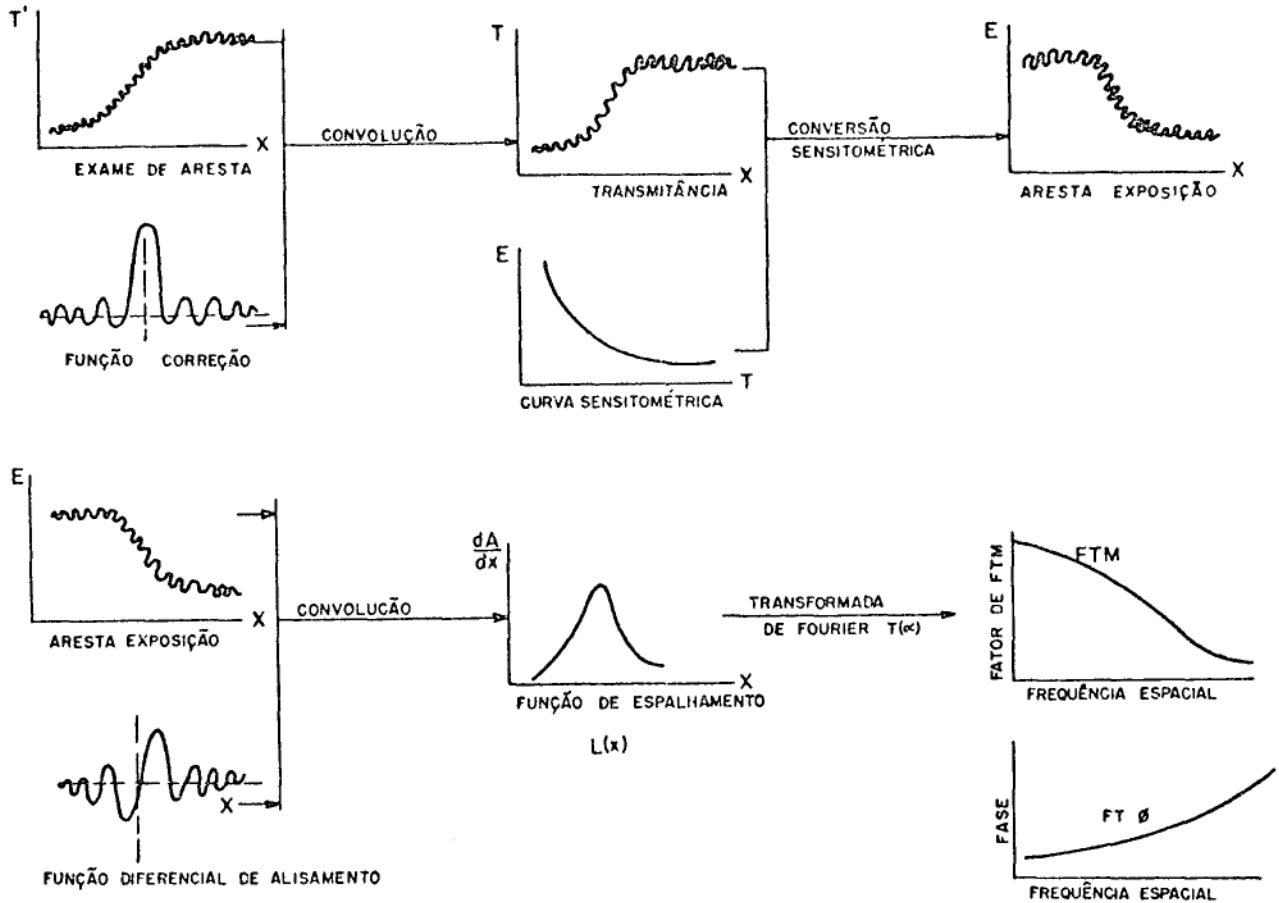


Fig. 5.4 - Esquema do procedimento de AGB.

Uma das desvantagens do método de AGB reside no fato de o mesmo exigir o uso de um filme cuja FTM seja conhecida com exatidão. Além disso, por este método é calculada, na prática a FTM de um sistema em seu todo, e não apenas de uma lente.

5.5 - Aparelho de Análise de FTO

Os laboratórios de análise óptica tem realizado estudos sobre aparelhos que determinem automaticamente as componentes da FTO. Esses dispositivos se baseiam, de um modo geral, no uso de uma máscara de onda senoidal ou de área senoidal e de um foto-multiplicador. Um feixe proveniente de uma fonte luminosa (normalmente uma lâmpada com filamento de tungstênio), passa através de uma fenda incidindo no sistema óptico a ser estudado. Após atravessá-lo, o feixe é orientado sobre a máscara e em seguida incide no tubo foto-multiplicador. A fig. 5.5(a) mostra o esquema de um dispositivo deste tipo.

A máscara é normalmente colocada num cilindro como se observa na figura. Este cilindro comporta somente alguns pares de frequências que atingem geralmente a ordem de $10^2/\text{mm}$.

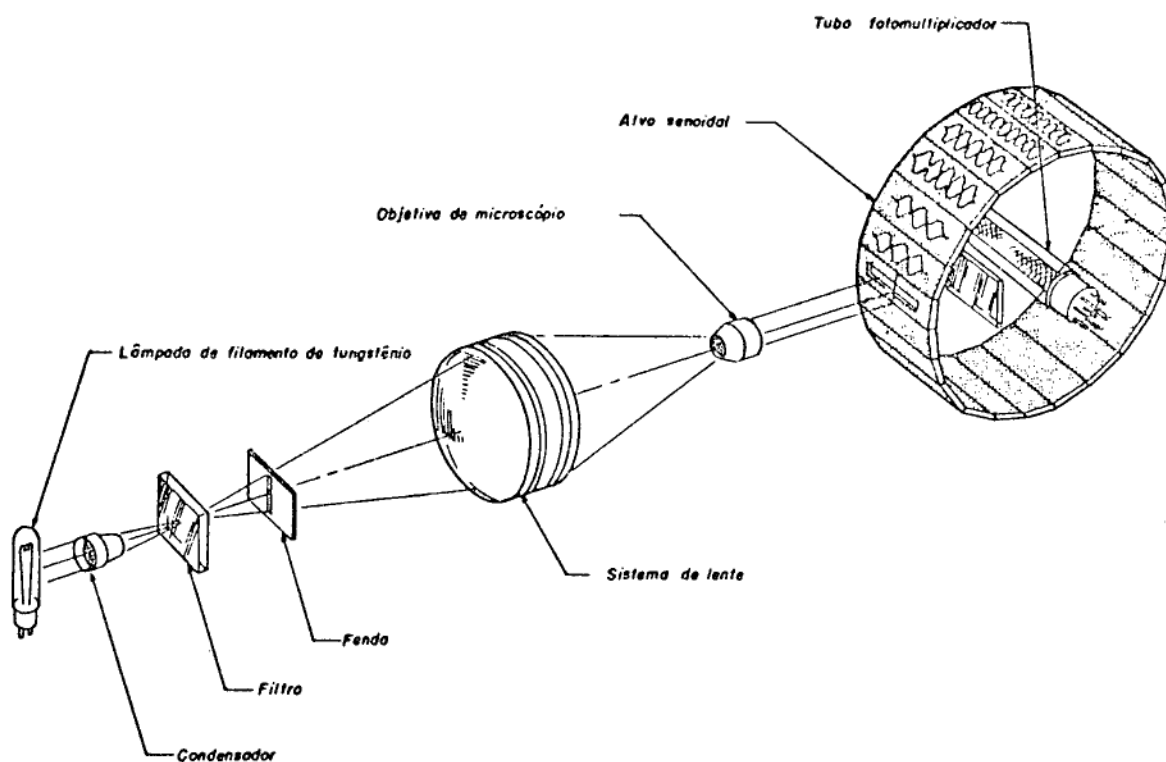


Fig. 5.5(a) - Esquema de um aparelho de determinação de FT0.

Entretanto os aparelhos são equipados com objetivas de microscópio que ampliam essas frequências, tornando possível atingir frequências de até $900\ell/\text{mm}$.

Os elementos essenciais do sistema, (a fonte, a fenda, o conjunto de lentes e a máscara) podem ser montados num dispositivo móvel. Isto torna possível efetuar medidas fora do eixo óptico, como nos

tra a Fig. 5.5(b).

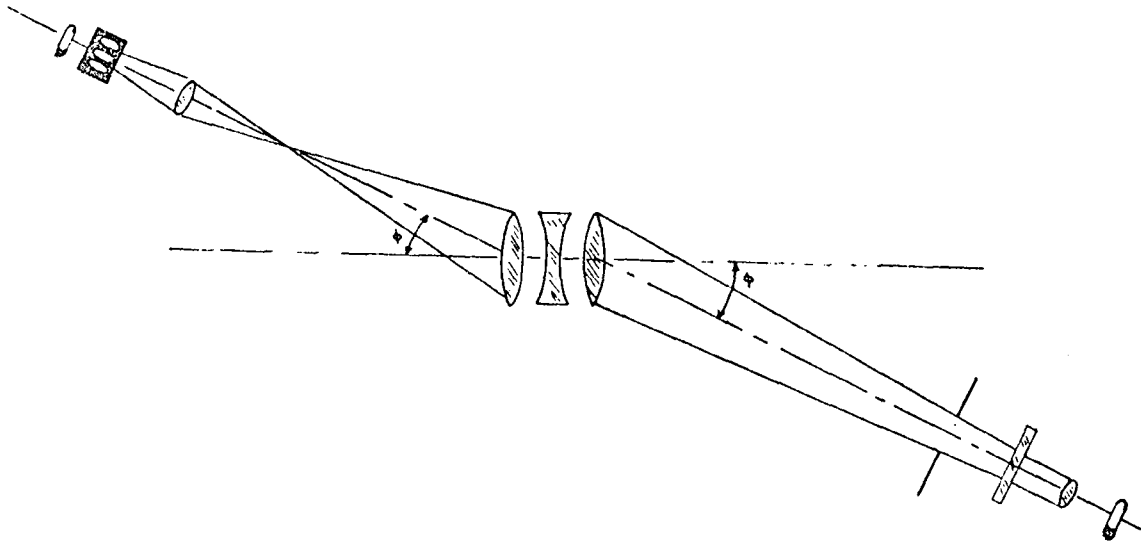


Fig. 5.5(b) - Esquema de determinação da FTO fora do eixo óptico.

A Fig. 5.5(c) apresenta as curvas de FTM A, B, C, D, ob

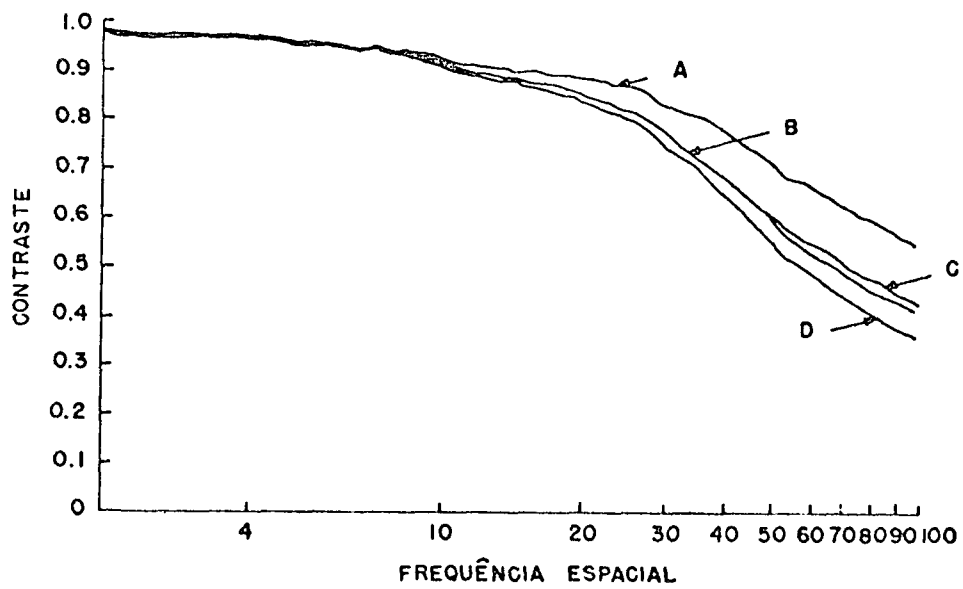


Fig. 5.5(c) - Curvas de FTM obtidas sobre 4 diferentes lentes.

tidas pelo laboratório da Óptics Technology da Califórnia num aparelho especialmente desenvolvido [33], respectivamente sobre uma Planar f/3,5, Nikkor-S f/3,5, Super Baltar f/3,5 e Summicron-R f/3,5.

A equipe de R. R. Shannon e A. H. Newman [56] desenvolveu também um aparelho no laboratório da Itek Corporation. A fig. 5.5(d)

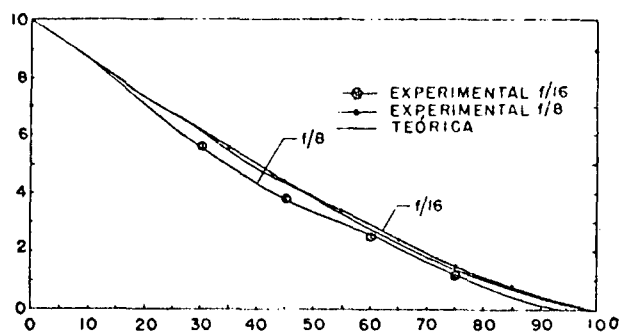


Fig. 5.5(d) - FTM obtidas sobre uma lente TESSAR.

apresenta o resultado de uma medida efetuada sobre uma TESSAR com aberturas f/16 e f/8.

CAPÍTULO VI

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO DO MOVIMENTO DA IMAGEM

6.1 - Introdução

Com o intuito de estudar o movimento da imagem, limi
tar-nos-emos primeiramente ao movimento linear, por ser este o que mais
influencia a qualidade das fotografias aéreas.

O movimento linear da imagem corresponde a um desloca
mento lateral relativo entre o objeto, do qual se deseja obter uma ima
gem e o detector usado (no caso da fotografia o detector será o filme).

Assim, quando fotografamos um veículo em movimento com
uma câmera fixa, a imagem aparecerá fora de nitidez; o mesmo fenômeno
ocorrerá se o objeto estiver parado e a câmera em movimento.

O movimento linear se faz sempre presente em qualquer
sistema óptico-fotográfico, usualmente, porém, é tão pequeno que não
causa qualquer efeito apreciável. Em se tratando de fotografias aéreas,
o fenômeno, denominado "arrastamento", se torna consideravelmente sen
sível. Uma adequada combinação da velocidade da aeronave, altura de
vôo e tempo de exposição torna o arrastamento bastante pequeno. Entre
tanto seu efeito sobre a imagem deve ser levado em consideração.

6.2 - Movimento da Imagem e FTM

Para compreender a FTM do movimento da imagem*, é importante observar que o mesmo reduz o contraste ou a modulação em uma imagem na qual ele se faz presente. Com o fim de melhor analisarmos este fato, consideremos dois tipos de alvos: um alvo do tipo "barras" e um alvo "senoidal" (fig. 6.2 (a)). Analisemos cada um desses alvos em tres frequências distintas, correspondentes respectivamente a $3a$; $1,5a$ e a , sendo " a " a quantidade de movimento (arrastamento). Ao verificarmos a imagem notaremos que, além de um deslocamento lateral, o alvo do tipo barra não terá mais uma distribuição retangular de iluminância. Mais ainda, nas duas frequências mais altas, haverá uma redução na modulação.

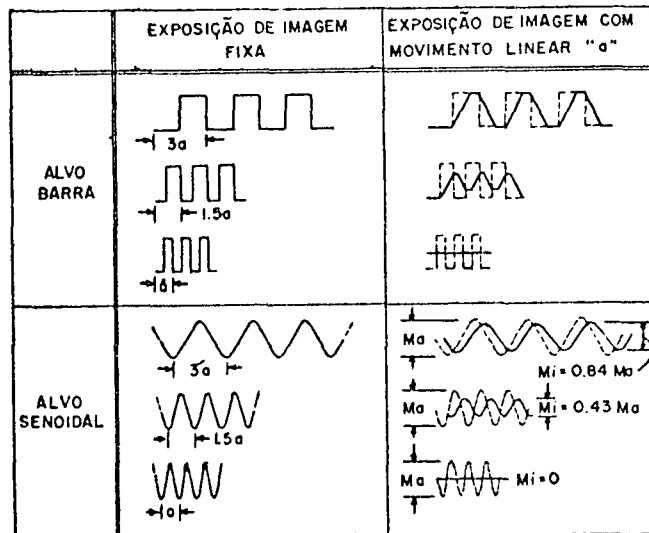


Fig. 6.2(a) - Efeitos do movimento da imagem sobre alvos de diferentes tipos e frequências

* Quando falamos em FTM do movimento da imagem, na realidade queremos nos referir à influência do movimento na FTM. Entretanto, o uso da referida forma ficou consagrado, aliás com muita lógica, pois, na realidade o que fazemos é calcular a FTM do movimento da imagem propriamente dito, como veremos.

A imagem do alvo senoidal estará também deslocada lateralmente. Sua forma não se alterará e sua modulação estará reduzida.

O quociente entre a modulação da imagem e a modulação do objeto dará o fator de FTM em cada frequência particular α , como já vimos anteriormente (cap. III § 3.2). A Fig. 6.2(b) mostra a curva de FTM para as frequências correspondentes à fig. 6.2(a). A FTM devida ao movimento da imagem é a razão entre a FTM da imagem com movimento e a FTM da imagem sem movimento.

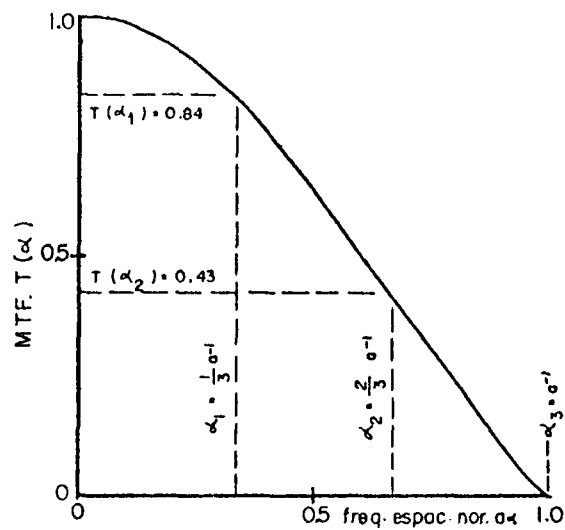


Fig. 6.2(b) - FTM para o caso ilustrado na figura anterior

6.3 - Formulação Matemática:

Consideremos um movimento com velocidade constante aplicado ao objeto (ou à imagem) durante a tomada de uma fotografia. A imagem de um ponto daquele objeto não será mais um ponto, mas tornar-se-á uma função de espalhamento com a forma de um pulso retangular. A imagem completa é então encontrada fazendo-se a convolução de uma imagem perfeita com esta função de espalhamento, onde a altura do pulso é proporcional ao nível de exposição por unidade de tempo e a largura depende da velocidade do movimento e do tempo de exposição.

Uma outra alternativa para a convolução da imagem perfeita com a função de espalhamento seria considerar o sistema óptico como tendo uma função-resposta senoidal efetiva que produz a função de espalhamento de forma retangular e que esta função resposta seja definida dentro do espectro de frequência espacial que representa o objeto.

O espectro de frequência espacial modificado pode então ser usado para avaliar a distribuição na imagem. Desta maneira, a função resposta-senoidal efetiva usada no processo de formação da imagem será obtida tomando-se a transformada de Fourier da função de espalhamento do movimento da imagem $G(u)$. [8] Se esta tiver uma largura "a" e altura unitária, teremos:

$$g(\alpha) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} G(u) \exp \left[- i 2 \pi u \alpha \right] du \quad (6.3.2)$$

ou

$$g(\alpha) = \frac{1}{a} \int_{-a/2}^{a/2} 1 \cdot \exp \left[- i 2 \pi u \alpha \right] \cdot du$$

$$g(\alpha) = \frac{1}{a} \frac{1}{\pi \alpha} \operatorname{sen} (\pi \alpha a) = \frac{\operatorname{sen} \pi \alpha a}{\pi \alpha a} \quad (6.3.3)$$

onde α é a frequência espacial.

A eq. (6.3.3) será normalizada de modo a ter uma amplitude unitária quando o argumento for nulo; a amplitude é nula quando o argumento é igual a $N\pi$, sendo N um inteiro. Assim a amplitude nula ocorre quando a frequência espacial (em linhas/mm) é $\alpha = N/a$, onde "a" é expresso em mm. Para $a = 0,1$ mm, por exemplo, o primeiro zero da função $g(\alpha)$ será para $\alpha = 10$ l/mm, a qual será a frequência de corte.

Como o arrastamento é obtido facilmente a partir da velocidade da aeronave e do tempo de exposição, ambos conhecidos em fotografias aéreas, a FTM do movimento linear é calculada analiticamente por meio da equação (6.3.3), não exigindo alvos teste.

6.4 - Outros Movimentos:

O movimento linear considerado até aqui, é um dos tipos de movimentos a que estão sujeitas as aeronaves. Entretanto, existem outros tipos de movimentos (fig. 6.4(a)) cuja influência sobre a qualidade da i magem em termos de contraste é bem menor do que aquela devida ao movimento linear. Alguns deles tornam-se mais sensíveis na orientação do par fotogramétrico, quando são adequadamente compensados.

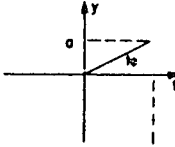

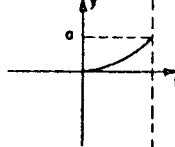
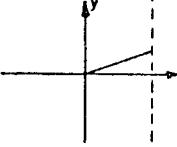
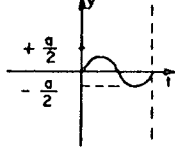
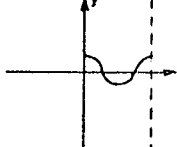
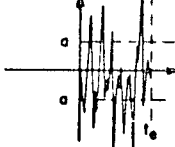
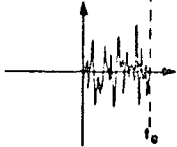
CARACTERIST. TIPO DE MOVIM.	DESLOC. x TEMPO	VELOC. DE IMAGEM x TEMPO
LINEAR		
PARABÓLICO		
SENOIDAL		
ALEATÓRIO		

Fig. 6.4(a) - Os quatro movimentos mais importantes da imagem

M.D. Rosenau Jr. [50] cita tres desses movimentos para os quais deduziu fórmulas que possibilitam o cálculo de suas FTM analiticamente.

Primeiramente, o movimento parabólico devido a erros geométricos inerentes a câmeras panorâmicas ou câmeras de suporte inclinado. A FTM é calculada pela seguinte fórmula:

$$FTM(\alpha) = \frac{1}{2\sqrt{a\alpha}} \left\{ \int_0^{2\sqrt{a\alpha}} \left[\cos \frac{\pi}{2} v^2 + \sin \frac{\pi}{2} v^2 \right] dv \right\}^{1/2} \quad (6.4.1)$$

onde "a" é o arrastamento e α a frequência espacial.

Em seguida o movimento senoidal devido a vibração. É calculado mediante o emprego da função de Bessel de ordem zero.

$$FTM(\alpha) = J_0(\pi a \alpha) \quad (6.4.2)$$

Finalmente o movimento aleatório que ocorre quando diversos fatores se fazem presentes de maneira desordenada (desconexa); é dado por uma exponencial:

$$FTM(\alpha) = e^{-2\pi^2 a^2 \alpha^2} \quad (6.4.3)$$

onde a é o desvio padrão da amplitude do movimento no plano imagem.

A Fig. 6.4(b) mostra as FTM para os quatro tipos de mo
vimentos descritos.

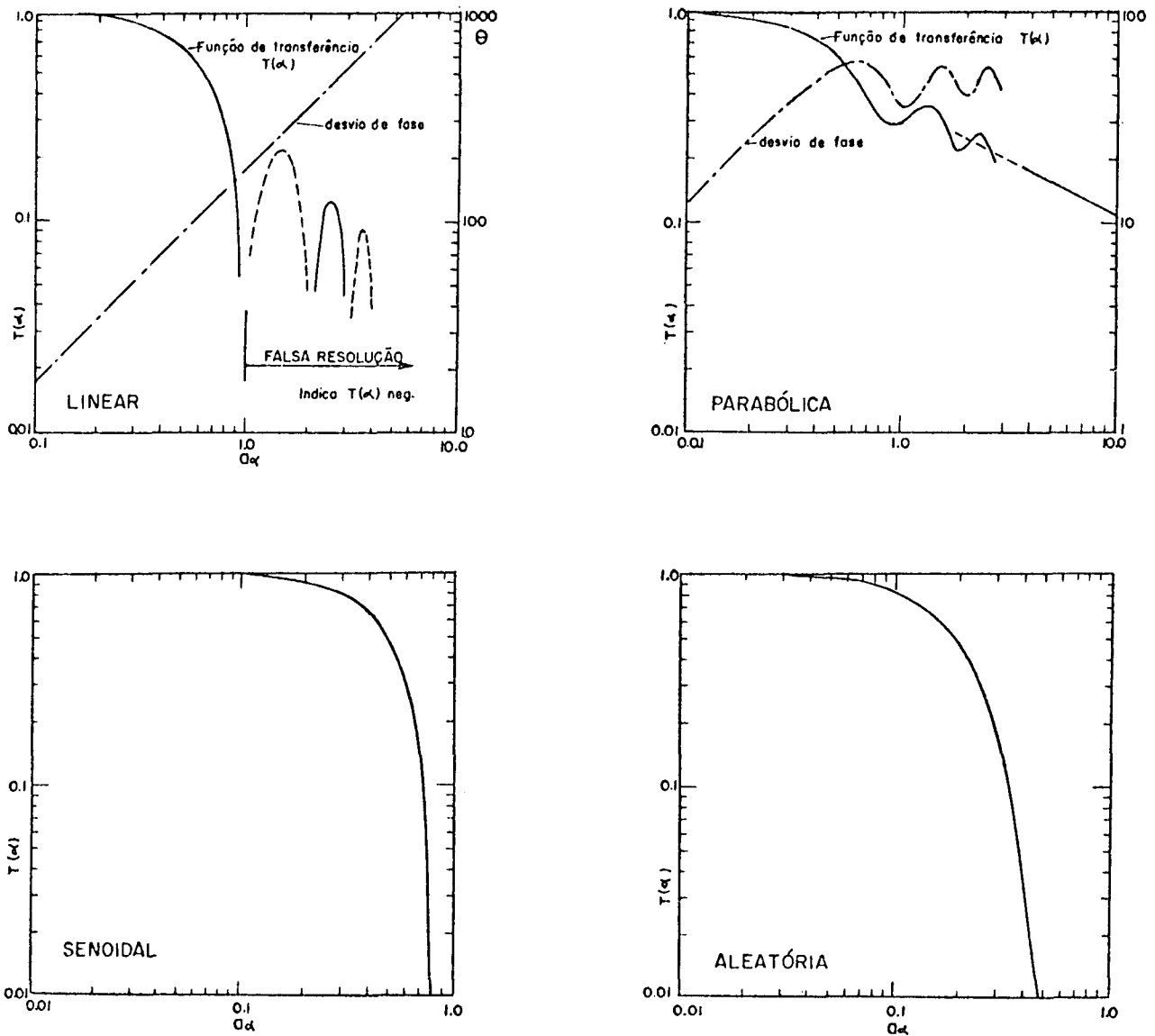


Fig. 6.4(b) - FTM para os quatro movimentos da
imagem ilustrados na fig. (5.3)

CAPÍTULO VII

EXATIDÃO E PRECISÃO NO CÁLCULO DE FTM

7.1 - Introdução

As técnicas de avaliação da qualidade da imagem por meio da FTM precisam ser estudadas conforme a precisão das medidas e a exatidão dos resultados. A precisão pode ser testada com relativa facilidade. É suficiente que se faça um determinado número de medidas de um sistema óptico. As FTM calculadas a partir das diversas medidas são comparadas entre si de modo a obter a precisão. Quanto à exatidão, ela é muito importante e é difícil de ser determinada.

7.2 - Precisão

A precisão de medidas da FTM fotográfica foi alvo de uma investigação particular por parte de M.C. Goddard e R.G. Gendron [6]. Em 1969 publicaram resultados que obtiveram a partir da análise de padrões senoidais. Para tanto, foram obtidas, diariamente as FTM de um filme preto e branco de alta definição, num período de 12 semanas. Foram determinadas modulações para oito frequências distintas, compreendidas entre 5 e 120 ciclos/mm. O desvio padrão das modulações variou entre 1,9% e 3,2% para modulações abaixo de 41%. Estes resultados são considerados ótimos.

Com relação à precisão da técnica de AGB, R.A.Jones [30] registrou e publicou em 1967 um desvio padrão, para modulações de 60% e 30%, de 1,8 e 3,7 ciclos/mm.

Em 1969, R.A.Jones e J.T.Kelly [32] realizaram uma cuidada experiência, onde uma comparação entre a precisão dos métodos de AGB e a análise senoidal, apresentou resultados satisfatórios. Foram usados, para a experiência, um alvo aresta de baixo contraste do National Bureau of Standards (USA) e um padrão senoidal da Eastman Kodak. As fotografias foram tomadas em laboratório, com uma câmara PRAKTICA sobre um filme Eastman Kodak 3404 e processadas no revelador Kodak D-19. O método de AGB mostrou uma precisão maior do que o método de análise senoidal (figs. 7.2(a) e 7.2(b). A precisão do método de AGB é aproximadamente

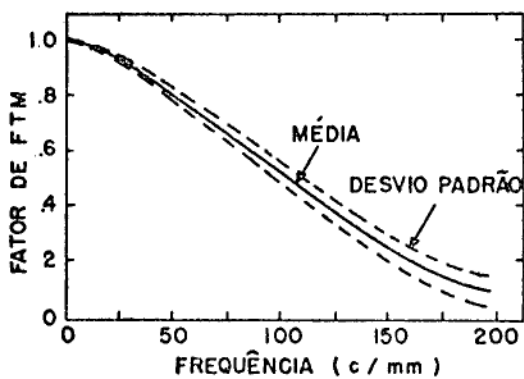


Fig. 7.2(a) - Resultado da precisão para o método de análise senoidal.

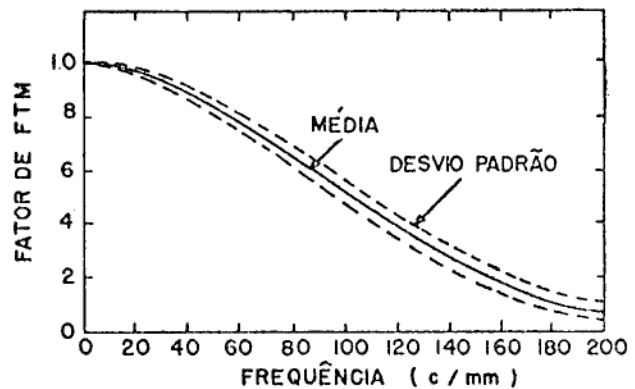


Fig. 7.2(b) Resultado da precisão para o método AGB.

constante - com um desvio padrão de 5% para a modulação de 0.2. A precisão do método de análise senoidal depende muito do cuidado da análise, mas pode se aproximar da precisão do AGB. Os dois métodos apresentaram uma boa concordância até a frequência de 200 c/mm.

Lembramos que na prática, a frequência de 50 c/mm. é rara mente ultrapassada. Além disso, modulações de 5%-10% são muitas vezes a tingidas em frequências de 30 c/mm. No entanto, para esses valores existem poucos dados de avaliação da precisão.

Por esta razão, o grupo de trabalho sobre qualidade da i magem, da Comissão I da Sociedade Internacional de Fotogrametria, no XIIº Congresso Internacional realizado em Ottawa, Canadá, julho-agosto, de 1972, concluiu que a precisão de medidas de FTM obtidas sobre emulsões de grão-fino, em exposições processadas em laboratório, é satisfatória. Para FTM de negativos aéreos obtidos na prática, são necessárias maiores investigações [6].

7.3 - Exatidão

Os possíveis testes de exatidão que poderiam ser emprega dos se resumem nos seguintes: a) testes analíticos, b) testes de compara ção e c) testes de medida.

Os testes analíticos são baseados no uso de dados analítiti

cos. A FTM calculada pode então ser comparada com valores estimados. Este método fornece um ótimo meio de avaliar os estágios diversos do cálculo. Entretanto, o resultado deste tipo de teste não é conclusivo. Outrosim, os dados analíticos nem sempre simulam exatamente os dados experimentais.

Os testes de comparação consistiriam no uso de duas técnicas de avaliação da FTM, para o mesmo sistema óptico. Por exemplo: análise senoidal e AGB. Tal procedimento seria realmente útil para determinar a concordância existente entre os dois processos usados; mas não daria informação a respeito da exatidão de qualquer das duas técnicas.

Os testes de medida foram os escolhidos para a determinação da exatidão de FTM. Consiste em obter determinações de um componente do sistema óptico que tenha uma FTM exatamente conhecida. Isto é feito usando-se o movimento linear da imagem. As duas experiências mais importantes neste sentido foram realizadas por Robert A. Jones, em 1968 e E. Welander e L.O.Hendeberg, em 1962.

7.3.1 - 1ª Experiência

A experiência desenvolvida por Robert A. Jones [30] consiste em fotografar um conjunto de alvos especiais, introduzindo-se um movimento linear de imagem. O movimento linear é usado, por ter uma FTM realmente conhecida e por ser além disso de fácil obtenção

Para a realização da experiência, são usados dois alvos dispostos ortogonalmente, um em relação ao outro. Esses alvos são do tipo normalmente empregados em FTM. (Por exemplo, um alvo de transmitância variável senoidalmente; uma aresta viva ou um degrau de exposição). Os dois alvos são orientados de tal modo que fiquem um paralelo e outro perpendicular à direção do movimento da imagem. Durante a exposição, as imagens de um alvo sofrerão uma degradação devida ao movimento da imagem enquanto o outro não será afetado. Supondo que todas as outras degradações ópticas do sistema sejam simétricas, o alvo focalizado fornecerá a FTM do sistema sem movimento da imagem, enquanto o alvo fora de nitidez dará a FTM do sistema com movimento. A razão entre as duas FTM resultará na determinação experimental da FTM do próprio movimento da imagem.

Desta maneira, os valores teóricos podem ser obtidos e comparados com os valores experimentais. A exatidão da determinação experimental é uma medida direta da exatidão da técnica de avaliação da imagem em uso.

7.3.1.1 - Equipamento

O equipamento usado para o teste é bem simples. A figura 7.3.1.1 mostra, esquematicamente, como poderia ser desenvolvido o procedi

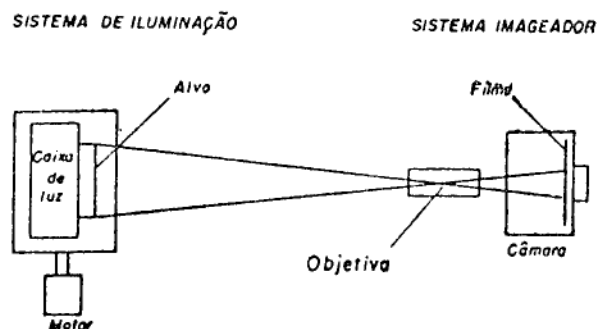


Fig. 7.3.1.1 - Esquema do dispositivo usado para obter movimento da imagem.

mento. O alvo é montado numa caixa de luz para se obter igual iluminação. É usada uma câmara para fotografar o alvo. As exposições são feitas acendendo e apagando a caixa de luz enquanto o obturador permanece aberto. (Isto se faz para evitar trepidação). Durante a exposição, o alvo é colocado em movimento linear por meio de um motor.

No desenvolvimento do método, vários cuidados se fazem necessários com relação ao alvo teste, à câmara, ao motor e ao dispositivo de regulagem de tempo. O alvo precisa ser de ótima qualidade. A câmara deve ser equipada com uma objetiva de boa resolução, com um dispositivo para ajuste focal fino. O motor requer uma velocidade uniforme que seja exatamente conhecida. Os dois alvos precisam estar exatamente perpendiculares, um em relação ao outro, e corretamente orientados com relação à direção do movimento. O dispositivo de disparador do obturador deve regular o tempo de exposição de modo preciso e exato.

O valor teórico para a FTM do movimento linear da imagem é calculado pela fórmula:

$$FTM(\alpha) = \frac{\text{sen}(\pi a \alpha)}{\pi a \alpha} \quad (7.3.2)$$

onde α é a frequência espacial e "a" o arrastamento da imagem.

7.3.1.2 - Resultados

O procedimento de Robert A. Jones foi usado para testar a técnicas de AGB da Perkin-Elmer. Foram analisados 3 diferentes tipos de

movimento da imagem. Primeiramente um movimento da imagem de 20μ . O método de AGB foi usado para determinar FTM em duas direções. A Fig.7.3.1.2(a)

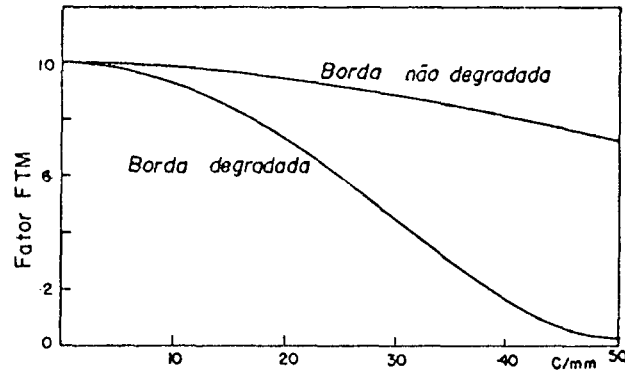


Fig. 7.3.1.2(a) - Determinações de FTM com e sem movimento da imagem - 20μ .

mostra as FTM para as duas direções - aresta degradada e não degradada. A razão entre as duas FTM, frequência por frequência, resulta na determinação experimental da FTM do movimento linear da imagem. Estes valores foram comparados com a FTM do movimento linear, conhecida analiticamente. A Fig.7.3.1.2(b) mostra este resultado, onde a linha cheia corres

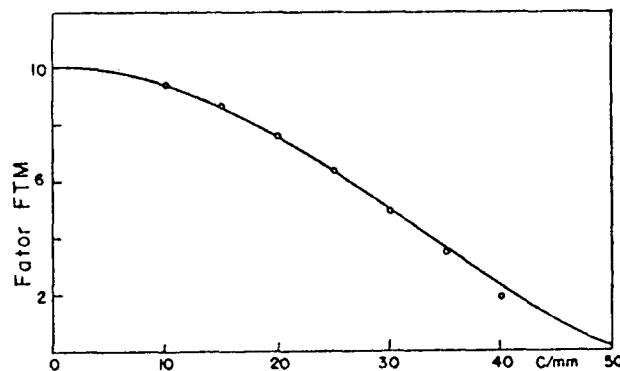


Fig. 7.3.1.2(b) - Resultado da exatidão de AGB - movimento da imagem de 20μ .

ponde ao resultado teóric e os pequenos círculos, ao experimental.

Os cálculos foram repetidos para movimentos da imagem relativos a 10μ e 5μ e as respectivas FTM calculadas, foram comparadas com a FTM conhecida teóricamente. Os resultados são mostrados nas figs. 7.3.1.2(c), 7.3.1.2(d), 7.3.1.2(e), 7.3.1.2(f).

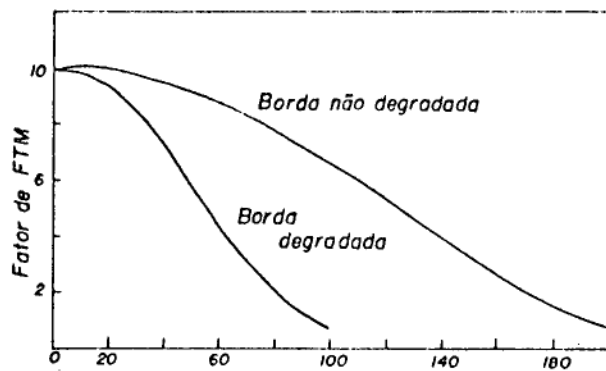


Fig.7.3.1.2(c) - Determinação de FTM com e sem movimento de imagem - 10μ

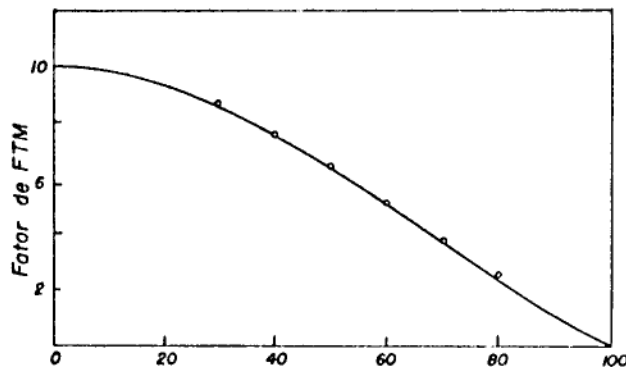


Fig.7.3.1.2(d) - Resultado da exatidão de AGB - Movimento da imagem 10μ .

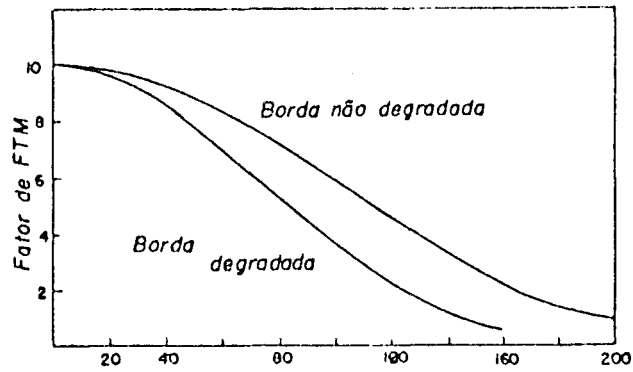


Fig.7.3.1.2(e) - Determinações de FTM com e sem movimento de imagem - 5μ .

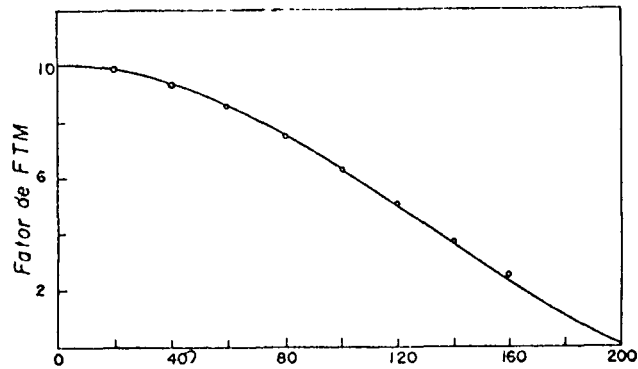


Fig.7.3.1.2(f) - Resultado da exatidão de AGB - Movimento da imagem de 5μ .

7.3.2 - 2ª Experiência

Em 1962 Hendeberg e Welander [26] realizaram uma tentativa de averiguar a viabilidade do método de FTM para negativos aéreos. A FTM experimental do movimento da imagem foi obtida usando dois aviões voando em alturas de 396 m e 1881 m respectivamente. Na parte superior das asas do aparelho que voava mais baixo, foram pintadas linhas de teste,

que eram fotografadas pelo aparelho que voava mais alto.

Primeiramente, os dois aviões voaram na mesma direção, no mesmo sentido e na mesma velocidade. Neste caso, foi obtida a FTM sem movimento da imagem. Em seguida, os dois aviões voaram ainda na mesma direção, com a mesma velocidade, mas em sentidos opostos. Foi então obtida a FTM de um negativo, com um movimento da imagem correspondente ao dobro da velocidade dos aparelhos. A FTM do movimento da imagem foi calculada dividindo as duas FTM, frequência por frequência.

A FTM teórica do mesmo movimento da imagem foi calculada levando-se em conta a velocidade dos aviões, a escala da foto, a velocidade do obturador e seu rendimento. A concordância entre a FTM experimental e a teórica foi muito boa. Entretanto, o sinal da linha de teste medida, foi pequeno e o ruído considerável. O método apresenta ainda a desvantagem de não levar em consideração outros tipos de movimentos diferentes do linear a que estão sujeitas as aeronaves.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÃO

8.1 - Introdução

A FTM tornou-se um método importante de análise do desempenho dos sistemas aerofotográficos usados em aerofotogrametria. Embora muitos problemas ainda existam no uso da FTM como um método de análise da qualidade da imagem, a ponto de não se ter chegado ainda a uma exata e adequada padronização, ela se constitui num método mais eficiente do que o clássico poder resolutivo.

Evidentemente, vários fatores afetam a qualidade das fotografias aéreas. A redução de contraste, indicada pela FTM, é um deles. A granulosidade é muito importante também, sobretudo em baixos contrastes. O conceito de FTM considera até certo ponto a granulosidade. Com efeito, os grãos mais grossos produzem mais difusão e conseqüentemente valores mais baixos de modulação.

A gama do filme influencia a qualidade da imagem e não é levada em consideração pela FTM uma vez que se usa a "exposição efetiva" e não densidade ou transmitância.

8.2 - FTM e Poder Resolutivo:

Em se tratando de aerofotogrametria uma qualidade importante da fotografia é a exata definição das bordas dos objetos. Isto é importante tanto para o traçado dos elementos cartográficos quanto a escolha e identificação dos pontos de apoio.

O poder resolutivo, relacionado a pormenores do tamanho limiar, não indica absolutamente nada com relação à qualidade com que as bordas de objetos são reproduzidas. A fig. 8.2(a) mostra duas fotografias de um mesmo padrão de teste. A foto (A) tem uma boa resolução, porém as bordas são mal definidas. Na foto (B) ocorre exatamente o inverso; ela não tem uma boa resolução, mas as bordas são muito mais nítidas.

Usando a noção de função de espalhamento vista anteriormente (cap. IV § 4.2.2), é possível explicar essas características das fotos (A) e (B). Dependendo das propriedades de absorção e dispersão de uma emulsão fotográfica, é possível obter uma função de espalhamento com a forma (1) ou (2) da fig. 8.2(b). A função de espalhamento (1) é obtida quando o meio tem uma alta absorção e pouca dispersão, enquanto a função de espalhamento (2) indica um meio de pouca absorção e muita dispersão. Como a distribuição de energia na imagem de uma aresta viva é simplesmente a integral da FEL (cap. IV, § 4.2.3), é possível calcular a função traço de aresta para imagens formadas nestes dois meios (fig. 8.2(c)).

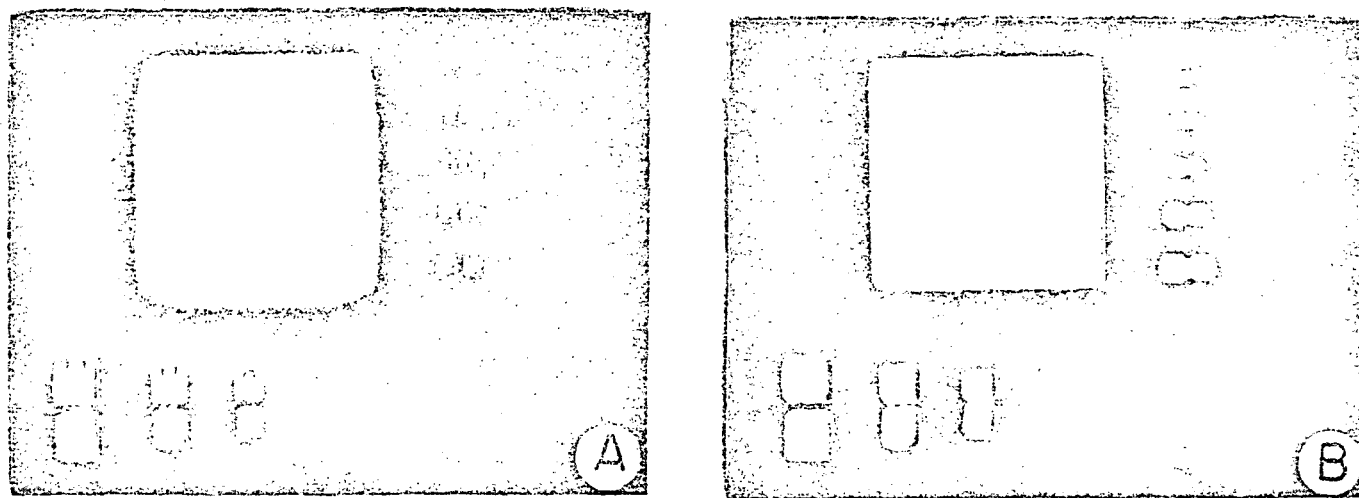


Fig. 8.2(a) - Ilustração da resolução e definição de aresta

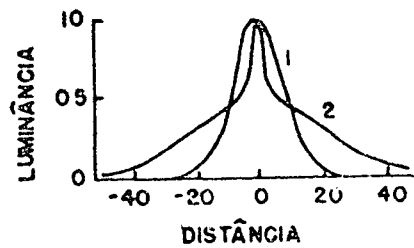


Fig. 8.2(b) - Exemplo de duas funções de espalhamento

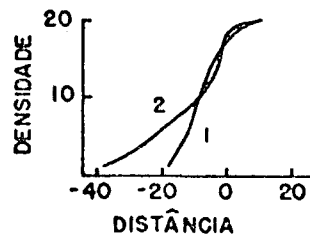


Fig. 8.2(c) - Funções traço de aresta

Quando forem usadas as condições da função de espalhamento do tipo (1) para imagear duas barras paralelas de um padrão de poder resolutivo, a distribuição de energia na imagem, calculada da mesma maneira como foi calculada a imagem da aresta viva, é encontrada na forma apresentada no lado esquerdo da fig. 8.2(d). É evidente que estas duas barras não estão resolvidas. Teríamos, entretanto, uma aresta bem definida. Concluimos, portanto, que as funções de espalhamento do tipo (1) fornecem imagens com baixa resolução, porém, com uma boa definição de aresta.

Nas mesmas condições, se for usada uma função de espalhamento do tipo (2), a distribuição de energia terá o aspecto do lado direito da fig.8.2 (d). Observa-se que as linhas estão resolvidas. Logo, funções de espalhamento do tipo (2) fornecem imagens com uma definição de aresta deficiente, porém, com uma boa resolução. [28]

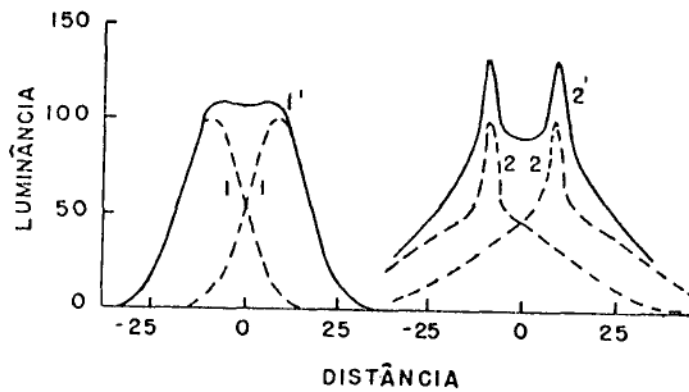


Fig. 8.2(d) - Ilustração da resolução

O PR, como meio de indicar a eficiência de um sistema em reproduzir pormenores distintamente, é de pouca aplicação, sobretudo quando determinado com padrões de teste de alto contraste, como se procede normalmente. A situação é um tanto diferente quando se usa padrões de baixo contraste. Em casos especiais de aplicação, como na aerofotogrametria, onde o reconhecimento de pormenores de baixo contraste é o que mais se deseja, o PR assim determinado tem sua vantagem. Não obs

tante, um simples valor não pode competir com a FTM em estudos mais exatos [19].

Uma justificativa que assegura ainda o uso do PR, especialmente em fotogrametria, é o fato de que apesar de seus inconvenientes teóricos, um tal parâmetro exprime, de maneira simples, uma qualidade prática por um só número, enquanto o julgamento do comportamento de um material sensível ou de um sistema de reprodução por sua FTM completa não é tão evidente nem tão simples. [35]

A FTM, como fator de análise, traz várias vantagens sobre o PR. Primeiramente, proporciona informação mais completa sobre sistemas imageadores, pelo fato de oferecer valores objetivos de redução de contraste para pequenos assim como para grandes objetos.

Além disso, outra grande vantagem é o fato de podermos obter a FTM do sistema, pela simples multiplicação das FTM dos componentes individuais. Este processo é denominado "cascateamento".

A fig. 8.2(e) mostra as FTM de uma lente, de um filme e de uma cópia positiva (linhas tracejadas) obtidas separadamente. A FTM total determinada pelo produto destas três FTM é representada pela linha cheia. Os pequenos círculos, por outro lado, representam a FTM calculada a partir da cópia positiva, obtida esta nas mesmas condições. [28]

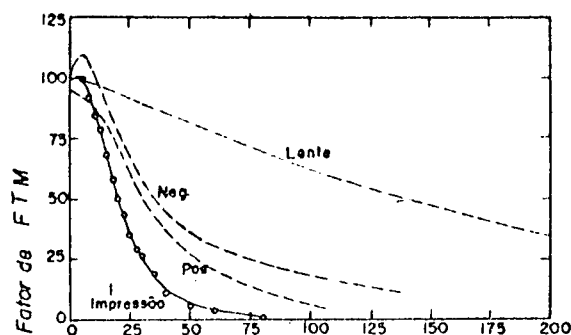


Fig. 8.2(e) - Cascadeamento de FTM

Outra vantagem da FTM, que já tivemos oportunidade de frisar, trata-se do fato de podermos obtê-la a partir de alvos naturais, existentes no terreno, sem necessidade de alvos - teste especialmente construídos para esse fim. Neste sentido é empregado o método AGB. Este método foi recomendado pelo Grupo de Trabalho sobre FTM da Comissão I, no XII Congresso Internacional de Fotogrametria, em Ottawa, Canada, 1972 [6].

Com o fim de dar uma visão geral dos tópicos relativos à aplicação de FTM em aerofotogrametria, apresentamos um esquema geral na fig. 8.2(f). Vemos através do mesmo a aplicação de FTM nos principais componentes de um sistema aerofotográfico.

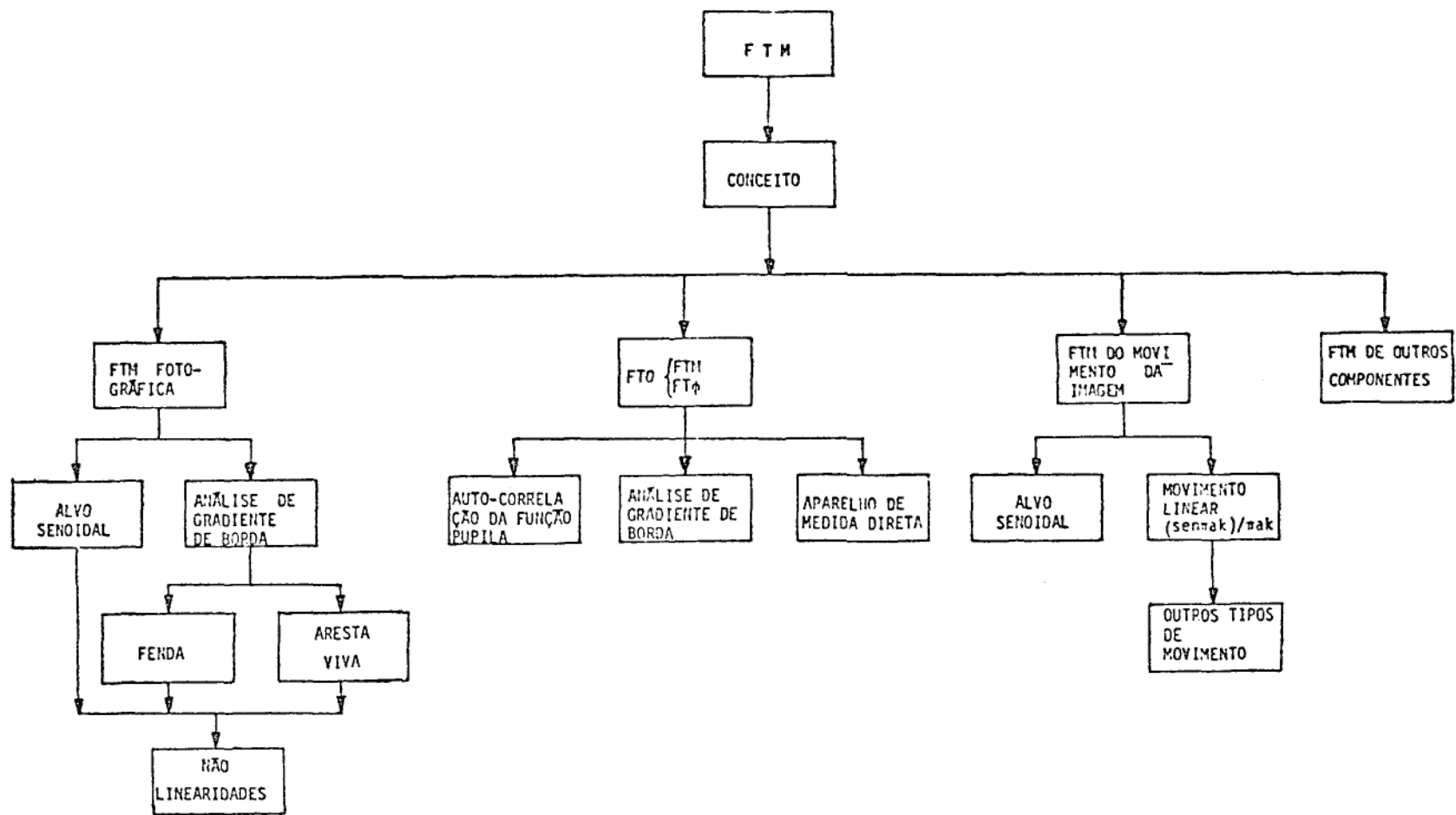


Fig. 8.2(f) - Esquema geral da aplicação de FTM.

8.3 - Padronização da FTM Fotográfica e da FT0

A FTM tem se mostrado diferente quando determinada para diferentes combinações de abertura da câmera, campo angular, orientação do alvo. Entretanto, a determinação da FTM para diversas variações destes elementos implica numa quantidade de informações talvez desnecessária ou pelo menos não muito prática. Normalmente o usuário não está em condições de aproveitar todos esses dados. A especificação completa poderia ser útil para o produtor, particularmente no caso de lentes. Para o usuário muitas dessas informações são redundantes.

G. C. Brock et al [11] apresentaram um relatório sobre resultados de um trabalho realizado na Inglaterra sob os auspícios do SIRA visando a simplificação da FT0. Neste relatório eles propõem uma padronização da FTM da lente numa única frequência de 15 c/mm, ao mesmo tempo em que eliminam a $FT\phi$. Sem entrar em consideração no que diz respeito ao campo angular e à orientação do alvo, uma única frequência seria muito incompleta. Cairia no mesmo inconveniente do PR o qual só dá informação para a frequência limiar. Além disso, essa única especificação seria muito simples e viria em detrimento de uma melhor informação do sistema óptico, como o próprio relatório reconhece.

Assim sendo, defendemos uma simplificação da FTM, mas em termos de dar ao usuário uma idéia o mais possível completa do rendimento do sistema. Neste sentido, fazemos distinção ao que diz respeito à

lente e ao que diz respeito ao filme. Estes são os dois elementos mais importantes que exigem especificações por parte dos respectivos produtos.

Considerando que, como já observamos anteriormente, frequências acima de 50 c/mm raramente aparecem na prática em se tratando de fotografias aéreas, ainda mais, considerando que informações sobre o rendimento do sistema para frequências mais baixas se fazem necessárias, propomos a determinação do fator de FTM para tres frequências distintas: 10, 30 e 50 c/mm.

Essas tres frequências possibilitam a análise da redução de contraste em condições práticas. Uma vez que na frequência zero o fator de FTM é unitário por definição, os valores nas tres frequências preconizadas, fornecem o comportamento geral da curva até a frequência limite de 50 c/mm.

Contudo, somente dados de redução de contraste não são suficientes. Outros fatores necessitam de especificações, fatores estes diferentes se considerarmos o filme ou a lente. Com relação ao filme propomos um padrão de especificações conforme o quadro 8.3(a).

FILME	PANATOMIC - X		
FREQ. c/mm	10	30	50
FATOR DE FTM	0,98	0,90	0,85
MÉTODO	A G B		
GAMA	0,8		
GRANULOSIDADE	2,1		
PR	30 l/mm		

Quadro 8.3(a) - Padronização das especificações do filme

O método é o recomendado pela Sociedade Internacional de Fotogrametria.

Para valores de gama recomenda-se de 0,6 a 0,8 com o fim de permanecer na região sensivelmente linear da curva D-log E. Uma alta gama ($\gamma = 2.0$) produz como efeito, a introdução de uma grande quantidade de distorções harmônicas na transferência dos valores de exposição efetiva para transmitância. Neste particular há que se considerar o estágio da cópia.

Deve-se escolher um positivo com uma gama (γ') tal que $\gamma \cdot \gamma' = 1$. A razão é que as distorções harmônicas da imagem nos estágios negativo-positivo se cancelam mutuamente. [6]

A especificação da granulosidade se faz necessária pelo fato de que a FTM exclui a mesma em parte, uma vez que se usa o sinal eliminando-se o ruído. O valor especificado no quadro é o da granulosidade denominada de Selwyn. [24, 28]

O valor de PR, como já tivemos oportunidade de estudar, é útil apesar de suas limitações.

No tocante à lente, outros tipos de informações se fazem necessárias. Primeiramente, eliminamos a $FT\phi$ por ser o efeito de fase normalmente desprezível. Em seguida, a FTM da lente tem mostrado diferenças razoáveis quando determinada para pontos diferentes do campo angular. Propomos, por esta razão, um padrão de informação conforme o quadro 8.3(b).

LENTE		PLEOGON		
DIST. FOCAL		4 $\frac{1}{4}$ "		
FREQ. c/mm		10	30	50
FATOR DE FTM	S/EIXO	0,98	0,95	0,91
	15°	0,92	0,86	0,80
	40°	0,75	0,69	0,60
PR		35 1/mm		

Quadro 8.3(b) - Padronização das especificações da lente

A determinação do fator de FTH sobre o eixo óptico, 15° e 40° , ângulos estes medidos a partir do eixo, dão uma idéia do rendimento da lente para objetos situados em diferentes pontos do campo angular.

Os valores de 15° e 40° estabelecidos para a lente PLEUGOH, grande angular, devem ser escolhidos de acordo com o campo angular da lente. Para uma lente normal angular o fator de FTH seria determinado em ângulos de 15° e 30° , enquanto para uma lente super grande angular seriam escolhidos valores de 20° e 50° . O critério de escolha desses valores é simplesmente atender a uma posição média e outra próxima ao extremo do campo angular.

O valor de resolução da lente também especificado no quadro, desempenha a função de informação complementar, útil em muitos casos.

Observamos que os valores do fator de FTH especificados nos quadros 8.3(a) e 8.3(b) são valores utópicos, colocados a título de ilustração.

A proposição dos referidos quadros de padronização de especificações procura atender particularmente ao usuário. Uma noção elementar dos conceitos de FTH facultar-lhe-ia a análise da redução de contraste nas frequências especificadas. Juntamente com o valor de PR, is

to lhe daria uma idéia tanto da resolução quanto da definição das ares
tas, informações importantes em aerofotogrametria.

Finalizando, o autor assegura que continua desenvolven
do estudos sobre FTM. Neste sentido está preparando uma pesquisa de aná
lise da exatidão do método de AGB em condições práticas, além disso, es
tá elaborando um programa de obtenção da FTO a partir da função pupila,
pretendo publicar trabalhos complementares sobre o assunto.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - ABBOTT, F., Practical aspects of transfer functions measurement. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings, 13, Boston, Mar. 1968. p.143-156.
- 2 - ALONSO, M. e FINN, E.J., "Interference". In: Fundamental University Physics. Massachusetts. Adison Wesley, 1967. vol. 2. cap. 22. p. 856-899.
- 3 - ALTMAN, J.H., The measurement of rms granularity. Appl. Opt., 3(1): 35-38, Jan. 1964.
- 4 - ARSAC, J., Transformation de Fourier et Théorie des distributions. Paris, Dunod, 1961.
- 5 - BAKER, A. et al., Fourier analysis and nonlinear optical systems. 2(1): AD-707-464. Massachusetts. NTIS. 1969.
- 6 - BELDER, D. B. et al., Photographic Modulation Transfer Functions. Report by the Commission I Working Group of the International Society for Photogrammetry to the XIIth ICP. Canada, Jul-Aug. 1972.
- 7 - BERKOVITZ, A., Edge gradient analysis OTF accuracy study. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings.13, Boston, p. 143-156. Mar. 1968.
- 8 - BIRCH, K.G., The application of image motion to the simulation of optical images. J. Photogr. Sci. 17: 150-154. Jul. 1969.

- 9 - BOZEC, P. et al. Mesure de la fonction de transfert des modulations d'un instrument utilisé dans une atmosphère turbulente. Nouvelle Revue d'Optique Appliquée, 2(4): 197-199. Juil-Aout 1971.
- 10 - BRANDES, R.G. e CURRAN, R. K., Modulation transfer function of AZ111 photoresist. Appl. Opt., 10(9): 2101-2103. Sept. 1971.
- 11 - BROCK, G.C. et al. OTF standards for aerial mapping lenses. In: ISP Congress, Ottawa, Jul.-Aug., 1972.
- 12 - COOLEY, J.W. e TUKEY, J.W., An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Math. Comp. (19): 297-301. Apr. 1965.
- 13 - CORBETT, D.J., Motion picture and television film. London e New York. The Focal Press, 1968.
- 14 - DAINTY, J.C. Methods of measuring the Modulation Transfer Function of photographic emulsions. Optica Acta, 18(11): 795-813. Nov. 1971.
- 15 - Definition of Optical Transfer Functions and Modulation Transfer Functions. (Appendix 2) In: International Society for Photogrammetry. Commission I. Report of Working Group on image quality. XIth Congress, 1968. p.24-27.
- 16 - DUFFIEUX, P. M., L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique. Faculté des Sciences, Besançon, 1946.
- 17 - FRANCO, A. dos Santos. Transformação de Fourier. Teoria e aplicações.
- 18 - FRIESER, H. Kinotechnick, 17, 1935.

- 19 - FRIESER, H. The modulation transfer function in photography.
Appl. Opt., 3(1): 15. Jan. 1964.
- 20 - GOODMAN, J.W., Introduction to Fourier Optics. San Francisco.
McGraw-Hill, 1968.
- 21 - GUELFAND, I.M. e CHILOV, G.E. Les Distributions. Paris, Dunod,
1962.
- 22 - HAKKARAINEN, J. The resolving power and the modulation transfer
function of terrestrial and aerial cameras in working
conditions. Photogrammetric Journal of Finland.6(1): 55-71.
Jan. 1972.
- 23 - HAMMING, R.W., Numerical methods for scientists and engineers.
New York, McGraw-Hill, 1962.
- 24 - HEMPENIUS, S. A. Aspects of photographic systems engineering.
Appl. Opt., 3(1): 45-53. Jan. 1964.
- 25 - HEMPENIUS, S. A. The role of image quality in photogrammetric
pointing accuracy. U. S. Army. European Research Office.
Dec. 1969.
- 26 - HENDEBERG, L. O. e WELANDER, E., Experimental transfer
characteristics of image motion and air conditions in aerial
photography. Appl. Opt., 2(4): 379-386, Abr. 1963.
- 27 - HIGGINS, G.C., Methods for analysing the photographic system,
including the effects of nonlinearity and spatial frequency
response. PSE, 15(2): 107-119. Mar-Apr. 1971.

- 28 - HIGGINS, G. C., Methods for engineering photographic systems. Appl. Opt., 3(1): 1 - 10. Jan. 1964.
- 29 - International Society for Photogrammetry. Commission I. Report of Working Group on Image Quality. XIth Congress, 1968.
- 30 - JONES, R.A., Accuracy test procedure for image evaluation techniques, Appl. Opt., 7(1): 133-136, Jan. 1968.
- 31 - JONES, R.A. e COUGHLIN, J. F., Elimination of microdensitometer degradation from scans of photographic images. Appl. Opt., 5(9): 1411 - 1414. Sept. 1966.
- 32 - JONES, R.A. e KELLY, J.T. Reliability of image evaluation techniques. Appl. Opt., 8(5): 941-945. May 1969.
- 33 - KAPANY, N.S. e SHATZEL, J.L. A modulation transfer functions analyser and its application. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings. 13, Boston, Mar. 1968. p. 181-191.
- 34 - KLINGMAN, E. Theory and application of an edge gradient system for generating optical transfer functions. NASA TN D-6424. Washington, D.C. Jul. 1971.
- 35 - KOWALISKI, P. Applications pratiques du concept de transfer de modulation en photographie aërienne. XIe. Congrès International de Photogrammétric. Lausanne. 8-20 Juillet, 1968.
- 36 - LAMBERTS, R.L. Sine-wave techniques in photographic printing J. Opt. Soc. Am., 5(9): 982-987. Sept. 1961.

- 37 - LANZOS, C., Applied Analysis. London, Pitman, 1957.
- 38 - LERMAN, S.H., Application of the fast Fourier transform to the calculation of the optical transfer function. In: Modulation Transfer Function Seminar Proceedings. Boston, 13. Mar. 1968.
- 39 - LEVI, L., Applied Optics. A guide to optical system design. 2V. New York. John Wiley & Sons, 1968.
- 40 - LINFOOT, E.H., Fourier methods in optical image evaluation. London, The Focal Press, 1964.
- 41 - MACDONALD, J., The calculation of the optical transfer function. Optica Acta, 18(4): 269-290. Abr. 1971.
- 42 - MINNICK, W. A., RANCOURT, J.D., Transfer function calculation techniques for real optical systems. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings. 13, Boston. p. 87-103. Mar. 1968.
- 43 - MONI, M. e OKANO, Y. Improvements of a defocused optical system through the use of shaded apertures. Appl. Opt., 10(10): 2219 - 2225. Oct. 1971.
- 44 - NELSON, C. N., Prediction of densities in fine detail in photographic images. PSE, 15(1): 82-97. Jan.-Fev. 1971.
- 45 - NELSON, C. N. et al., Effect of nonlinearities when applying modulation transfer techniques to photographic systems. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings. 13, Boston, Mar. 1968. p. 127 - 134.

- 46 - OFFNER, A., Advances in the computation of the Optical Transfer Functions. In: Modulation Transfer Functions Seminar Proceedings. 13, Boston: p.79-85. Mar. 1968.
- 47 - OFFNER, A., Optical design and Modulation Transfer Functions. In: The practical application of Modulation Transfer Functions. Perkin-Elmer Corporation. Mar. 6, 1963. p. 240-243.
- 48 - PAPOULIS, A., The Fourier integral and its applications. New York, McGraw-Hill, 1962.
- 49 - PERRIN, F. H., The photographic emulsion. In: KINGSLAKE, R. Applied Optics and optical engineering. Vol. II. New York. Academic Press, 1965. p. 119-164.
- 50 - ROSENAU, M.D., Jr., Image-motion modulation transfer functions. In: The practical application of modulation transfer functions. Perkin-Elmer, Mar. 6, 1963. p.252-255.
- 51 - ROSENAU, M.D., Jr., The probability distribution of camera resolution. Appl. Opt., 3(1): 29-34. Jan. 1964.
- 52 - ROSENHAUER, K. e ROSENBRUCH, K., Flare and optical transfer function. Appl. Opt., 7(2): 283-287. Fev. 1968.
- 53 - SCHWARTZ, L., Théorie des distributions, Paris, Herman,
- 54 - SCOTT, F., Film Modulation Transfer Functions. In: The practical applications of Modulation Transfer Functions. Perkin-Elmer Corporation. Mar. 6, 1963. p. 248-251.
- 55 - SEELEY, R. T., Introduccion a las series e integrales de Fourier. Barcelona, Editorial Reverté, 1970.

- 56 - SHANNON, R.R. e NEWMAN, A. H., An instrument for measurement of the optical transfer function. Appl. Opt. 2(4): 365-370. Apr. 1963.
- 57 - SIMONDS, J. L. et al. Analysis of fine detail reproduction in photographic systems. Appl. Opt., 3(1): 23-23. Jan. 1964.
- 58 - TITCHMARSH, E.C., Introduction to the theory of Fourier Integrals. London, Oxford,
- 59 - VON BIEREN, K., Lens design for optical Fourier transform systems. Appl. Opt., 10(12): 2739-2742. Dec. 1971.
- 60 - WELANDER, E., Arch. Internat. de Photogram. Trans. Symp. on Photo Interpret. Vol. 14, 28. Comm VII, Delft, Netherlands, Sept. 1962.
- 61 - WELANDER, E., Modulation transfer functions for photographic emulsions and their applications in aerial photography. Geographical Survey Office. Sweden
- 62 - WELCH, R., Modulation Transfer Functions. Photogram. Eng., 37(3): 247-257. Mar. 1971.
- 63 - WIENER, N., The Fourier Integral and Certain of its applications. New York, Dover Publications, 1958.
- 64 - WILLIAMS, T. L. and ASHTON, A. The use of standard test lenses for verifying the accuracy of OTF equipment. Appl. Opt., 8(10): 2007 - 2012. Oct. 1969.
- 65 - YEADON, E.C., A comparison of two different methods of OTF measurement. Appl. Opt. 8(12): 2541 - 2544, Dec. 1969.

ERRATA

<u>PÁGINA</u>	<u>LINHA</u>	<u>ONDE SE LÊ</u>	<u>LEIA-SE</u>
VIII	11	fotogrāfica	fotogrāfico
IX	18	ē	e
52	12	ē	for
62	5	senoidal	senoidal
88	9	usa	usam