

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
INDUSTRIALS DE BARCELONA**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA**



TESIS DOCTORAL

**Aportación a la automatización en la
toma de medidas y procesado de
datos sobre modelos fotoelásticos
y optomecánicos.**

Frederic Marimón Carvajal

**APORTACION A LA AUTOMATIZACION EN LA TOMA
DE MEDIDAS Y PROCESADO DE DATOS SOBRE
MODELOS FOTOELASTICOS Y OPTOMECANICOS.**



18 Juliol 1988

TESI DOCTORAL

PRESENTADA A

L'ESC. TEC. SUPERIOR D'ENGINYERS INDUSTRIALS

DE BARCELONA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PER L'OBTENCIO DEL

GRAU DE DOCTOR ENGINEER

PER

Frederic Marimón Carvajal
PROF. ASSOCIAT U.P.C.

DIRECTOR DE TESI

Dr. Francesc Roure Fernández
PROF. TITULAR U.P.C.

Barcelona, Maig 1988.

R.47752

AGRADECIMIENTOS

Es conocido que la investigación y desarrollo debe encauzarse a través del trabajo en equipo. No obstante, por imperativos académicos una Tesis Doctoral queda limitada a una labor exclusivamente individual.

La realidad es que sin la ayuda y colaboración de maestros y compañeros, ni esta ni ninguna Tesis, podría llegar a buen fin.

Es un deber inexcusable expresar a todos mi agradecimiento más sincero, y en particular :

Al Prof. Francesc Roure, Director de Tesis, que alejándose del tópico pasivo que muchas veces representa este papel, ha colaborado activamente en todos y cada uno de los apartados. Además, ha procurado la consecución de los recursos económicos, imprescindibles en toda investigación técnica.

Al Prof. JR. De Francisco Moneo, Universidad de Barcelona, por la utilización inicial de sus programas de aplicación.

A la Prof. Bernarda Cembrano, por su ayuda en los siempre enrevesados problemas informáticos.

Al Prof. Jose M^a Auli, por el suministro de los modelos en técnica de congelación de tensiones y bibliografía específica.

Al Prof. Antonio Ros Felip, Universidad Politécnica de Madrid, por el interés y colaboración mostrada.

A los Sres. Luís Becerra y Juan Espada por su ayuda en el montaje de los dispositivos experimentales.

Mención aparte merece el Prof. Jose M^a Fornons, que ha sabido inculcarme una visión clara de esta disciplina y una metodología de trabajo.

Ya que una Tesis desborda el plano estrictamente profesional, es justo agradecer la comprensión y ayuda mostrada por mis padres y familiares.

Muy especialmente a mi esposa Olga, autora del cuidadoso mecanografiado y composición, por su paciencia y ánimos en momentos difíciles.

Barcelona, Mayo 1988.

Esta investigación ha contado con el soporte económico de :

Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.

Proyecto nº PR84-1156-CO2-1.

Comissió Interdepartamental de Recerca e Innovació Tecnològica. Generalitat de Catalunya.

Ajuts : AR.85-15 i AR.85-194.

INDICE

0.0 INTRODUCCION

1.0 ESTADO DE LA CUESTION

1.1 TECNICAS AVANZADAS	1-3
1.2 AUTOMATIZACION DE MEDIDAS	1-15

2.0 ADQUISICION DE DATOS FOTOELASTICOS

2.1 BARRIDO LASER DEL MODELO	2-3
2.2 DIGITIZACION Y TRATAMIENTO DE IMAGEN ..	2-9
2.2.1 Sensores de imagen	2-11
2.2.2 Calibración cámara CCD	2-21
2.2.3 Algoritmos estandar	2-30
2.2.4 Equipo experimental	2-34

3.0 EXTRACCION DE RESULTADOS

3.1 OBTENCION DEL CONTORNO	3-3
3.2 ANGULO DE ISOCLINA	3-12
3.2.1 Principios de medida	3-16
3.3 ISOSTATICAS	3-29
3.4 RETARDO ABSOLUTO	3-43
3.4.1 Filtros monocromáticos	3-47
3.4.2 Principios de medida	3-49
3.5 DATOS AUXILIARES	3-58
3.5.1 Ecuación de Laplace	3-59

**4.0 CALIBRACION DEL SISTEMA
Y APLICACIONES**

4.1 CASO FLEXION PURA	4-2
4.2 FOTOELASTICIDAD POR REFLEXION	4-7
4.3 DISCO COMPRIMIDO DIAMETRALMENTE	4-12

5.0 CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXO I

NOMENCLATURA. ECUACIONES DE LA ELASTICIDAD

ANEXO II

BASES DE LA FOTOELASTICIDAD

ANEXO III

PROGRAMACION

O.O INTRODUCCION

O.O INTRODUCCION

Es por todos conocido que el avance en el mundo de la Ciencia se logra mediante dos caminos. Al primero le corresponde la "idea genial", el descubrimiento de una propiedad o fenómeno que abre perspectivas inéditas y que convulsiona los procedimientos utilizados hasta la fecha en la especialidad.

El otro, más modesto y menos brillante, consiste en relacionar conceptos ya existentes, pero que por motivos interdisciplinarios estaban en dos campos muy diferenciados.

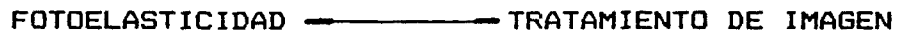
La FOTOELASTICIDAD constituye un ejemplo bien claro de la relación entre la OPTICA y la MECANICA.



También lo es la idea que mueve la presente Tesis. En efecto, las técnicas de TRATAMIENTO DE IMAGEN por ordenador han adquirido un desarrollo muy importante, era impensable hace algunos años el disponer de unas prestaciones que permitirían adquirir y almacenar una imagen física cuasi en tiempo real. El desarrollo no ha hecho más que empezar y actualmente ya existen equipos comerciales con resolución doble a la empleada en esta Tesis. Una vez digitalizada la imagen en el ordenador, su tratamiento y proceso entra de lleno en la aplicación.

La FOTOELASTICIDAD, y en menor medida otras técnicas optomecánicas, constituyen para un ingeniero lo que significa una radiografía para un facultativo médico, es decir "ver" el estado tensional. El inconveniente reside en que la tal "visión", una vez extraídas conclusiones de tipo cualitativo, proporciona una información adicional de difícil interpretación.

Es en este punto donde se produce la conjunción perfecta entre ambas técnicas.



Las interferencias ópticas, detectadas mediante franjas en el modelo o pieza, se transforman automáticamente en conceptos y valores ingenieriles : tensiones y/o deformaciones.

No hay que olvidar, sin embargo, el papel que la FOTOELASTICIDAD representa hoy en día. El perfeccionamiento en las técnicas de simulación (MEF, MEC, etc...) hacen posible el análisis de casi cualquier pieza, con tan solo los datos físicos de las sollicitaciones, las condiciones de enlace y el comportamiento del material.

La precisión de la simulación solamente está limitada a la validez de las ecuaciones de gobierno y la exactitud de los parámetros externos.

Por tanto, la misión que la FOTOELASTICIDAD había representado debido a la difícil o imposible resolución de las ecuaciones de la Elasticidad, carece actualmente de sentido. El coste y dificultad de un ensayo fotoelástico supera ampliamente a una simulación.

No obstante, la Fotoelasticidad y demás técnicas optomecánicas siguen siendo métodos experimentales de ensayo.

Una simulación nunca puede sustituir a un método experimental cuando se ignoran las sollicitaciones reales, las condiciones de enlace o la respuesta del material. Aún conociendo dichos parámetros, un dato experimental confirma la fiabilidad del resultado numérico.

Para muchos investigadores la utilización de las TECNICAS HIBRIDAS en el Análisis de Tensiones constituye el método óptimo de abordar un problema.

Es en esta vertiente donde la Fotoelasticidad, y por ende la Optomecánica, sigue teniendo plena vigencia.

1.0 ESTADO DE LA CUESTION

1.0 ESTADO DE LA CUESTION

Bajo este concepto se engloban los avances que dentro de la FOTOELASTICIDAD y OPTOMECANICA son precedente y referencia de la Tesis.

En el primer apartado, aunque no entrando en la estricta automatización, se revisan las técnicas fotoelásticas singulares y las últimas aplicaciones del método.

En el segundo apartado se detallan los antecedentes existentes en la automatización de medidas fotoelásticas, toma de datos y extracción de resultados. Cada uno de los principios de medida y equipos resultantes son brevemente descritos comentando sus ventajas y principales inconvenientes.

Para la realización del presente estado de la cuestión se ha consultado la bibliografía de la disciplina, las principales publicaciones periódicas en análisis experimental de tensiones y un conjunto importante de artículos especializados obtenidos a través del servicio de Teledocumentación o mediante consulta directa a los investigadores actuales más relevantes.

Entre las prestigiosas revistas especializadas se encuentran :

EXPERIMENTAL MECHANICS : Publicación mensual de la Society for Experimental Mechanics SEM. Consultada mediante Índice en sus inicios, y directamente desde Enero 1983 hasta la actualidad.

EXPERIMENTAL TECHNIQUES : Publicación mensual de la Society for Experimental Stress Analysis SESA, integrada en SEM. Desde Enero 1983 hasta la actualidad.

JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS : Publicación cuatrimestral de la Joint British Comitee for Stress Analysis JBCSA. Desde 1978 hasta 1984.

STRAIN : Publicación cuatrimestral de la British Society for Strain Measurement. Desde Enero 1980 hasta la actualidad.

Los artículos de años anteriores y que se consideraron de interés fueron pedidos directamente a la redacción de las publicaciones respectivas.

Se ha utilizado como servicio de Teledocumentación el de la Universidad Central de Barcelona.

Se eligieron dos Bases de Datos especializadas al objeto de proceder a un barrido Bibliográfico :

INSPEC-8 : Librería de carácter científico con recopilación a partir de 1971 . Un total de 1868 referencias catalogadas sobre Fotoelasticidad.

COMPEDEX-4 : De carácter técnico e ingenieril, iniciada en el año 1969 y con 1685 referencias en temas fotoelásticos.

Mediante el proceso automático de manipulación de la información a partir de palabras clave, se han pedido extractos o 'abstracts' de un total de 56 artículos específicos.

Se realizaron consultas directas a un total de 23 investigadores relevantes en el campo de la Fotoelasticidad.

Hemos recibido gentilmente de los mismos un total de 26 publicaciones recientes, incluso algunas pendientes de su edición definitiva.

A nuestro entender, esta recopilación informativa nos ha permitido obtener un aceptable estado de la cuestión, concretamente en el desarrollo actual del tema de adquisición automatizada de medidas fotoelásticas y su posterior procesamiento y extracción de resultados.

No obstante, en el apendice de Bibliografía de la presente Tesis no está referenciada tan extensa documentación, si no tan solo los artículos que han sido objeto concreto de trabajo.

1.1 TECNICAS AVANZADAS

La Fotoelasticidad, como técnica experimental está sujeta a la introducción de múltiples variantes. En el Anexo II se han comentado las técnicas de reflexión, congelación de tensiones y luz difusa en 3D. Su aplicación a estados singulares (solicitud axisimétrica, fuerza centrífuga, etc.) da lugar a sistemas específicos, pero sin una alteración sustancial del método.

Mención aparte son las técnicas que analizan la propagación de ondas e impactos, la valoración de tensiones residuales o el estudio de materiales que siguen una determinada ley de tipo tenso-deformacional.

FOTOELASTICIDAD DINAMICA

Se comprueba experimentalmente la validez de la fórmula fundamental:

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = N \frac{L}{C_\sigma^* e} \quad C_\sigma^* \leftarrow 0.7 \text{ a } 0.9 C_\sigma \quad (\text{AII-16})$$

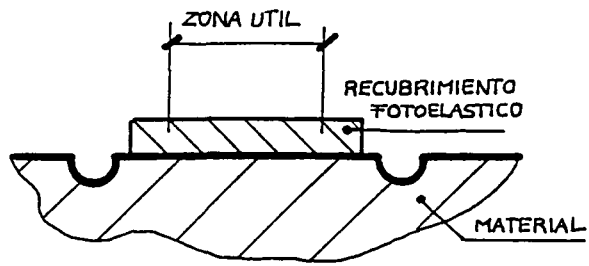
La separación de tensiones, σ_1 y σ_2 , no puede realizarse utilizando los conocidos métodos basados en las ecuaciones de equilibrio, ya que ello implicaría la evaluación de las fuerzas de volumen inerciales en cada punto. Solo es posible mediante registro simultáneo de isopacas ó incidencia oblicua, en casos singulares y evidentemente en contornos.

La semejanza, por aplicación de la teoría de modelos, debería ser casi total. [Ref.14].

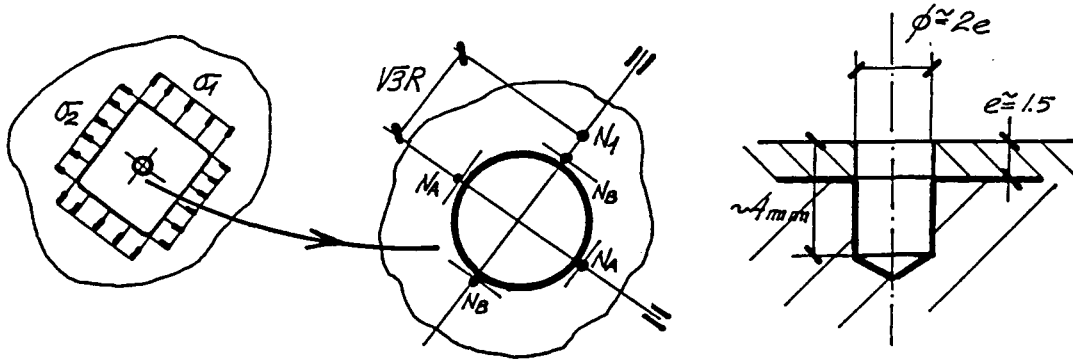
En el estudio de impactos y choques entre diferentes materiales, la semejanza debe cumplirse para ambos: impactado e impactante.

Los pulsos externos están sujetos a semejanza cinemática.

La dificultad principal reside en el registro de imágenes en tiempo real, ya que las franjas se desplazan a velocidades de 2500 m/s. Es necesario recurrir a dispositivos especiales como la cámara de alta velocidad tipo Cranz-Schardin [Ref.25] (con tiempos de exposición de 500 ns) o variantes

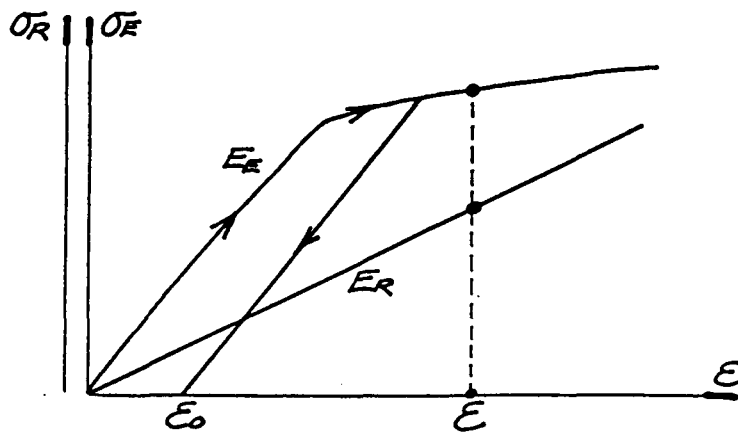


a) Sangrado longitudinal.



b) Taladro circular.

1-1 Análisis de tensiones residuales.



1-2 Fotoplasticidad por reflexión.

con Laser pulsante (de ~ 20 ns). Otro método válido consiste en trabajar con módulos elásticos bajos, de esta forma la velocidad de propagación de la onda disminuye a valores del orden de 60 m/s. [Ref.7].

Un aspecto fundamental es la fricción interna en el material. Solo podrán ser estudiados, mediante modelos, fenómenos en que el amortiguamiento interno sea bajo o despreciable.

ANALISIS DE TENSIONES RESIDUALES

La evaluación de tensiones residuales, en materiales no birrefringentes o no translúcidos, se realiza mediante recubrimientos fotoelásticos sobre la pieza real. (Ver A-II).

El recubrimiento está exento inicialmente de tensiones y deformaciones. Su aparición viene provocada por una variación en el estado tensional de la pieza base.

Se siguen dos métodos conceptualmente distintos :

A) Sangrado : Se practican dos ranuras paralelas y se mide la birrefringencia sobre una zona útil.
(Fig. 1.1a) [Ref.6].

B) Taladro : Se realiza un pequeño taladro de dimensiones usuales en Fig. 1.1b . Su aparición no provoca una redistribución general de tensiones en el cuerpo, si no una pequeña variación a nivel local.

Nisida y Takabayashi [Ref.6] [Ref.14], nos proporcionan los valores de las tensiones residuales en función de los ordenes totales medidos NA y NB, afectados de unos parámetros de corrección geométricos en función de D, e, h.

Mejor precisión se obtiene midiendo el retardo sobre una dirección principal a una distancia $\sqrt{3} R$, [Ref.6], evitando así los efectos de borde.

Ya que solo puede trabajarse con técnicas locales, no se aprovecha la ventaja que nos ofrece el método fotoelástico de proporcionarnos el campo tensional completo.

Evidentemente, en materiales transparentes birrefringentes el análisis de tensiones residuales es inmediato, [Ref.37]. Para el vidrio existe la normativa americana ASTM 148- F218 al respecto.

FOTOPLASTICIDAD

El estudio de los fenómenos plásticos puede abordarse con técnicas experimentales bien diferenciadas. Mediante un recubrimiento fotoelástico se sigue la deformación superficial de la pieza real. Mientras que con la construcción de un modelo, el material fotoelástico debe tener un comportamiento elasto-deformacional similar el material estudiado.

-TECNICA DE REFLEXION: A igualdad de deformaciones, la pérdida de elasticidad se verifica primeramente en el material metálico que en los recubrimientos usuales.

Esta propiedad se ve claramente representada en Fig.1-2 : el eje de las deformaciones es común a ambos, y para pasar de las tensiones en el recubrimiento a las tensiones en la estructura, es preciso conocer su curva de respuesta. [Ref .14].

Una vez retirada la carga, quedan las deformaciones residuales ϵ_0 reflejadas en el recubrimiento.(Fig.1-2).

-TECNICA DE MODELOS: Es posible, mediante una adecuada proporción de componentes, la manufactura de materiales fotoelásticos que sigan una cierta ley tenso-deformacional y en donde la birrefringencia es referida normalmente a las deformaciones.

El método de la diferencia de cortantes, obtenido exclusivamente de las ecuaciones de equilibrio, es apto para la separación de las tensiones principales.

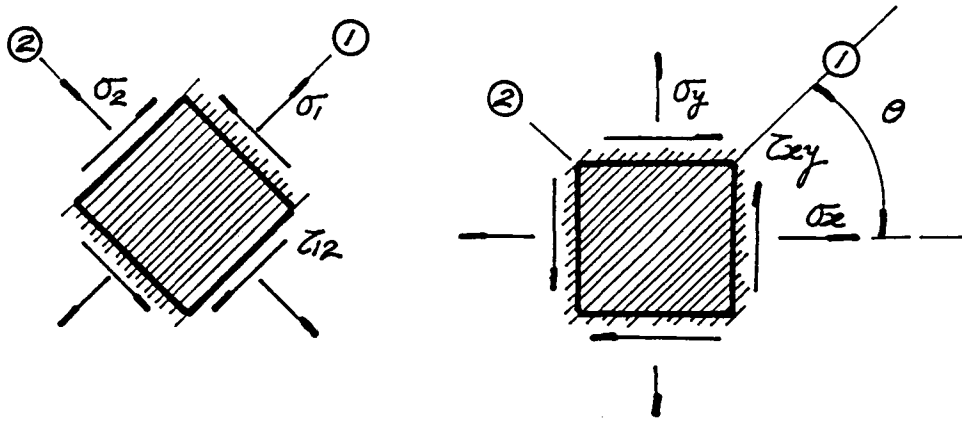
Existe un fenómeno de creep, o deformación diferida con el tiempo, muy acusado al trabajar en zona plástica.

La velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$ es un parámetro determinante en el ensayo. [Ref.14].

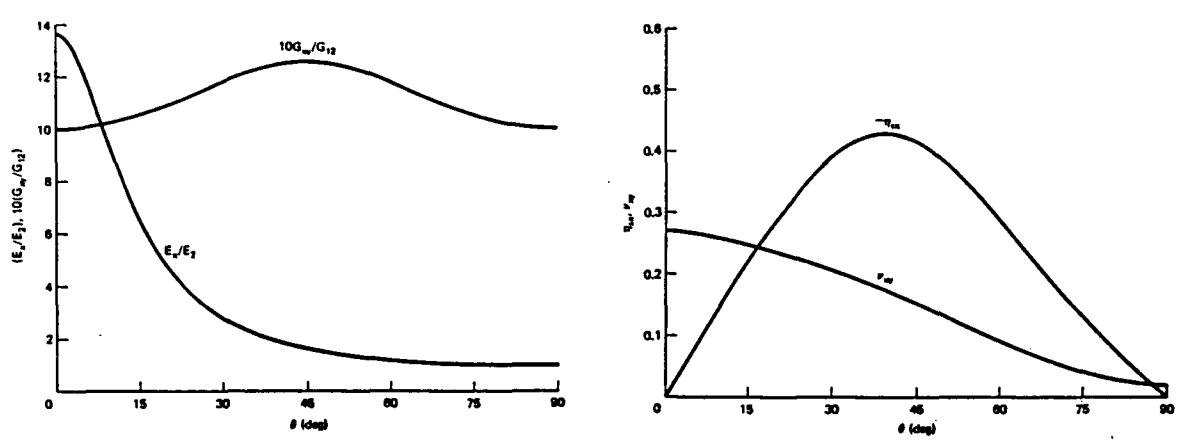
ANALISIS TENSIONAL EN MATERIALES COMPUESTOS LAMINARES

La técnica de los plásticos reforzados ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años. A sus características básicas de bajo peso , insensibilidad a la corrosión y elevada resistencia mecánica, se añade la posibilidad de modelar cualquier forma geométrica y distribuir las fibras en cantidad y en dirección según los esfuerzos previsible.

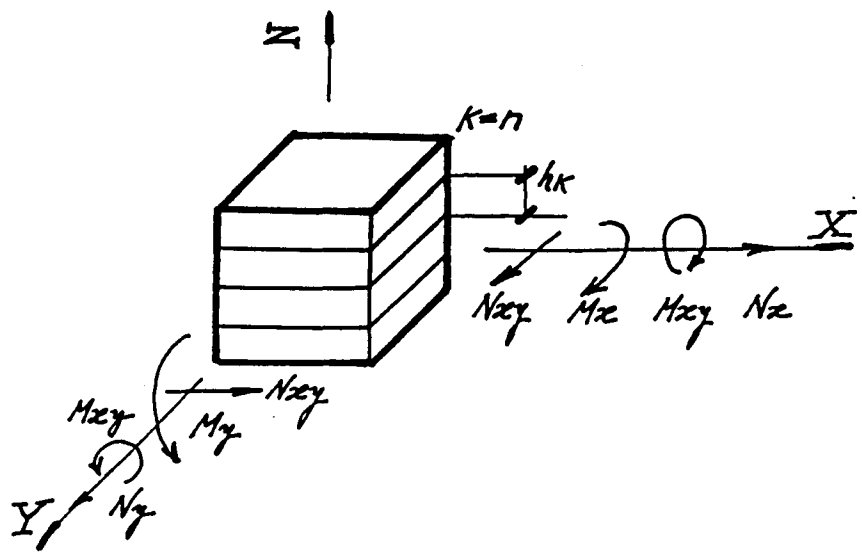
No obstante, esta ventaja resistente complica su análisis tensional al convertirse en material con comportamiento anisótropo.



1-3 Ejes de referencia en el composite.



1-4 Variación de los parámetros según θ .



1-5 Teoría clásica de laminación.

Las características elásticas deben referirse a tres direcciones ortogonales y sus valores dependen de la combinación elegida fibra-resina y su proporción volumétrica.

Las direcciones principales de tensión no coinciden en general con las de deformación. Las ecuaciones constitutivas se refieren usualmente a una lámina simple [Ref.14] :

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}_{x,y} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{\eta_{sx}}{G_{xy}} \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{\eta_{sy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xs}}{E_x} & \frac{\eta_{ys}}{E_y} & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix}_{x,y} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_{x,y} \quad (1-1)$$

$$\text{Donde } \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

Y se han tomado como ejes de referencia los del material. (Fig.1-3).

No obstante en una dirección cualquiera xy, por un simple cambio de base :

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}_{12} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix}_{12} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}_{12} \quad (1-2)$$

En la Fig.1-4 puede observarse la variación de los parámetros en función de la inclinación θ .

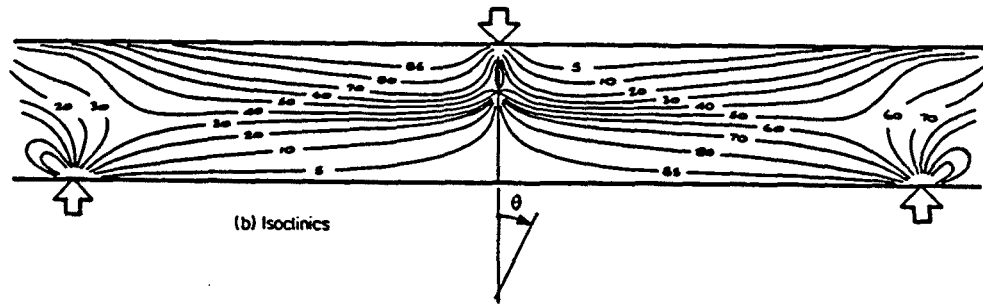
Los criterios de falla siguen un paralelismo con los usuales en isotropía, existiendo algunos especializados como el de Tsai and Wu [Ref.14].

El estudio de láminas superpuestas direccionales asume las clásicas restricciones de laminación.[Ref.14]. Fig 1-5.

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \quad (1-3)$$

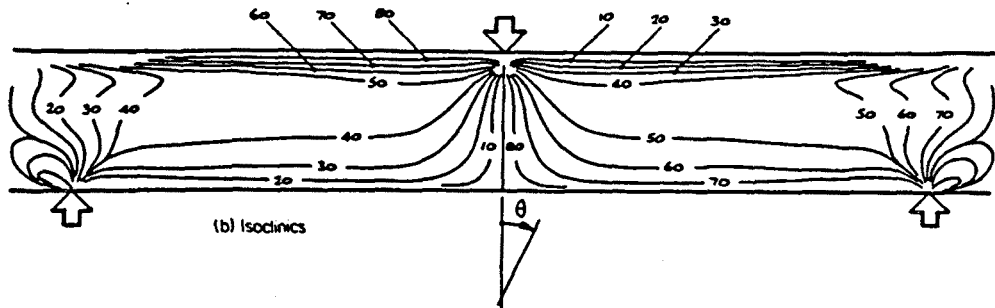
El criterio de falla puede aplicarse considerando: el primer fallo de una lámina (FPF) o el fallo de todas ellas mediante cálculos iterativos (MPF).

Evidentemente los coeficientes de seguridad serán diferentes en ambos casos [Ref.14].



(a) Isochromatics

1-6a Isocromáticas e isoclinas en un material fotoelástico observado por transparencia.



(a) Isochromatics

1-6b Idem. en un recubrimiento fotoelástico sobre un material anisótropo, de Kedward y Hindle.

Análisis fotoelástico en materiales compuestos.

El método fotoelástico permite dos técnicas diferentes:

- 1) Reflexión.
- 2) Birrefringencia propia.

y además dentro de esta última, dos niveles de estudio:

- 2a) Micromecánica.
- 2b) Macromecánica.

1) Técnica de reflexión:

Se sigue el proceso usual de recubrimientos fotoelásticos y por tanto existe isotropía óptica.

Las isoclinas e isocromáticas corresponden al estado de deformacional del composite ya que el recubrimiento sigue las deformaciones de la pieza (Anexo A-II). El conocimiento del estado tensional implica la utilización de las ecuaciones constitutivas (1-16).

La (Fig.1-6a) nos muestra el espectro de isoclinas e isocromáticas obtenidas por Kedward y Hindle [Ref.7] en un recubrimiento aplicado al composite y en la (Fig.1-6b) idénticas franjas correspondientes a un material isótropo observado mediante transparencia.

La separación de deformaciones principales en el recubrimiento debe realizarse con incidencia oblicua o también por aplicación del método de la diferencia de esfuerzos cortantes sobre las tensiones del material compuesto.

Mediante reflexión pueden utilizarse todas las técnicas descritas en el Anexo A-II.

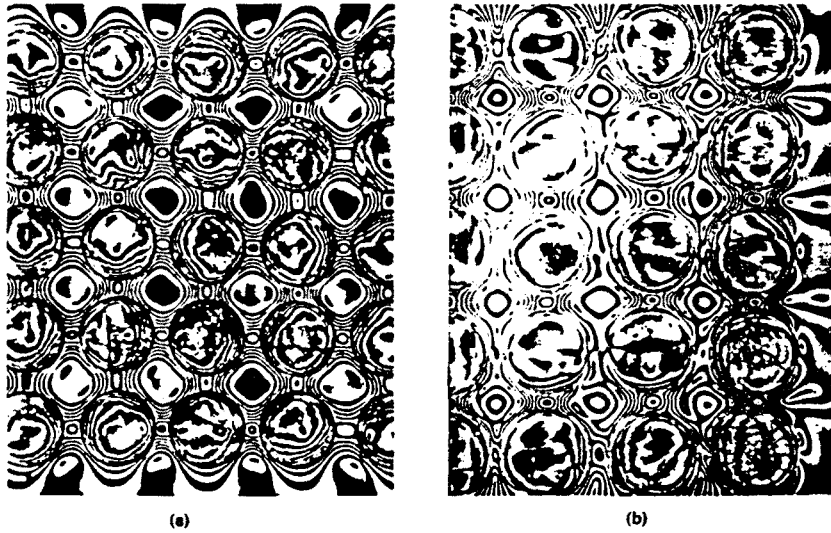
De (1-1) se deduce la ecuación fundamental [Ref.14] :

$$\frac{Nf_{\epsilon}}{2e} = \sigma_1 \frac{1+\nu_{12}}{E_1} - \sigma_2 \frac{1+\nu_{21}}{E_2} \quad (1-4)$$

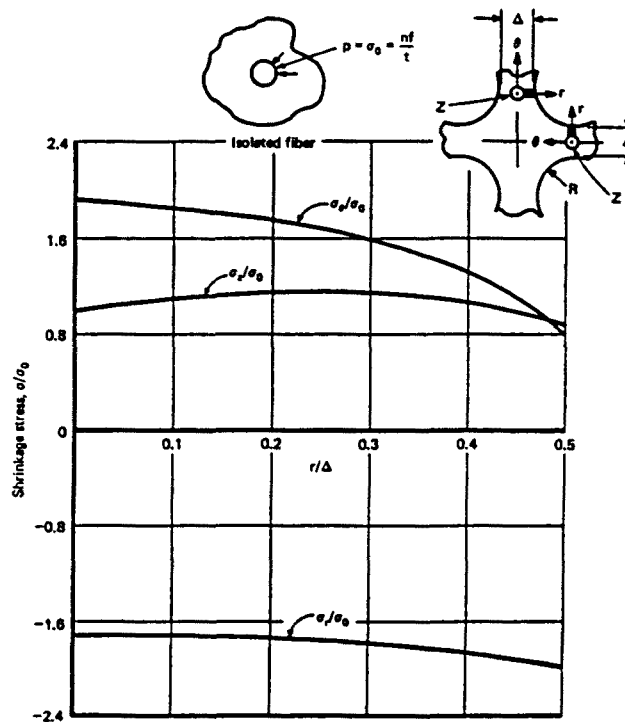
El refuerzo provocado por el recubrimiento no es, como en los metales, generalmente despreciable, y debe cuidarse el efecto de borde tomando medidas a una distancia 3 ó 4 veces el espesor del mismo.

2) Birrefringencia propia:

Debe elegirse para el ensayo una resina birrefringente de suficiente transparencia y cuidar que no aparezcan microburbujas utilizando una bomba de vacío en el proceso de curado.



1-7 Isocromáticas interfibras en una sección de plástico reforzado, de Daniel y Marloff.



1-8 Distribución de tensiones obtenida del caso anterior.

- 2a) Micromecánica

Pueden analizarse mediante corte las tensiones internas producidas por la retracción en el proceso de curado (Fig. 1-7a).

Igualmente, empleando la técnica de congelación de tensiones, se registran las tensiones totales debidas a la carga y la retracción superpuestas (Fig.1-7b). [Ref.14].

Los dos efectos se separan de forma analítica y en las Fig.1-8 a y b se representa la distribución de tensiones existente en el espacio interfibra para ambos casos.

Así, se obtienen los factores de concentración de tensiones en función de la separación entre fibras y puede predecirse la carga de rotura para diferentes diseños.

-2b) Macromecánica

El composite transparente es tratado como material homogéneo con propiedades de ortotropía elástica y óptica.

Así el tensor de birrefringencia en el plano referido a las direcciones del material [Ref.14]:

$$\begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{22} \\ r_{12} \end{pmatrix}_{12} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{pmatrix}_{12} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}_{12} \quad (1-5)$$

y en terminos de birrefringencia relativa :

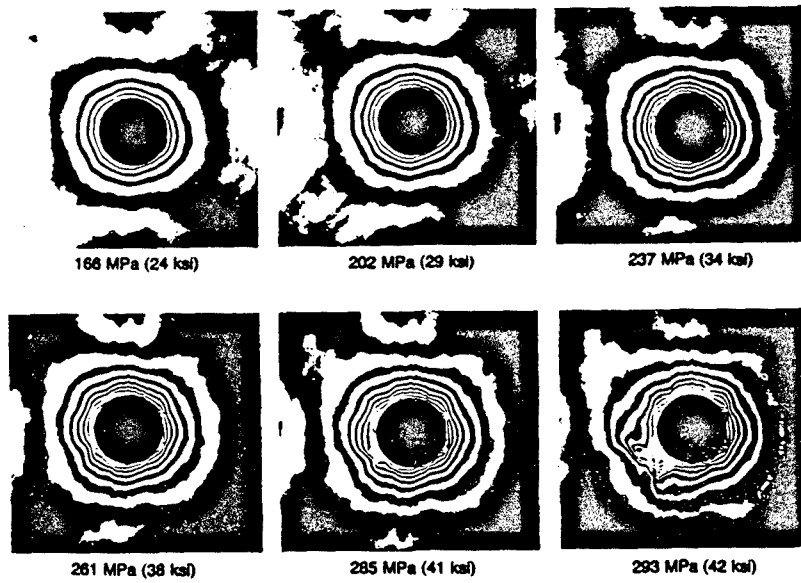
$$N = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{2f_1} - \frac{\sigma_2}{2f_2} \right)^2 + \left(\frac{2\tau_{12}}{f_{12}} \right)^2} \quad (1-6)$$

N Orden de franja por unidad de espesor con Lo.
 f_1, f_2, f_{12} Ctes.fotoelásticas unitarias con Lo.
 $\delta = L_0 N$ Retardo.

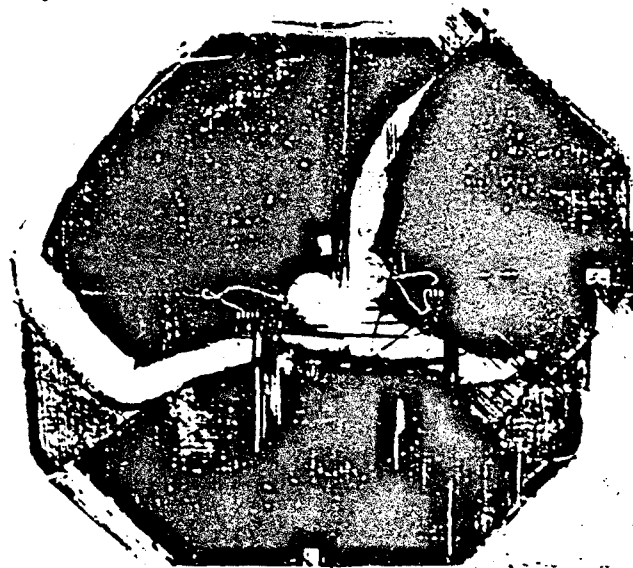
y el ángulo de isocлина :

$$\tan 2\phi_1 = \frac{2\tau_{12}/f_{12}}{\sigma_1/f_1 + \sigma_2/f_2} \quad (1-7)$$

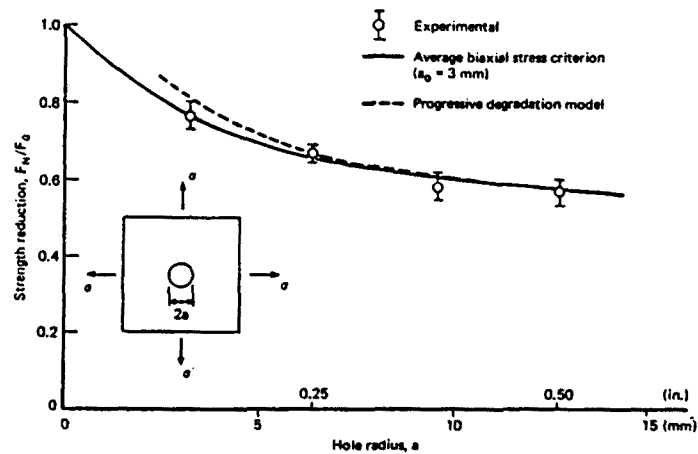
Existe también la posibilidad de incidencia oblicua sobre una dirección principal de refracción, en este caso es necesario encontrar otros factores experimentales de franja adi



1-10 a Concentración deformacional en sollicitación biaxial sobre composite grafito-epoxy, de I.M Daniel (1982).



1-10 b La concentración a $22,5^\circ$ nos marca el inicio y propagación de la rotura experimental.



1-10 c Variación de la carga de ruina según el diámetro del taladro

cionales. S.K. Chaturverdi [Ref.36] consigue la total separación de tensiones mediante la doble incidencia oblicua sobre las direcciones Ox_1 y Ox_2 .

Como resumen, se concluye que las direcciones principales de birrefringencia óptica no coinciden con las direcciones principales de tensión o deformación y como, tampoco estas son coincidentes entre sí, el concepto de isoclina e isocromática adoptan un sentido físico muy diferente al usual.

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE TENSIONES

La respuesta de un laminado provisto de una irregularidad tal como taladro o entalla depende de los conocidos parámetros geométricos (\emptyset , dimensiones, etc..), de carga (solicitud, dirección), y en gran medida de la orientación de las fibras en las capas y de la secuencia de apilado de las mismas.

En la Fig.1-10a, puede observarse un espectro de isocromáticas deformacionales obtenidas del recubrimiento fotoelástico sobre un composite grafito-epoxy [0/+45/90]s [Ref.14] [Ref.34]. Al incrementar la carga en una sollicitación biaxial $\sigma_x = \sigma_y$, se produce concentración deformacional a 22.5 grados respecto al eje de las fibras. La rotura real se verifica en estas direcciones.

En la Fig.1-10c se resumen los resultados. En línea continua y a trazos están representados dos criterios analíticos de falla especializados. Existe un buen ajuste de ambos con la realidad.

No obstante, en otros ensayos efectuados con laminados [0/+45]s mientras que las isocromáticas deformacionales detectan claramente la falla, los criterios analíticos no responden a la reducción de resistencia real. [Ref.35].

Así, la Fotoelasticidad tiene aplicación en la verificación de futuros criterios de falla en plásticos reforzados.

1.2 AUTOMATIZACION DE MEDIDAS

Se entiende como tal, el proceso que de forma automática conduce a la adquisición de datos fotoelásticos generalizados :

- Retardo fraccionario o absoluto.
- Angulo de isoclina.
- Parámetros de la Esfera de Poincaré.
- Franjas isocromáticas, etc.

No obstante, en algunos casos también se asocia a la obtención del estado tensional completo o cuasi completo. Aspecto, que ante la existencia de un microordenador en la cadena de medida, es consecuencia inmediata.

Podríamos establecer una clasificación de los sistemas en tres categorías, según el instrumental y la metodología utilizados :

METODO FOTOGRAFICO :

F.P. Chiang y R.P Khetan (1973) USA
M.L. Meyer y Mehrotra (1974) INGLATERRA
F. Roure (1980) ESPAÑA

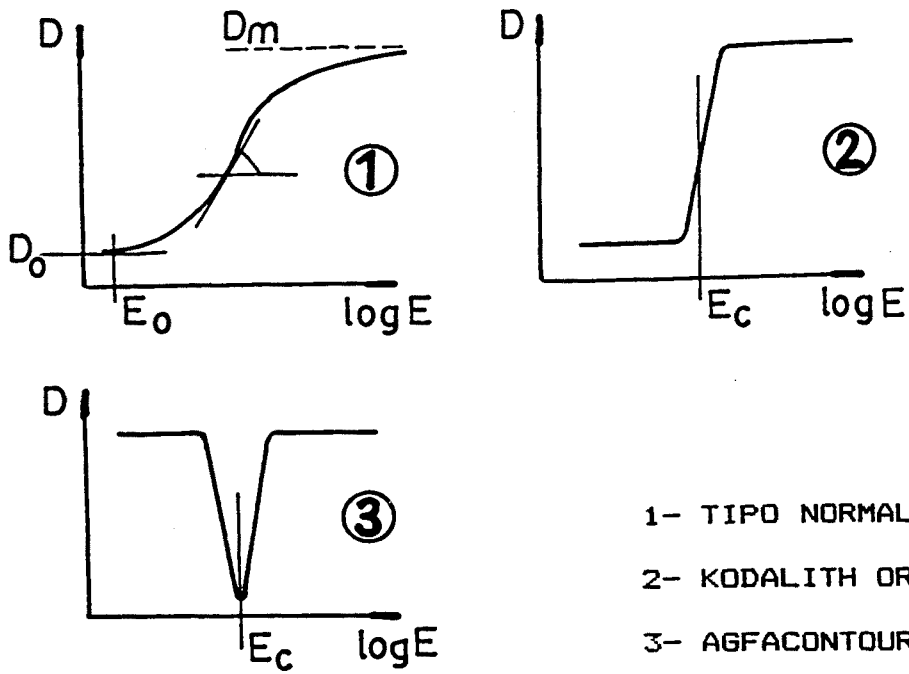
MEDIDA PUNTUAL DE MAGNITUDES :

A. Robert (1969) FRANCIA
I.M. Allison y P. Nurse (1972) INGLATERRA
A. Lagarde y P. Oheix (1972) FRANCIA
A.S. Redner (1974) USA
A.S. Redner y A.S. Voloshin (1987) USA

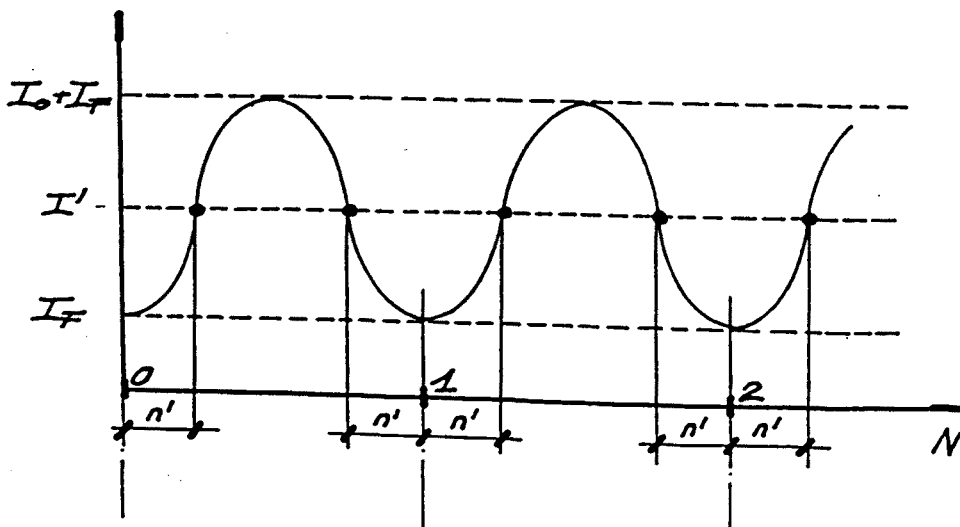
ADQUISICION Y TRATAMIENTO DE IMAGEN :

R.K. Muller y L.R. Saackel (1979) ALEMANIA
Seguchi, Tomita y Watanabe (1979) JAPON
A.S. Voloshin y C.P. Burguer (1983) USA
Umezaki, Tamaki y Takahashis (1984) JAPON
A. Ros Felip (1986) ESPAÑA

A continuación se describen sus principios de medida respectivos.



1-12 Respuesta de las películas fotográficas utilizadas en Fotoelasticidad.



1-13 Doble indeterminación en la asignación del orden entero.

MEDICION CUANTITATIVA MEDIANTE TECNICA FOTOGRAFICA

F.D. Chiang y RP. Khetan (1973)

M.L. Meyer y Mehrotra (1974)

F. Roure (1980)

La intensidad de salida I en un polariscopio circular responde a la ecuación (AII-20), modificada por la influencia de una intensidad real de fondo I_F .

$$I = I_F + I_0 \text{sen}^2 N\pi \quad (1)$$

Existen películas fotográficas con una curva de respuesta singular.

En la Fig.1-12 están detalladas las más utilizadas en Fotoelasticidad.

Es conocido que, siendo E = exposición total, t = tiempo exposición :

$$E = I \times t \quad (2)$$

El ennegrecimiento o densidad D del negativo depende del tipo de película, verificandose en general :

$$D = D_0 + \gamma (\log E - \log E_0) \quad (3)$$

y dónde es γ = cte, o mejor $\gamma = 1$.

Combinando adecuadamente (1) (2) (3) puede formularse una expresión :

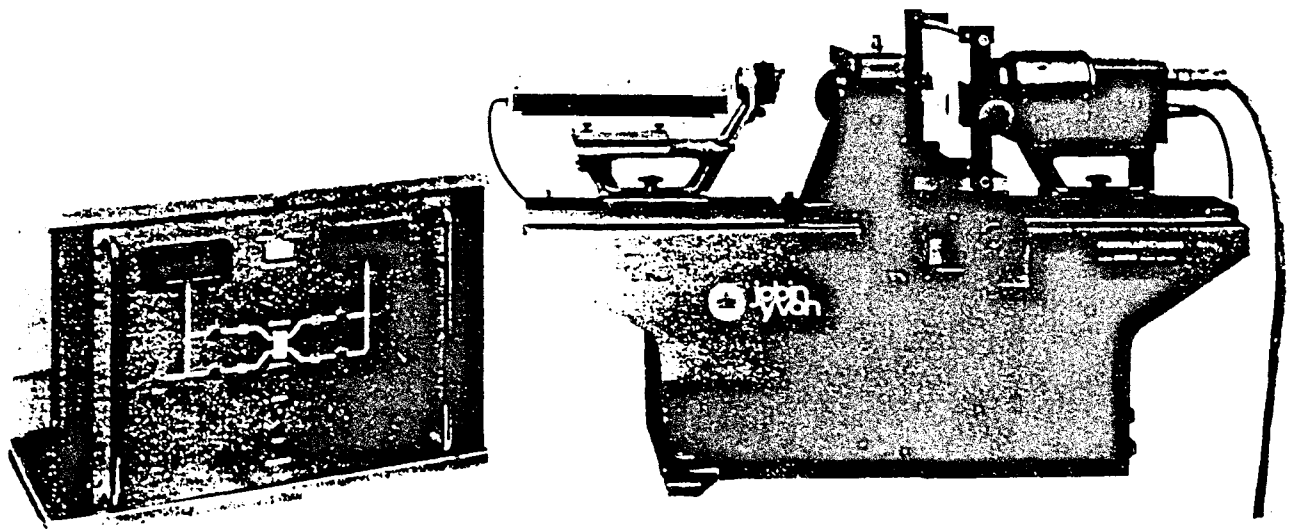
$$n' = \frac{1}{\pi} \text{sen}^{-1} \left[10 \frac{D-D_{\min}}{\gamma} - 1 / 10 \frac{D_{\max}-D_{\min}}{\gamma} - 1 \right]^{1/2}$$

obteniendose el orden fraccionario n' por medida directa mediante densímetro, sobre la película fotográfica.

Evidentemente existirá doble indeterminación (Fig.1-13).

La utilización repetida de KODALITH ORTHO y la exposición de varios negativos sobre una copia en papel permiten obtener trazos de orden fraccionario.

F. Roure [Ref.11], realiza un estudio experimental sobre la posibilidad de efectuar incidencia oblicua en un plano



1-14 Fotoelasticímetro de A. Robert (1969).

arbitrario, llegando a la conclusión que para desviaciones inferiores a $+15^\circ$ respecto a las direcciones principales, los errores pueden considerarse admisibles. Por tanto, una triple incidencia a 0° , $+30^\circ$ y -30° puede ser suficiente si se discrimina adecuadamente la información a partir del registro previo de isoclinas.

Asimismo detecta una interferencia en la extinción simultánea de isoclinas e isocromáticas.

POLARISCOPIO SEMIAUTOMATICO PUNTUAL POR MEDIDA DE DESFASES

A. Robert (1969)

Utiliza un laser de He-Ne 632.8 nm (Fig.1-14) como fuente de luz monocroma, con un diámetro de 0.1 mm y una salida ya polarizada del haz. Una lámina L/4 lo cambia a polarización circular. Atraviesa el modelo y antes de incidir en el foto multiplicador se intercala otra lámina L/4 fija y un analizador giratorio a $\Omega = 200$ v/seg. [Ref.24].

La amplitud medida tiene una expresión:

$$I = I_0 + I_0 \sin \phi \cos 2(\Omega t - \alpha)$$

Que comparada con una señal de referencia coincidente con el giro del motor, proporciona los valores de:

$$\sin \phi \quad ; \quad 2\alpha$$

correspondientes a la amplitud y la fase respectivamente.

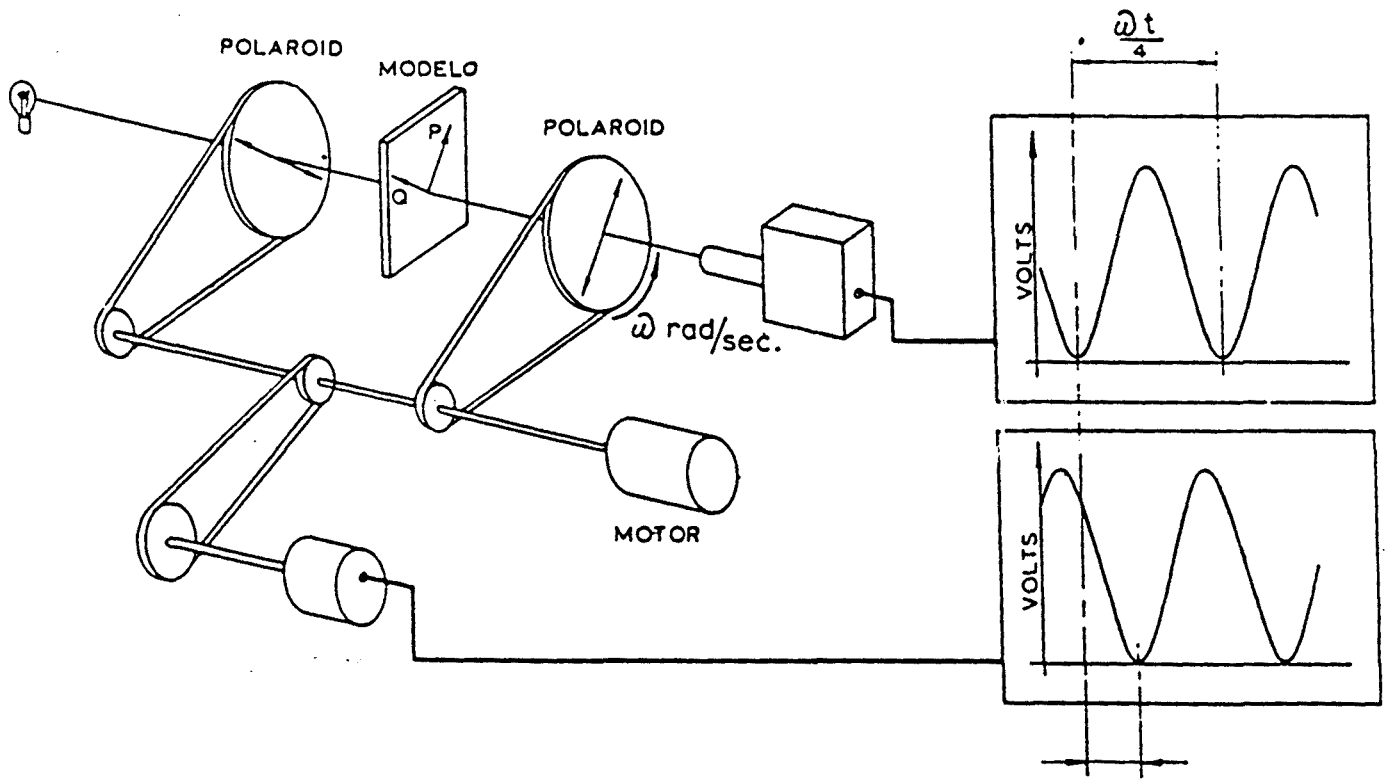
Valores que, aplicando la teoría de la Esfera de Poincare, permiten determinar el retardo relativo angular y el ángulo de isoclina respecto a la tensión principal mayor.

El método de la Diferencia de Esfuerzos Cortantes es utilizado para la obtención del tercer dato fotoelástico, operando manualmente sobre una malla regular.

Diferentes versiones del banco fotoelástico de A. Robert fueron comercializadas por la empresa Jobin-Yvon.

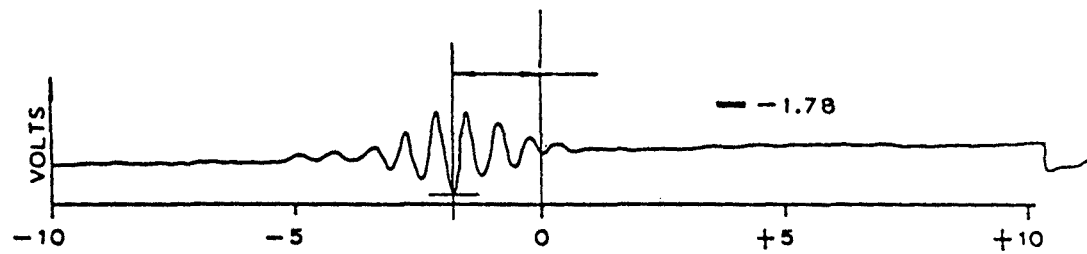
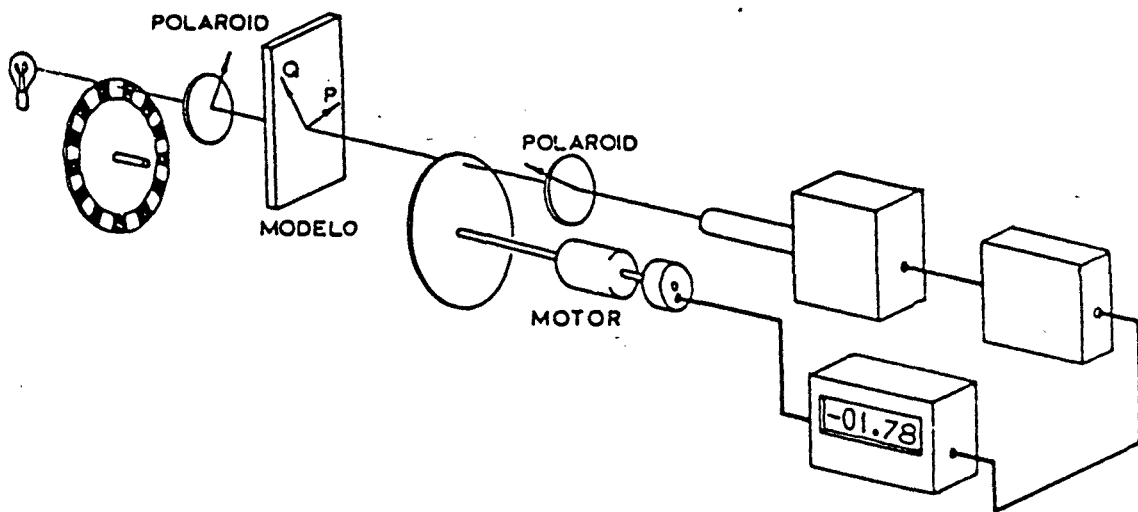
La resolución obtenida es :

Orden fraccionario 1/1000 n
Precisión angular 0.5 °



1-15a

Determinación del ángulo de isoclina, Allison (1972).



1-15b

Cálculo del orden absoluto de isocromática, Allison (1972).

POLARISCOPIO PUNTUAL AUTOMATIZADO (I)

Allison I.M. y Nurse P. (1972)

Realiza un barrido mecánico del modelo, almacenando en un microordenador las coordenadas del punto, el ángulo de isoclina y el orden absoluto de franja. (Fig.1-15a).

Posteriormente por aplicación del método de la diferencia de esfuerzos cortantes determina la distribución de tensiones sobre una sección. [Ref.26].

El principio de medida del ángulo de isoclina, se basa en la evaluación de un desfase . La señal suministrada por la fotocelula es :

$$V' = V'_{\max.} (1 - \cos 4 \Omega t)$$

mientras que el generador sinusoidal nos proporciona :

$$V = V_{\max.} (1 - \cos 4 (\Omega t - \beta))$$

Al trabajar con luz blanca no aparecen franjas isocromáticas de intensidad luminosa nula, que nos anulen la medida.

El cálculo del desfase relativo entre la componente alterna de ambas señales nos proporciona β , ángulo de isoclina.

El principio de medida del orden de extinción es particularmente original. Un disco bicolor, (verde/rojo) con zonas alternas, gira a gran velocidad. El disco compensador tiene una birrefringencia variable de -10 a +10. La fotocelula registra una función a su salida, que es producto de la rotación del compensador, del tipo :

$$V'' = V''_{\max} \left(1 - \cos \frac{K_r + K_v}{2} (n_m + n_o - K\phi) \cos \frac{K_r + K_v}{2} (n_m + n_o + K\phi) \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} K_r \\ K_v \end{array} \right\} \text{Sensibilidad fotoelastica del modelo} \left\{ \begin{array}{l} \text{rojo} \\ \text{verde} \end{array} \right.$$

La detección del mínimo de dicha función (Fig.1-15b) proporciona el orden de extinción total en el punto.

Los autores no especifican los detalles del montaje. Esto provoca que algun investigador cuestione su operatividad [Ref.28]. Así , la rapidez en la respuesta del fotodetector, simultaneamente a la velocidad de rotación del disco bicolor y del "disco compensador", son factores determinantes y que no son descritos con suficiente profundidad.

La principal característica del sistema es su extremada pre

cisión :

Angulo de isocлина + 0.2°
Orden absoluto + 0.01 N=-10 a+10

POLARISCOPIO PUNTUAL AUTOMATIZADO (II)

Lagarde A. y Oheix P. (1973)

Constituye una variante del Polariscopio de A. Robert, en que la incorporación de dos fuentes luminosas diferenciadas con longitud de onda L1 y L2, permiten la obtención del retardo absoluto δ con la condición limitativa :

$$\delta_{\max} \leq \left| \frac{1}{2} \frac{L_1 L_2}{L_1 - L_2} \right| \quad (1)$$

En efecto [Ref.27] [Ref.29], ya que medidos los dos retardos angulares relativos:

$$\phi_1, \phi_2$$

solo existe un retardo absoluto δ que verifique :

$$\begin{cases} \delta = N_1 L_1 + \phi_1 / 2 L_1 \pi \\ \delta = N_2 L_2 + \phi_2 / 2 L_2 \pi \end{cases} \quad N_1, N_2 \quad \text{enteros}$$

siempre que se cumpla la condición descrita (1).

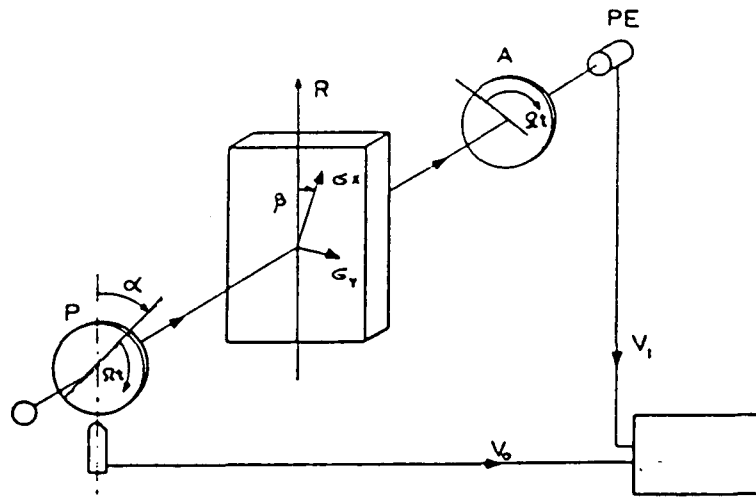
El montaje obliga a trabajar con láminas L/4. La conocida problemática de su respuesta espectral es solucionada construyendo una lámina acromática mediante la yuxtaposición de una placa traccionada σ_r y otra comprimida σ_c . Es obligado un continuo reajuste del sistema.

Otro método consiste en utilizar un prisma de Fresnel acromático de pequeño diámetro y la técnica de fibras ópticas.

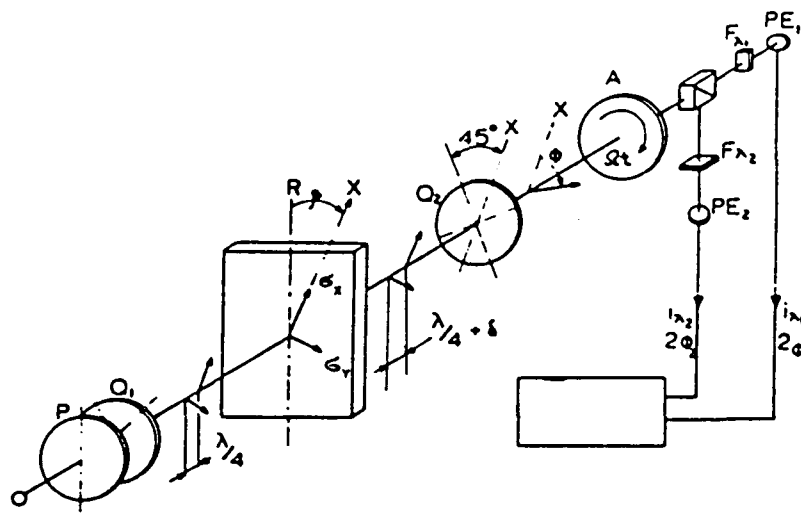
Según sus autores la precisión obtenida es:

Angulo de isocлина $\pm 1^\circ$
Retardo absoluto $\pm 2\%$

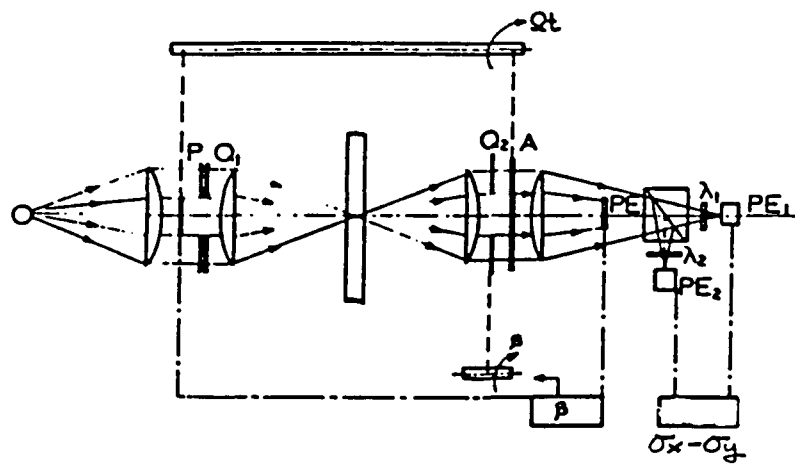
La variación de la Constante Fotoelástica C_r del material según la longitud de onda, es contemplada mediante la introducción de la denominada longitud de onda virtual L^* .



1-16a Medición ángulo de isoclinia, Redner (1974).



1-16b Cálculo orden absoluto de isocromática, Redner (1974).



1-16c Disposición final del conjunto, Redner (1974).

$$\left. \begin{array}{l} C_1 \longrightarrow L_1 \\ C_2 \longrightarrow L_2 \end{array} \right\} \text{Longitud de onda virtual. } L_1^* = \frac{C_2}{C_1} L_1$$

Así:

$$\left. \begin{array}{l} C^* \longrightarrow L_1^* \\ C^* \longrightarrow L_2 \end{array} \right\} \text{Cte. fotoelastica virtual unica. } C^* = C_2$$

POLARISCOPIO PUNTUAL AUTOMATIZADO (III)

S. Redner (1974)

El polariscopio automatizado propuesto por S.Redner [Ref. 28] confirma los principios de medida utilizados por A. Robert y A. Lagarde respectivamente.

Una medición del desfase entre una señal de referencia V_0 y la obtenida en la fotocelula V_1 (Fig.1-16), nos proporciona el ángulo β de isocлина respecto de una de las direcciones principales, inicialmente desconocida y denominada genéricamente α .

$$I = \frac{1}{2} I_0 (1 - \cos 4(\alpha - \beta)) \sin^2 \pi \frac{\delta}{L}$$

Donde al girar $\alpha = \Omega t$

y al ser cte. el valor del retardo δ en el punto, la señal queda :

$$V_1 = V_{1\max} \cos 4(\Omega t - \beta) \sin^2 \pi \frac{\delta}{L}$$

que comparada con la señal eléctrica de referencia :

$$V_0 = V_{0\max} \cos 4 \Omega t$$

nos proporciona β .

Es por tanto exactamente el mismo principio de medida utilizado por los citados investigadores.

La Fig.1-16b esquematiza la obtención del retardo absolu-

to δ , mediante la descomposición y análisis del desfase angular con dos longitudes de onda L_1 y L_2 . Basicamente es el método Lagarde - Oheix, ya comentado, pero existiendo un posicionado previo de la segunda lámina $L/4$ a 45° de las direcciones principales, con la información ya conocida de . El posicionado se realiza con servomotor. Así :

$$2 (\phi_1 - \phi_2) = 2 \pi e (\sigma_x - \sigma_y) \left[\frac{C_1}{L_1} - \frac{C_2}{L_2} \right]$$

El signo de $(\phi_1 - \phi_2)$ indica la dirección principal mayor σ_x ó σ_y .

La Fig.1-16c muestra la disposición conjunta del Polariscopio.

No se cuestiona la falta de acromaticidad de las láminas $L/4$, como factor de error en el proceso.

ANALISIS DE LA IMAGEN DIGITALIZADA CON CAMARA TRC

Müller y Saackel (1979)

R.K Müller y L.R Saackel de la Universidad de Stuttgart [Ref.31] descubren las amplias posibilidades del tratamiento de imagen aplicado al análisis de espectros fotoelásticos.

Por primera vez es utilizada la adquisición y digitalización de la imagen fotoelástica. Con una cámara TRC tipo Vidicon y un equipo conversor A/D, la imagen queda almacenada en 256 niveles de gris y una resolución de 512×320 pixels

En la Fig.1-17 puede observarse la disposición del equipo base.

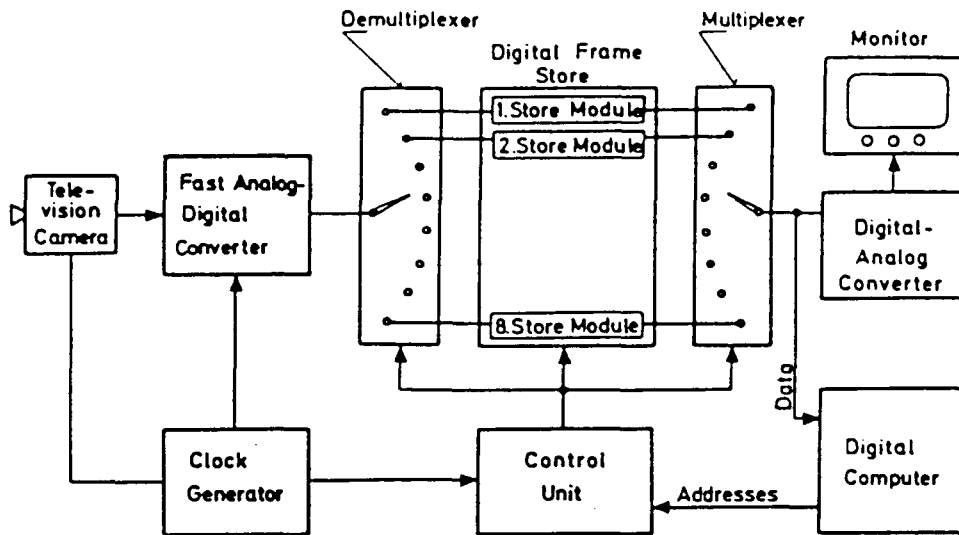
Como curiosidad tecnológica, el almacenado en memoria RAM 256 KB tenía un consumo de 60 A. a baja tensión.

Los investigadores desarrollan unos algoritmos básicos para el afinado de franjas isocromáticas sin pérdida de continuidad en las mismas.

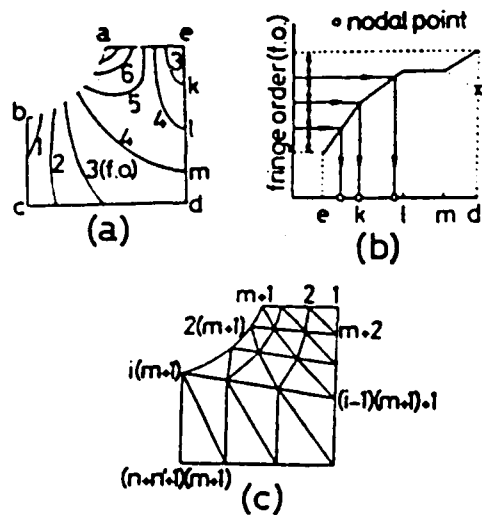
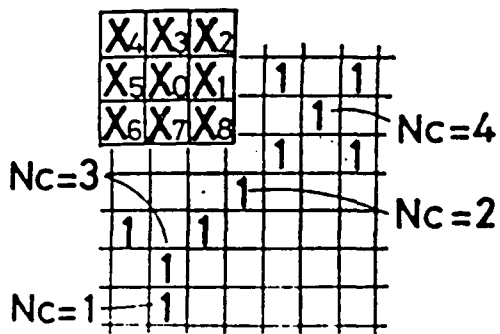
Debe asignarse manualmente el orden de isocromática para las líneas resultantes. Los valores del retardo en puntos intermedios son obtenidos mediante interpolación.

Para el ángulo de isoclina se sigue la misma metodología.

El necesario tercer dato, puede obtenerse por aplicación de la ecuación de Laplace.



1-17 Equipo de adquisición de imagen, Muller y Saackel (1979).



1-18 Metodo CAFRAN (1979).

ANALISIS DE FRANJAS MEDIANTE TRATAMIENTO DE IMAGEN

Seguchi T, Tomita T y Watarabe M. CAFRAN (1979)

Umezarci E, Tamarci T y Takahashis (1984)

Ros Felip A. (1986)

El método " Computer Aided FRinge-pattern ANalyzer " CAFRAN [Ref.32], consiste en el registro y almacenado de isocromáticas e isoclinas y la identificación manual de cada una de ellas.

Mediante cámara de alta definición TCR tipo Vidicon, con una digitización en 64 niveles y una resolución de 512x1024 pixels, se adquiere la imagen y se almacena en memoria tipo RAM.

Se realiza una multiplicación de franjas y un suavizado de la imagen.

Para la extracción del contorno es conveniente una lámina negra exterior al modelo.

Se procede a un binarizado con dos niveles 0 y 1 a partir de un cierto umbral T_0 .

Para cada pixel perteneciente al modelo se aplica un original operador de conexión N_c : (Fig.1-18).

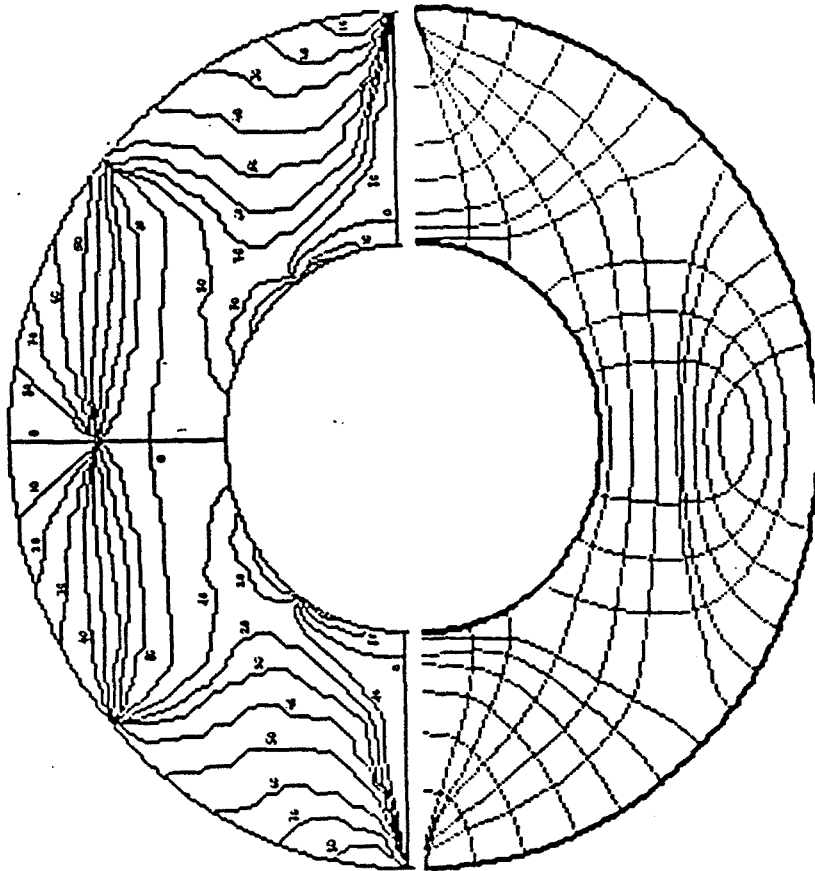
$$N_c = \sum_{k=1,3,5,7} (\bar{x}_k - \bar{x}_{k-1} \bar{x}_{k-2}) \begin{cases} x_i = 0 \text{ o } 1 \\ \bar{x}_i = 1 - x_i \end{cases}$$

resultando que:

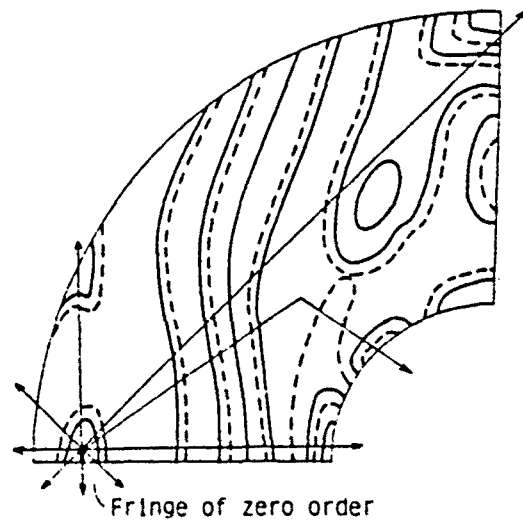
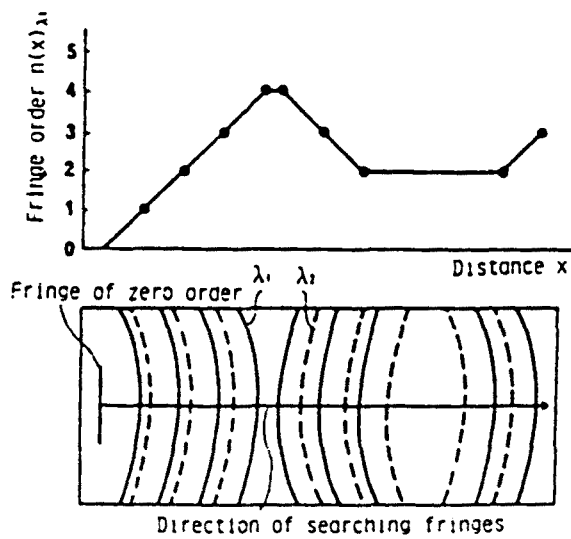
$N_c = 1$	pixel extremo de franja
$N_c = 2$	pixel continuidad de franja
$N_c = 3$	pixel intersección
$N_c = 4$	pixel bifurcación

Su aplicación a través de un algoritmo permite el afinado de las franjas y su identificación. Posteriormente es necesaria una asignación manual del retardo absoluto o ángulo de isoclina correspondiente a cada una de ellas.

Para la obtención del tercer dato, se recurre a la ecuación de Laplace, definiendo manualmente las condiciones de contorno y aplicando el método de Elementos Finitos en su modo Variacional.



1-19 Obtención de isostáticas a partir del registro experimental de isoclinas, Ros Felip (1986).



1-20 Reconocimiento inteligente del orden entero de franja, Umezaki (1984).

El mallado se realiza en dos etapas:

- A- Manualmente se definen subdominios (Fig.1-18) con sus nodos de enlace ubicados en las franjas registradas. Este último aspecto no es siempre posible.
- B- Automáticamente se realiza un mallado del subdominio. Así, la densidad de isocromáticas nos define el grado de discretización del mismo.

Ros Felip [Ref.13] con cámara CCD digitaliza la imagen en 256 niveles y una resolución de 320 x 200 pixels. Para el afinado y registro de franjas utiliza el método CAFRAN con algunas modificaciones.

Obtiene el trazado de isostáticas [Fig.1-19] a partir de las isóclinas mediante el método de Euler adaptado.

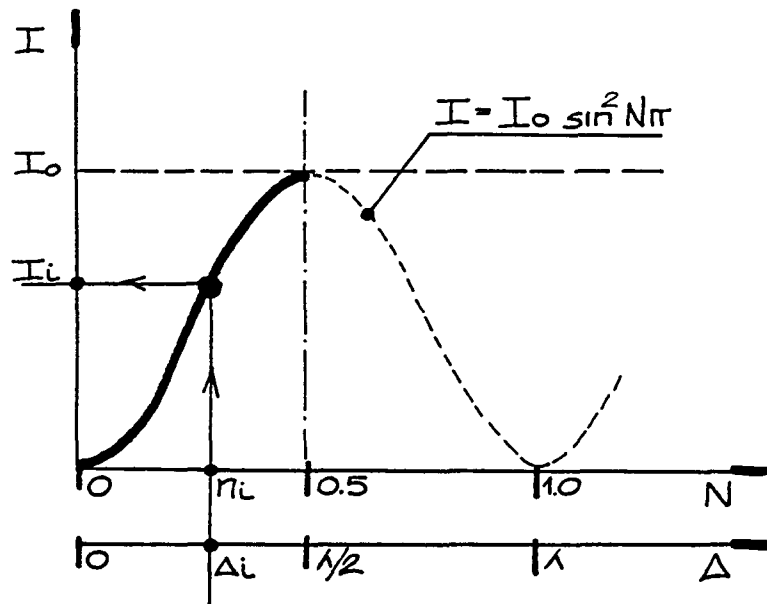
Utiliza la integración de la ecuación de Laplace para la obtención del necesario tercer dato.

Refinamientos en análisis de franjas son utilizados por Umezaki y colaboradores [Ref.38]. La imagen se adquiere con cámara TCR, y digitiza en 16 niveles y 256 x 256 pixels.

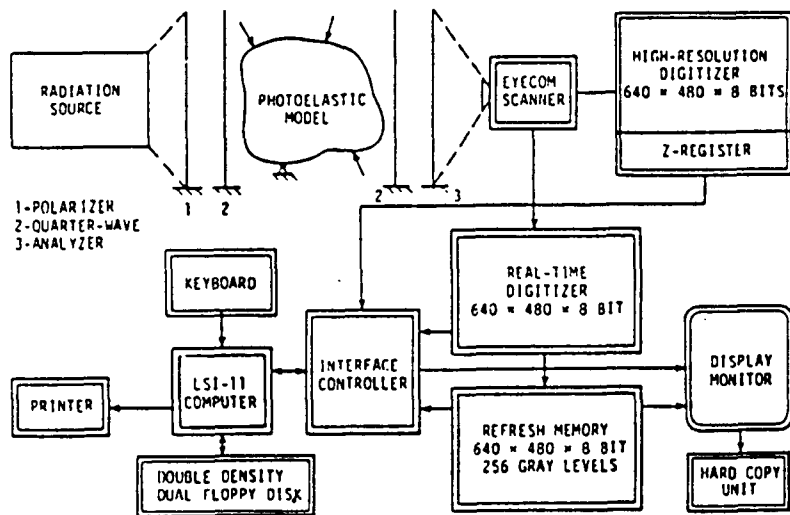
Se emplea la siguiente metodología :

- a) Mediante el análisis del histograma de intensidades se procede a la extracción de las franjas $N/2-0.25$ para una longitud de onda $L1$ "objeto" y para otra $L2$ "referencia" :
$$L2 > L1$$
- b) Superponiendo dos registros obtenidos con orden entero de franja existirá simultaneidad solamente en el orden cero $N=0$, discriminándose así las mismas para toda la pieza.
- c) Se condensan en una sola imagen las franjas $N=0$ y las $N/2-0.25$. Mediante diferentes recorridos arbitrarios por el modelo [Fig.1-20], y comparando la secuencia de aparición de franjas para $L1$ y $L2$, puede determinarse el crecimiento o descenso en el retardo y por tanto su valor absoluto. Debe partirse siempre de un punto inicial donde $N=0$.

Las condiciones de contorno son introducidas manualmente y las cargas exteriores son evaluadas mediante película sensible a la presión de contacto "Prescale" de Fuji Film Co.



1-21 Zona de trabajo biunívoca en el metodo Half-Fringe.
Voloshin y Burguer (1985).



1-22

Diagrama del equipo utilizado por el metodo Half-Fringe.



METODO HALF-FRINGE

A.S. Voloshin y C.P. Burguer (1983)

M. Mojtahed y L.W. Zachary (1987)

Este método, denominado por sus autores "Half-Fringe Photoelasticity" (HFP), consiste en trabajar en la zona de baja birrefringencia del material imponiendo que el retardo δ existente en el modelo no sobrepase el valor de media franja. [Ref.33]. Así:

$$N = \frac{\delta}{L} \leq 0.5$$

Las ventajas de tipo experimental son evidentes:

- Puede trabajarse con materiales de baja birrefringencia (vidrio, composites, etc.) y en zona de linealidad perfecta.
- Las cargas a aplicar son bajas.
- Las deformaciones de la pieza son despreciables y no introducen así distorsión con el movimiento de la carga o en la geometría del punto de enlace.

y finalmente a nivel computacional; la solución del retardo absoluto es biunívoca en función de la intensidad luminosa.

En efecto, para un polariscopio circular la intensidad de iluminación según (AII-20 y 21) :

$$\left\{ \begin{array}{ll} I = I_0 \sin^2 N\pi & \text{Campo oscuro} \\ I = I_0 \cos^2 N\pi & \text{Campo claro} \end{array} \right. \quad (1)$$

Por tanto dado un valor de I puede obtenerse N (Fig.1-21) y en consecuencia la diferencia de tensiones :

$$(\sigma_p - \sigma_q) = N \frac{L}{C_\sigma e}$$

El esquema puede observarse en la Fig.1-22. La imagen es adquirida por un TRC tipo Vidicon y digitizada en 256 niveles con una resolución de 480 x 640 pixels.

La calibración de la cámara se realiza con el supuesto de una respuesta teórica del tipo:

$$Z = \psi I^\gamma \quad 0 \leq Z \leq 255 \quad (2)$$

Donde las constantes ψ y γ se obtienen con medidas experimentales. En efecto, combinando (1) y (2):

$$N = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} (AZ^{\gamma/2})$$
$$A = \text{Cte.} = \sqrt{I_0 \psi^{1/\gamma}}$$

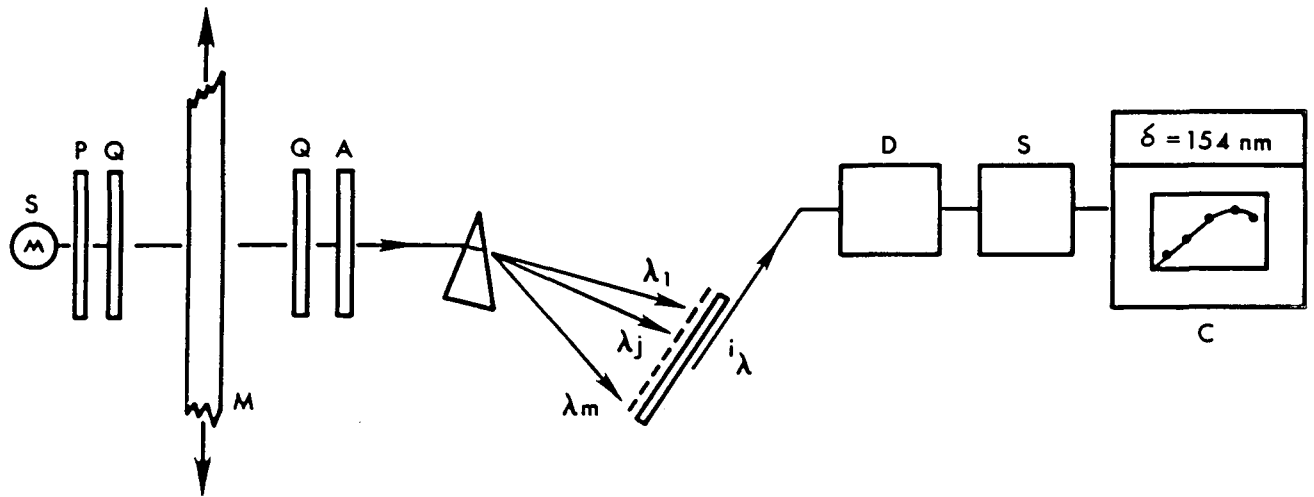
Se utiliza un modelo de vidrio de 6 mm. trabajando a flexión pura, donde por comparación entre el orden de franja N medido por el método de Tardy y la lectura de nivel Z , se obtienen las ctes A y γ , función de las características de la cámara TRC.

Tanto el ruido óptico como eléctrico se amortiguan con la adquisición y promedio de 16 tomas de imagen.

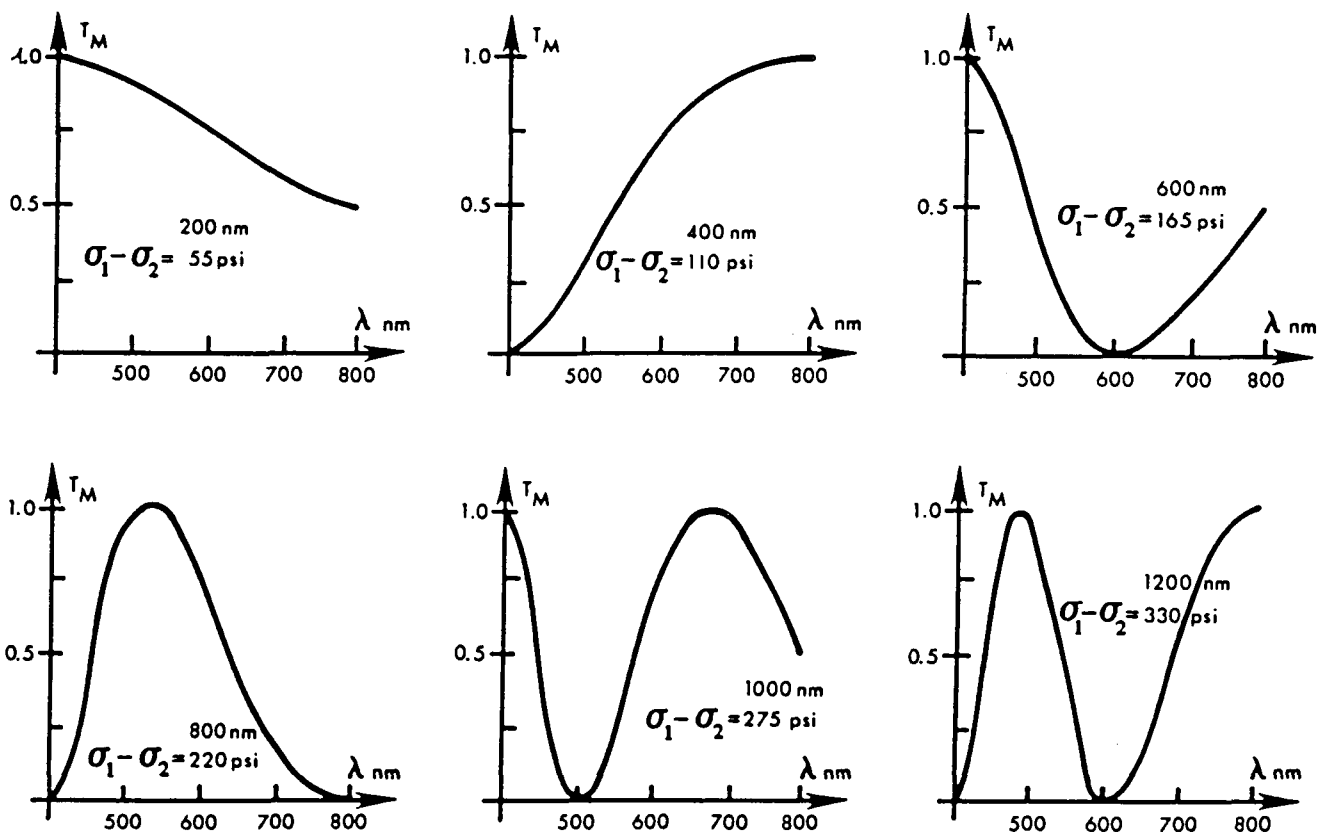
Una aplicación reciente del método es efectuada por Mojthead y Zachary [Ref.42] para la determinación del factor de intensidad de tensiones KI en un material ortotrópico utilizando el sistema HFP.

Se utiliza la resina del composite como material propiamente birrefringente, tal como se ha explicado en el apartado 1.1.

El principal inconveniente reside en que la birrefringencia residual tiene valores del orden de $N= 0.03$ a 0.18 . Como el método HFP solo permite trabajar hasta $N= 0.5$, la precisión del resultado queda seriamente afectado a menos que se tome previamente el valor inicial y de substraiga del mismo.



1-23 Esquema de principio para el polariscopio espectral, de Redner (1985).



1-24 Para un cierto valor δ y $\sigma_1 - \sigma_2$; variación de T_M según la longitud de onda incidente.

METODO DE ANALISIS ESPECTRAL PUNTUAL

A. Redner (1985)

A. Redner y A Voloshin (1987)

Consiste basicamente en la separación espectral del haz puntual a la salida de un polariscopio circular mediante un prisma y proyectarlo sobre un array de fotodiodos. En el se procede a la lectura de intensidad luminosa según su longitud de onda y mediante un cálculo iterativo a la obtención del retardo absoluto [Ref.39].

La Fig.1-23 contiene el esquema de principio. Se realiza un barrido del modelo, punto a punto, mediante un estrecho haz luminoso o con un dispositivo de fibras ópticas acopladas a un brazo giratorio [Ref.40].

La intensidad emergente en un polariscopio circular (AII-20) puede expresarse:

$$I(L) = I_s(L) T(L) \sin^2 \pi \frac{\delta}{L}$$

La corriente $i(L)$ medida por un fotodiodo será :

$$i(L) = \left[\overbrace{D(L) I_s(L) T(L)}^{S(L)} \right] \sin^2 \pi \frac{\delta}{L} \quad (1)$$

donde :

- $I_s(L)$ Intensidad inicial para una cierta L_i .
- $T(L)$ Transmisión Polarizadores, L/4 ,lentes, etc..
- $D(L)$ Respuesta del fotodiodo
- $S(L)$ Factor de corrección espectral total

Y si denominamos a $T_M(\delta, L)$ "Retardo dependiente de L" :

$$T_M(\delta, L) = \sin^2 \pi \frac{\delta}{L}$$

La expresión (1) queda :

$$T_M(\delta, L) = \frac{i(L)}{S(L)}$$

La calibración viene limitada al cálculo del factor S(L) englobando: la intensidad de luz, la corriente e intensidad de fondo, la eficiencia polarizadora, la linealidad, etc...

La obtención del retardo X buscado, se realiza planteando para las m longitudes de onda las m ecuaciones :

$$\operatorname{sen}^2 \frac{\pi X}{L_j} - T_M(\delta, L_j) = 0 \quad 1 < j < m \quad X = \delta_{\text{solucion}} \quad (2)$$

donde es utilizado el método del error mínimo E(X) para su resolución :

$$E(X) = \sum_{j=1}^m \left| \operatorname{sen}^2 \pi \frac{X}{L_j} - T_M(\delta, L_j) \right| \longrightarrow \text{Mínimo} \quad (3)$$

Para la selección de Lj, Redner recomienda trabajar como mínimo con 6 longitudes de onda en espectro de Δδ = 300 nm. El número de elementos de un array de fotodiodos comercial acostumbra a tener mayor cantidad que la indicada.

Otro aspecto importante lo constituye la defectuosa polarización circular cuando la lámina L/4 trabaja fuera de su estrecho espectro de diseño. Redner propone la siguiente corrección a incorporar en las ecuaciones (2) :

$$T_M(\delta, L_j) = \operatorname{sen}^2 \pi \frac{\delta}{L_j} (1 - \operatorname{sen}^2 2\Psi \operatorname{sen}^2 e_0)$$

Ψ ... Orientación relativa entre el eje de L/4 y las direcciones principales.

e0 ... Cte de error.

Si se desconoce Ψ para cada punto, como máximo el error cometido será :

$$\Psi = 22.5^\circ \longrightarrow \operatorname{sen}^2 2\Psi = 0.5$$

y puede tomarse dicho valor o su promedio.

Ultimamente , A. Redner en colaboración con A. Voloshin [Ref.41] (Conferencia Anual del SEM junio 1987) han integrado en la formulación de la ecuación (3) los efectos espectrales de las láminas L/4 y la variación de la constante fotoelástica C_σ .

También han hecho una valoración de diferentes resoluciones posibles de la citada ecuación (3) modificada :

$$E(X) = \sum_{i=1}^m \left| I_i(X) - I_i \right| = \text{Mínimo} \quad (3')$$

donde :

$$I_i(X) = I_o(i) \sum_{L_{i1}}^{L_{i2}} (1 - 0.5 \text{sen}^2 2 e_o) \left(\text{sen}^2 \left(\frac{\pi X C(i)}{L C_\sigma} \right) \right) \Delta L + D(i)$$

D(i) Intensidad de Fondo para el fotodiodo i.

e_o Error para L_i $e_o \leq \frac{\pi}{2} \left(\frac{L_c}{L_i} - 1 \right)$

L_c Longitud de onda característica para las laminas L/4 utilizadas.

C_σ Constante fotoelastica característica.

$L_{i2} - L_{i1} = \Delta L$ Margen espectral de trabajo.

La ecuación (3') es planteada para un array de 16 elementos, es decir se trabaja con 16 longitudes de onda.

La resolución por métodos del tipo Newton-Raphson no son operativos, al ser preciso acotar previamente el intervalo de resolución. Por tanto, se opta por simple verificación de 0 a 5000 nm. con incrementos de 10 nm, y con una elevada duración del proceso de 1-2 seg. para cada uno de los puntos en estudio.

Evidentemente, el principal inconveniente del método es la imposibilidad de obtener el registro de isóclinas y por tanto de completar el análisis fotoelástico en forma automatizada.

**2.0 ADQUISICION DE DATOS
FOTOELASTICOS**

2.0 ADQUISICION DE DATOS FOTOELASTICOS

Como paso previo a todo proceso de automatización fotoelástica, es necesario tomar los datos del ensayo y almacenarlos en un registro informático de fácil acceso. Su posterior manipulación permitirá la extracción de resultados.

La captura de datos fotoelásticos debe basarse en medidas directas o indirectas pero siempre de tipo fotométrico.

A la vista del estado de la cuestión, caben dos variantes a considerar :

- 1º) Barrido ó "Scanner" del modelo fotoelástico mediante un haz puntual. Se podría definir como una técnica local punto a punto.
- 2º) Adquisición de la imagen fotoelástica mediante un equipo integrado de tratamiento de imagen. Por tanto, una técnica de campo completo.

La valoración de ambas conduce a un estudio comparativo de ventajas e inconvenientes.

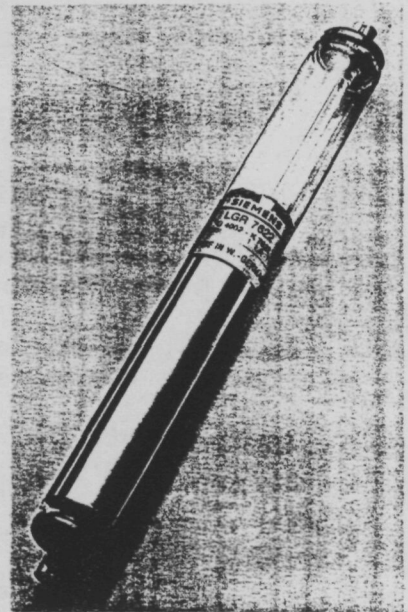
En líneas generales, el barrido puntual es un método más preciso geoméricamente. Mediante la rotación del polarizador ó analizador se consigue la medida directa del ángulo de isoclina y/o el retraso fraccionario sin ambigüedades.

La adquisición de imagen tiene a su favor una gran versatilidad en el montaje del ensayo. Permite trabajar en técnica de reflexión. No obstante, subsisten en actualidad importantes lagunas de tipo teórico en la extracción completa de datos fotoelásticos.

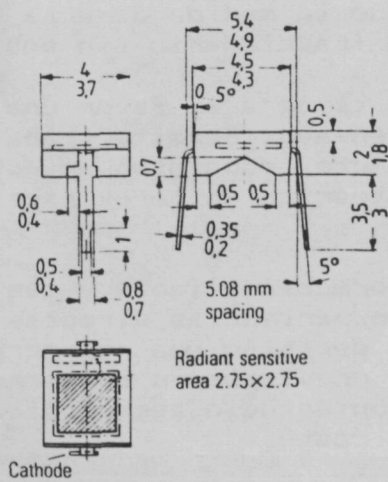
Para disponer de una información fiable y más completa hemos optado por realizar experiencias directas con ambos sistemas. Fue una acertada decisión que nos permitió detectar unos inconvenientes no previstos en el barrido puntual del modelo. Paralelamente un estudio tecnológico del mismo puso de manifiesto su alto coste.

Así, en el primer apartado se describe con detalle el montaje anterior y las conclusiones obtenidas.

En el segundo apartado se trata el tema de la digitalización y tratamiento de imagen frente a un registro fotoelástico.



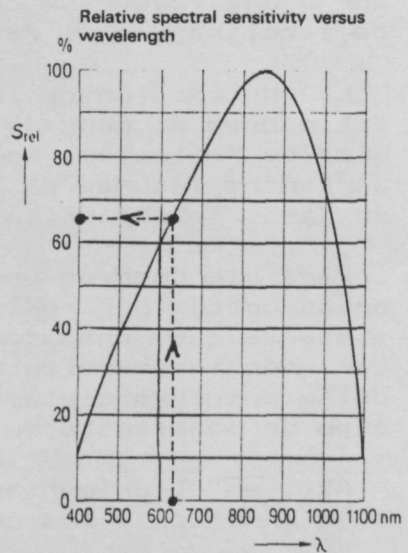
2-1 Laser LGR 7627 Siemens



Radiant sensitive area 2.75×2.75

Cathode

Approx. weight 0.1 g
Dimensions in mm



2-2 Fotodiodo BPW34 Siemens. Respuesta espectral.

2.1 BARRIDO LASER DEL MODELO

En el presente apartado se describe el montaje experimental realizado para determinar la viabilidad de un BFA basado en una incidencia puntual sobre el modelo.

Paralelamente, el Departamento de Proyectos de la ETSEIB bajo la dirección del Prof. D.Audi, desarrolló el prediseño tecnológico basado en un barrido óptico mediante haz Laser, con movimiento y traslación tanto del modelo como del emisor.

Ambos estudios pusieron de manifiesto diferentes inconvenientes técnicos y de coste, que nos decidieron por abandonar nuestra idea original e inclinarnos por un tratamiento digital de la imagen fotoelástica.

MONTAJE EXPERIMENTAL

Como emisor puntual de luz altamente monocromática se utiliza un Laser de Helio-Neón, con las siguientes características principales :

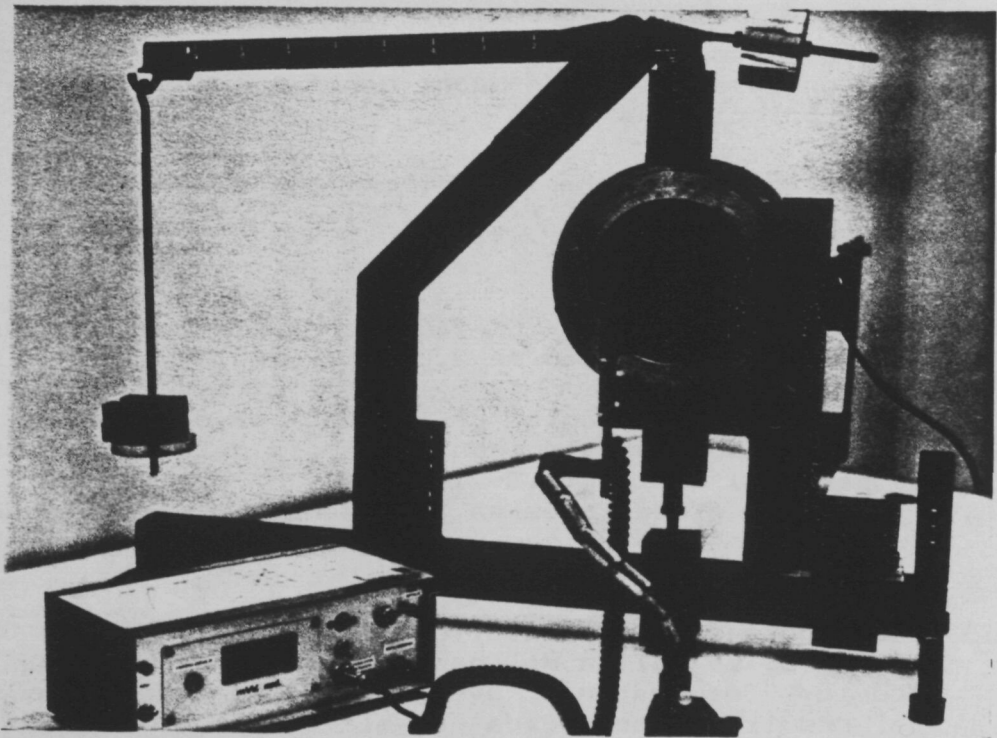
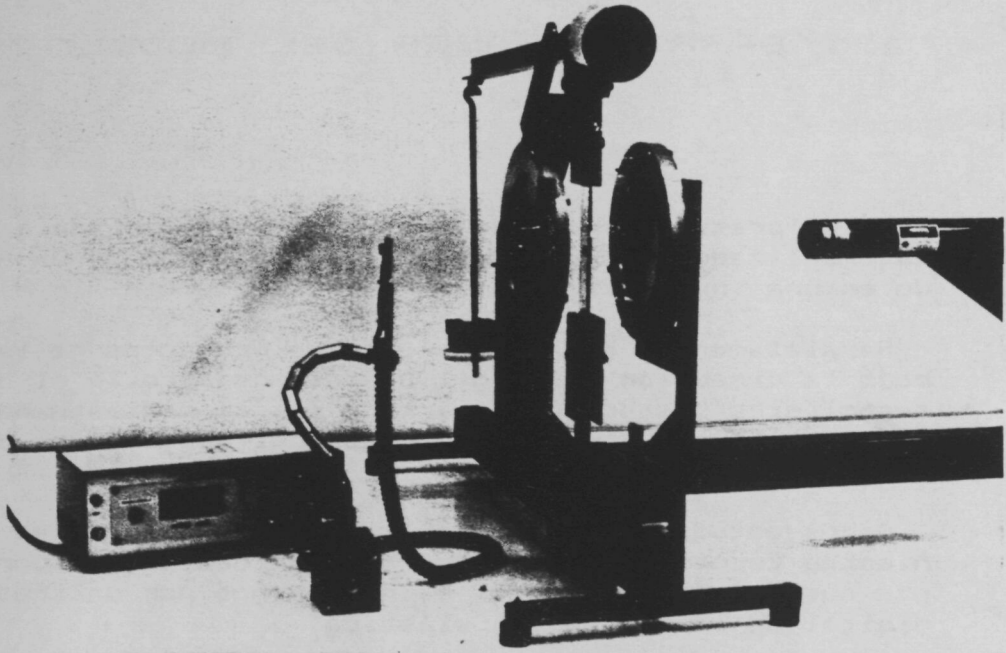
Potencia mínima	5 mW.
Diámetro del haz	0,8 mm.
Emisión	632,8 nm.
Polarización	Random.

Se elige el modelo LGK 7627 marca Siemens, con fuente de AT conmutada LGN 7460 de 2,8 KV y 6mA. (Fig.2-1).

El fotodiodo receptor de la señal es el BPW34 de Siemens, comandado por una electrónica propia del Doctorando diseñada para tal fin. (Fig.2-2).

Tiene unas dimensiones en zona sensible de 2.75 x 2.75 mm., que parecen ser óptimas ya que el diámetro inicial del haz Laser es de 0,8 mm.

El montaje experimental completo puede observarse en la Fig. 2-3. La salida del haz es polarizada e incide sobre el modelo. Después de atravesar la lámina analizadora, la señal resultante es medida por el fotodiodo, situado sobre un soporte regulable, y visualizada su potencia en el instrumento digital.



2-3 Montaje completo del dispositivo experimental.

ANALISIS DE RESULTADOS

El funcionamiento del prototipo experimental puso de relieve unos fenómenos no previstos inicialmente :

1º) Variación temporal del plano de polarización :

La potencia medida por el fotodetector experimenta unas fluctuaciones iniciales, que no desaparecen hasta un tiempo de estabilización en el funcionamiento del Laser superior a 45 minutos.

Estas variaciones no son detectadas en ausencia de lámina polarizadora, lo que implica la existencia de un plano preferente en la emisión Laser, a pesar de las características random del tubo emisor.

Este mismo fenómeno fue comprobado en un Laser He-Ne /2 mW. de Spectra-Physics.

2º) Desviaciones del haz :

Ante la existencia de pequeñas rayaduras o imperfecciones en el modelo, el haz luminoso experimenta desviaciones de importancia en su trayectoria. En algun caso no incide en la superficie del fotodetector, en otros parcialmente.

3º) Reflexiones multiples :

Son consecuencia del imperfecto alineado de los elementos ópticos, comprobándose su caracter critico.

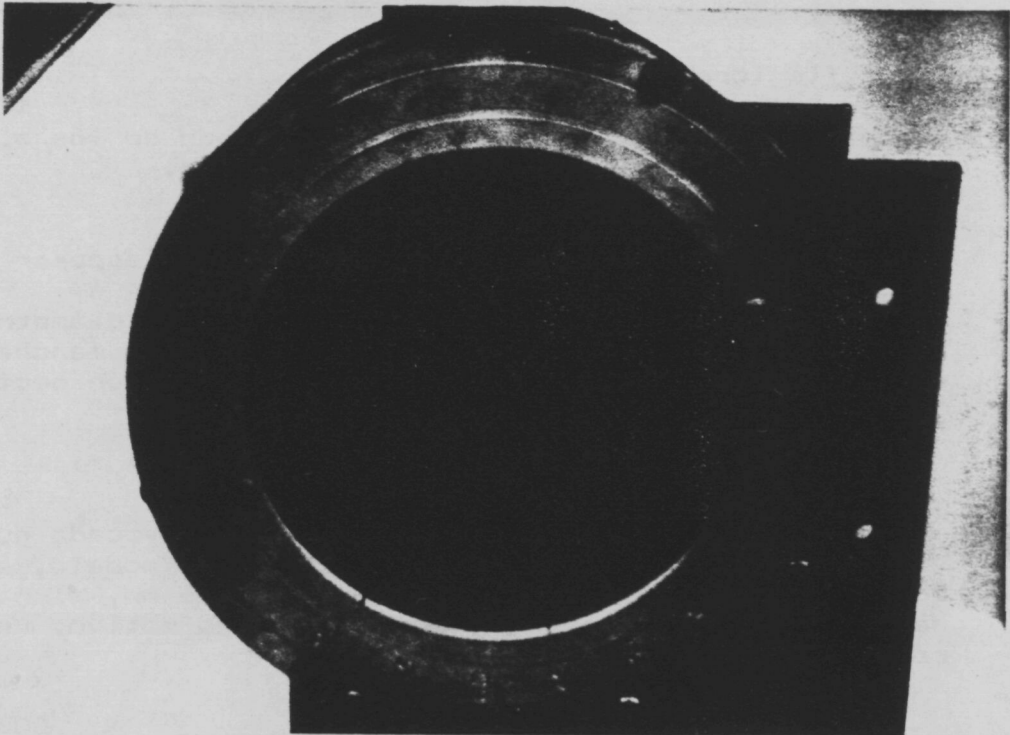
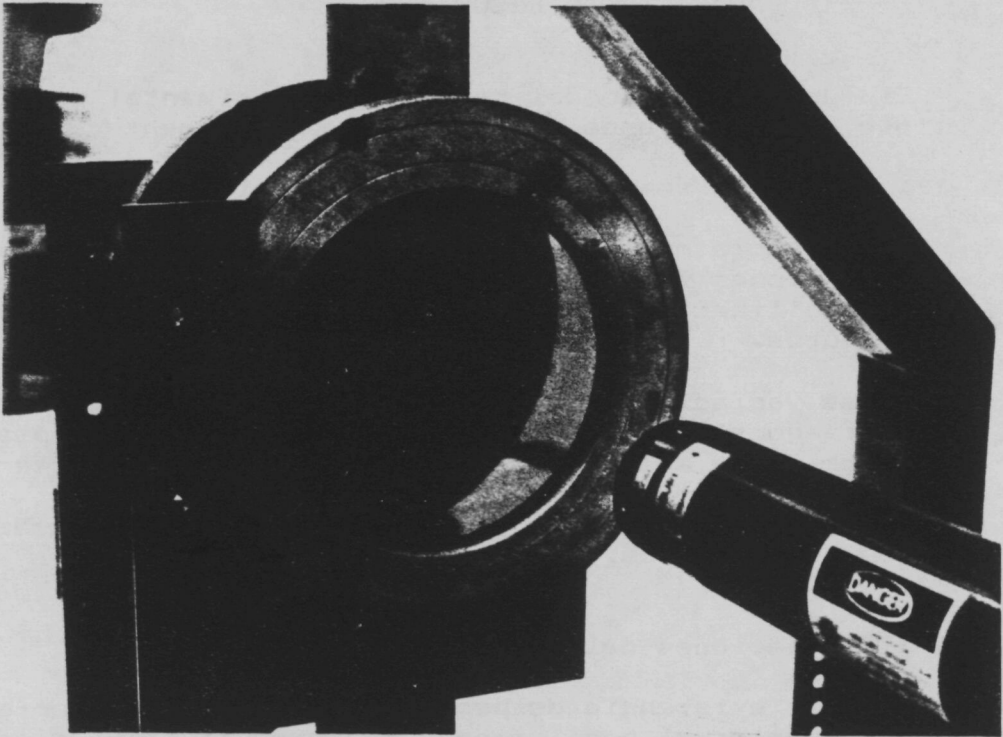
4º) Fenómeno de difusión en modelos de gran espesor :

Para modelos de espesor superior a 5 mm el diámetro efectivo del haz aumenta hasta convertirse en una mancha focal de hasta 4 mm, desapareciendo toda la precisión geométrica.

5º) Perdida de potencia util :

Es debida a la atenuación de la señal provocada por los elementos ópticos : láminas polarizadoras, modelo, etc... Con una potencia efectiva a la salida de 6 mW, el haz incidente en el fotodetector tiene, por dicho motivo, un valor reducido de 1.5 mW.

Todos estos inconvenientes admitirían una corrección o mejora con las siguientes precauciones :



2-4 Reflexiones múltiples.

- Periodo de estabilización previo (45 m.)
 - Modelos de gran perfección.
 - Disminuir el recorrido libre del haz e incidir sobre el modelo con una óptica focalizada.
- En todo caso, quedan descartados los registros fotométricos puros como base de un principio de medida fotoelástico.

CONCLUSIONES DEL PREDISEÑO TECNICO

El estudio tecnológico del BFA mediante barrido mecánico del modelo, puso de manifiesto el alto coste económico del mismo :

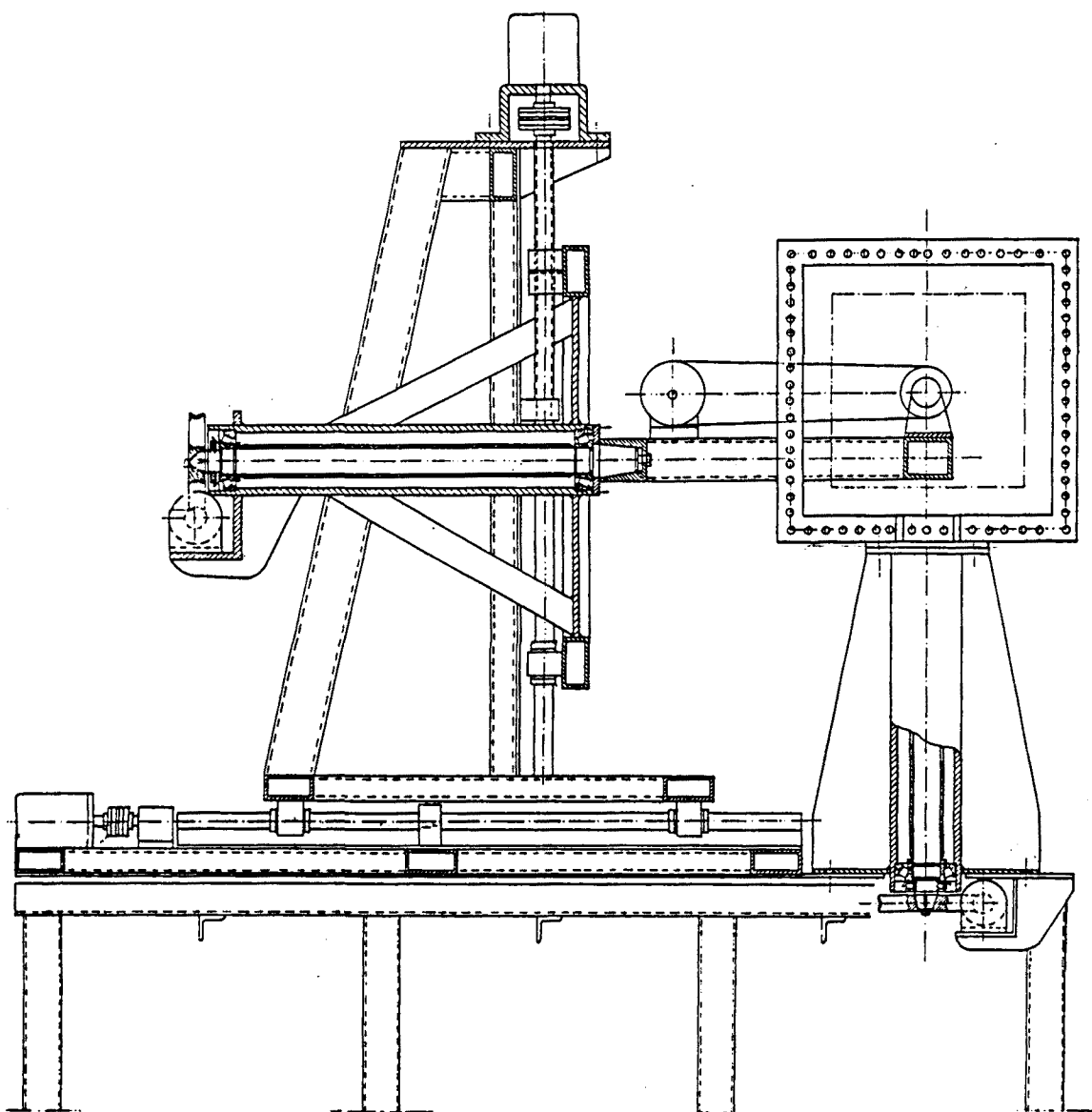
En efecto, son necesarios unos motores de gran precisión y potencia para poder realizar la traslación y rotación del conjunto a una velocidad de trabajo aceptable. La electrónica de control asociada a los mismos debe reunir excelentes características.

La posibilidad de incidencia oblicua sobre una dirección principal obliga a un posicionado complejo del modelo y una rotación simultanea del dispositivo de medida. El estudio de cada punto implica el movimiento sincronizado de todos los elementos.

Para poder calcular el retardo absoluto es necesario trabajar como mínimo con dos longitudes de onda (Apt.1-2). Las fibras ópticas disponibles en actualidad no conservan la polarización, esto implica que los emisores deben moverse necesariamente con el conjunto. Un Laser sintonizable, con la tecnología actual, nos exige un gran volumen y tiene un alto coste. Debe recurrirse a un doble Laser emisor con diferentes longitudes de onda.

En la Fig. 2-5 puede observarse la disposición tecnológica de los elementos y el aspecto final que podría tener un BFA inspirado en estos principios de medida. El marco de cargas debe tener movimiento. Trabajando exclusivamente en tecnica fotoelástica de congelación de tensiones, el problema quedaría parcialmente reducido. Los discos polarizadores y láminas L/4 son de pequeño diámetro con lo cual su rotación mecánica no es compleja. No obstante, para poder tener una visión global del modelo es necesario disponer de un sistema fotoelástico auxiliar de luz difusa.

Finalmente se descartó la opción punto a punto y se eligió la tecnica de tratamiento digital de la imagen como solución optima para el BFA. Los inconvenientes citados no fueron la unica razón que determinaron esta decisión, sino también las altas prestaciones proporcionadas por esta última y que son analizadas en el siguiente apartado .



2-5 Proyecto del BFA con barrido puntual del modelo.

Prof. Sr Daniel Audi. (*)
Prof. Sr Francesc Roure (**)
Prof. Sr Frederic Marimón (**)
Sr A. Roldan (Proyectista) (*)

(*) Departamento de Proyectos en Ingeniería.
(**) Departamento de Resist. de Materiales y Estructuras.
E.T.S. Ingenieros Industriales de Barcelona
Universidad Politecnica de Catalunya.

2.2 DIGITIZACION Y TRATAMIENTO DE IMAGEN

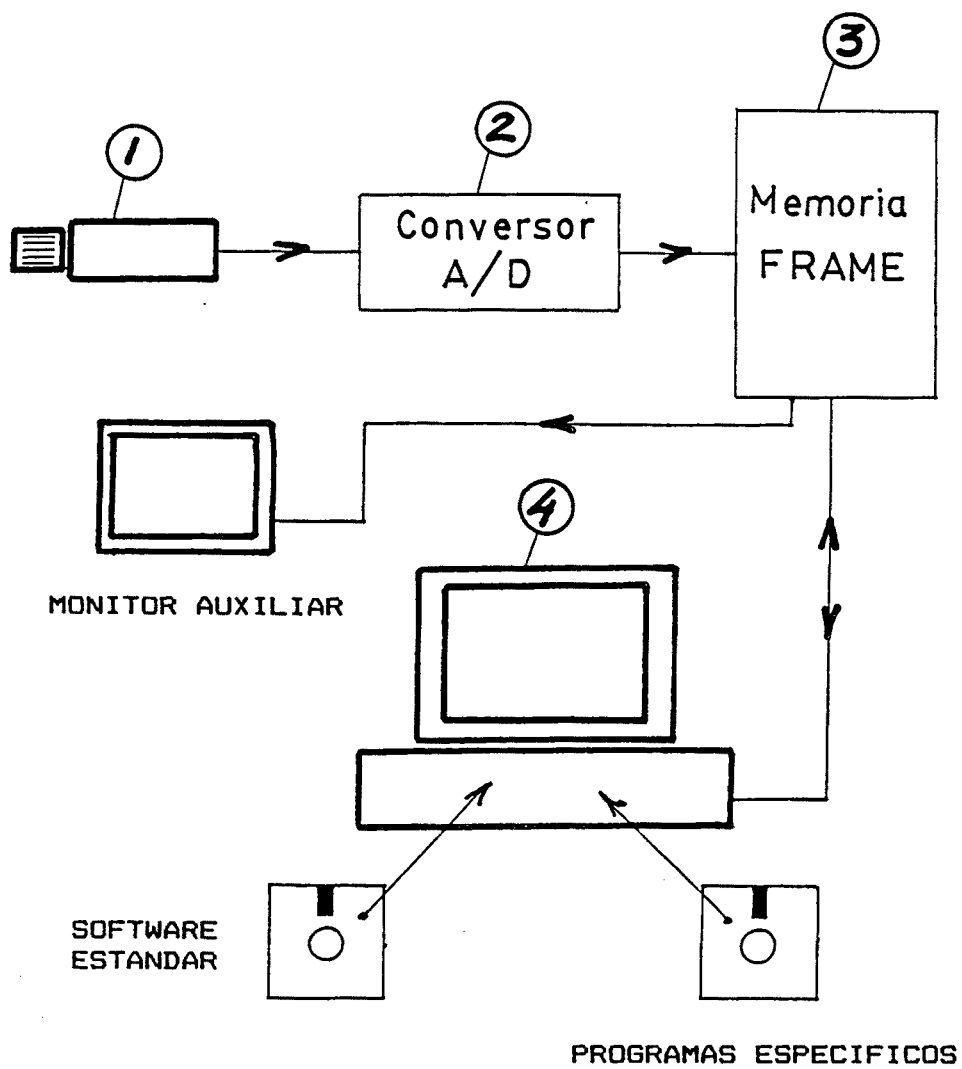
El procesado electrónico de imágenes es una técnica reciente. Fue utilizada en los laboratorios de IBM por primera vez en 1963 para el análisis de fotografías procedentes de satélites artificiales.

Posteriormente, invade campos tan diversos como la Medicina, Topografía o Robótica. En el año 1979, Müller obtiene unos iniciales registros fotoelásticos. (Apt.1.2) [Ref.31]

En la actualidad, la aparición de equipos comerciales de medio coste, adaptados a configuraciones usuales existentes en microordenadores personales, han permitido el acceso a las técnicas de tratamiento de imagen de gran cantidad de usuarios profesionales.

El diagrama de bloques de una cadena de adquisición de imagen y su procesado puede observarse en la Fig 2-6. Las etapas básicas son las siguientes:

- [1] Un sensor de imagen capta la escena o registro objeto de análisis. Para nuestra aplicación este sensor debe ser bidimensional y el actual estado de la tecnología nos decanta por una cámara CCD de estado sólido frente a un convencional tubo de rayos catódicos TCR tipo Vidicon. Una detallada discusión de este importante aspecto se encuentra en el siguiente apartado 2.2.1.
- [2] El conversor analógico-digital transforma la señal de salida generada por la cámara, en una secuencia temporal binaria.
- [3] Esta información digital debe almacenarse en una memoria tipo RAM para su estudio o definitivo registro en soporte magnético u óptico. El gran volumen de datos generados hace aconsejable, en la mayoría de equipos, no utilizar la memoria del microordenador ya que quedaría prácticamente anulada. Así, disponen de una memoria auxiliar interna, configuración denominada tipo Frame.
- [4] La manipulación del registro se realiza usualmente en el microordenador. Las técnicas de tratamiento de imagen estándar proporcionan los algoritmos necesarios para realizar los trabajos rutinarios de eliminación de ruido, suavizado, histogramas de niveles, afinado de franjas, etc...



2-6 Bloques de un equipo de adquisición de imagen.

Cada aplicación tiene unas características concretas.

En Fotoelasticidad, los medios citados no permiten por si solos determinar el estado tensional o deformacional de la pieza.

Es preciso desarrollar algoritmos originales que se adapten a nuestras circunstancias. Su formulación se realiza en el mismo ordenador utilizando un lenguaje compilado de alto nivel, en nuestro caso FORTRAN 77.

En el apartado 2.2.4 estan descritas las características concretas del equipo utilizado en la presente Tesis.

2.2.1 Sensores de imagen

Se revisa sucintamente el principio de funcionamiento de los principales sensores de imagen existentes en actualidad y se comprueba experimentalmente su comportamiento ante los registros fotoelásticos.

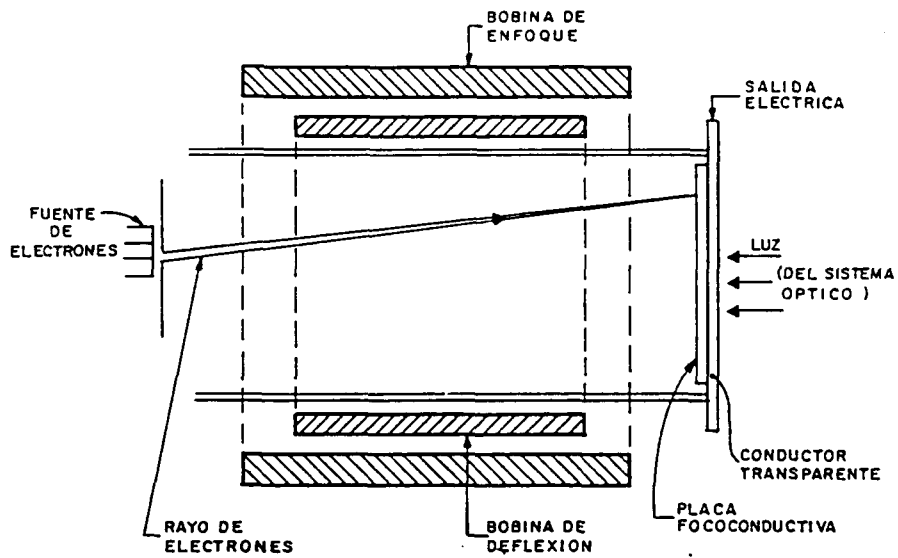
Los captadores de imagen pueden dividirse en dos grandes categorías: lineales y bidimensionales. Los primeros son de estado sólido, mientras que los bidimensionales pueden ser del tipo tubo de rayos catódicos TCR o tambien de estado sólido CCD.

Aunque los sensores lineales presentan unas altas prestaciones, con regletas de hasta 4000 elementos, el registro de una imagen fotoelástica exigiría un barrido mecánico mediante una traslación paralela del sensor lineal. Se ha descartado formalmente esta opción.

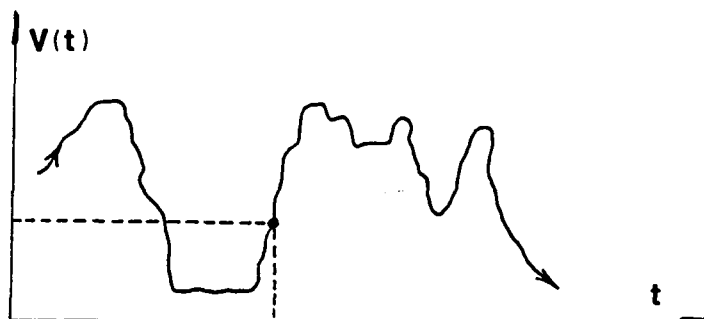
- Tubo TRC Tipo Vidicon

Su principio de funcionamiento simplificado es el siguiente: Mediante una óptica adecuada, se enfoca la imagen sobre la superficie fotoconductor (Fig.2-7) . Su cara opuesta se rastrea con un fino haz de electrones, dirigidos por el campo magnético creado por las bobinas de deflexión. Cuando el haz incide sobre zonas oscuras, los electrones son reflejados y cuando lo hace sobre zonas iluminadas algunos de los mismos pasan a traves del elemento, quedando almacenados en un dispositivo conductor transparente.

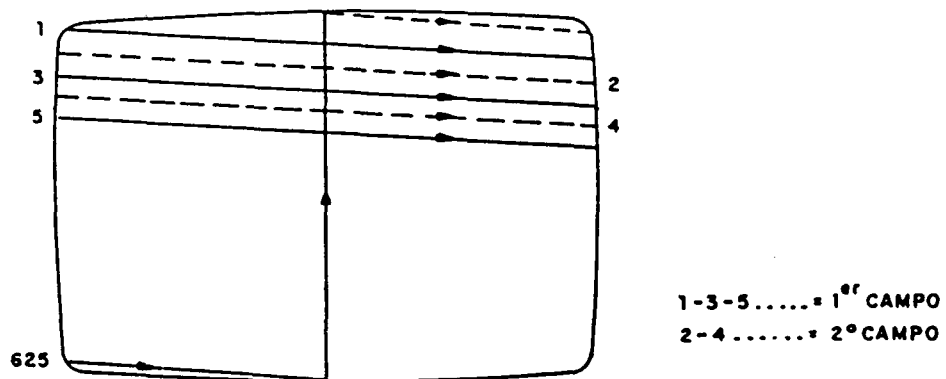
La señal de video se obtiene mediante circuitos electrónicos sincronizados con la exploración del haz. En definitiva



2-7 Cámara de tubo de Rayos Catódicos (TRC) tipo Vidicón.



2-8 Salida analógica TRC Vidicón.



2-9 Norma europea CCIR, 625 líneas entrelazadas por cuadro.

la salida será analógica continua. (Fig.2-8).

Existen otros tipos de cámaras TCR similares al Vidicon, con características mejoradas. Las diferencias radican en la composición química del sensor, lo que repercute en su respuesta espectral, y en la velocidad de incidencia del haz explorador. Rejillas desaceleradoras próximas al target o sensor, evitan la emisión secundaria asociada al impacto.

Como consecuencia del barrido línea a línea de la imagen, se consume un tiempo determinado para su obtención. La norma europea trabaja con 625 líneas por cuadro ó imagen y requiere un total de 1/25 seg. La norma americana es de 525 líneas y tarda 1/30 seg. (Fig.2-9)

- Cámara de estado sólido CCD

Los dispositivos de acoplamiento de carga, notados por las iniciales CCD, están compuestos por integrados de silicio.

El principio en que se basa su funcionamiento es simple :

En cada uno de los elementos de carga, denominados pixels, se acumula una carga eléctrica proporcional a la luz incidente y al periodo de exposición.

Los pixels se sitúan formando una matriz de grandes dimensiones, valores usuales son 125 x 125, 512 x 512 e incluso 1024 x 1024.

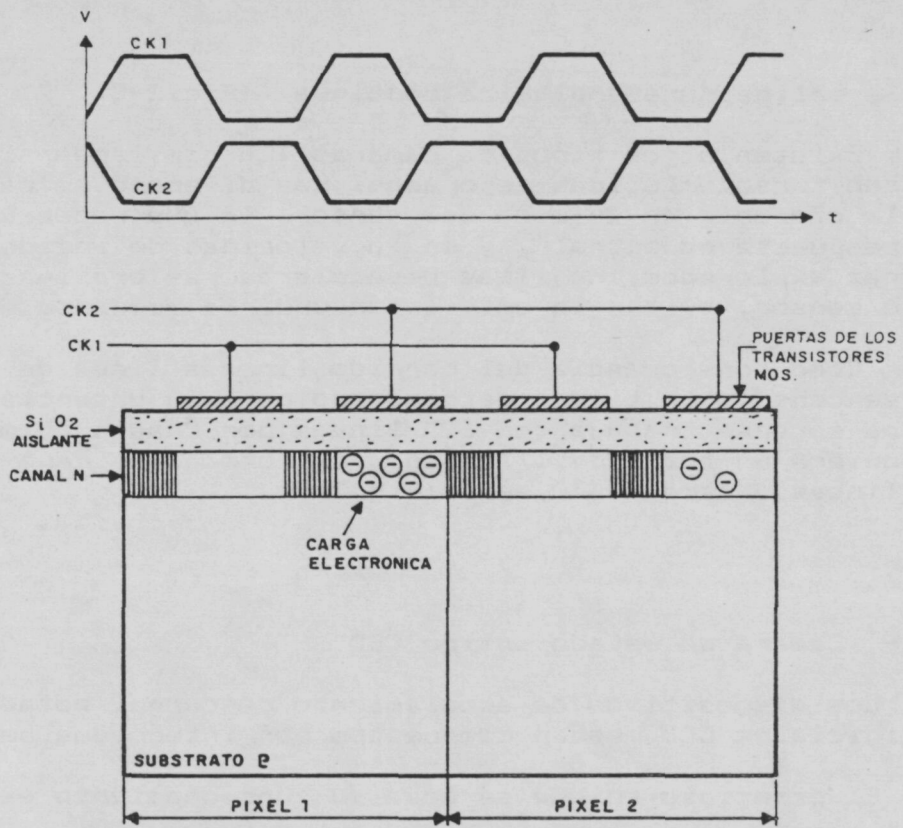
Las tensiones en sus elementos adyacentes (Fig.2-10) se controlan mediante impulsos de reloj, CK1 y CK2, generados por un circuito de control y cuya alternancia provoca la transferencia de cargas de elemento a elemento y finalmente a la compuerta terminal.

Aunque, la señal de salida puede adoptar una forma discreta que evite el muestreo de la misma en el proceso de digitalización, la cámara comercial CCD tiene normalmente una señal siguiendo el estándar de video europeo o americano.

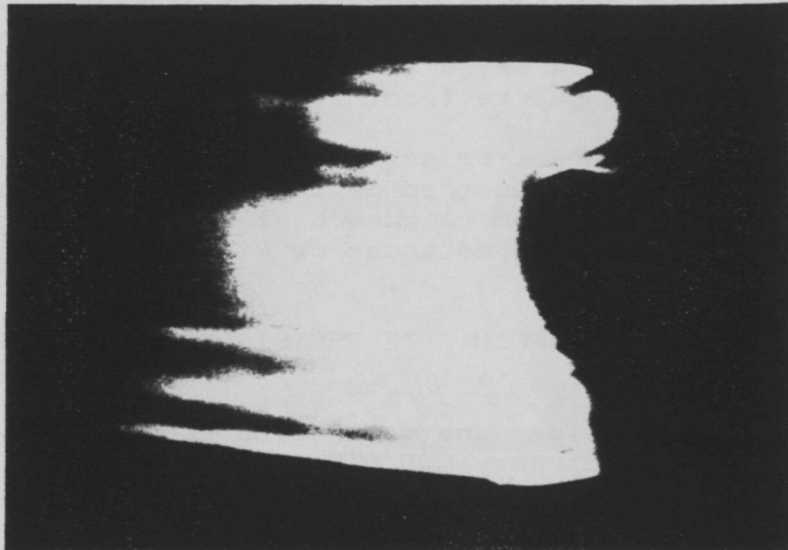
COMPORTAMIENTO ANTE REGISTROS FOTOELASTICOS

Podemos realizar una valoración comparativa entre las cámaras tipo Vidicon y CCD. Las principales características que afectan a la obtención de escenas fotoelásticas son las siguientes :

- Retardo o Persistencia : Es un fenómeno que afecta exclusivamente a las cámaras TCR y que consiste en una permanencia de la imagen anterior. En la Fig.2-11 puede obser



2-10 Estructura básica del dispositivo CCD.

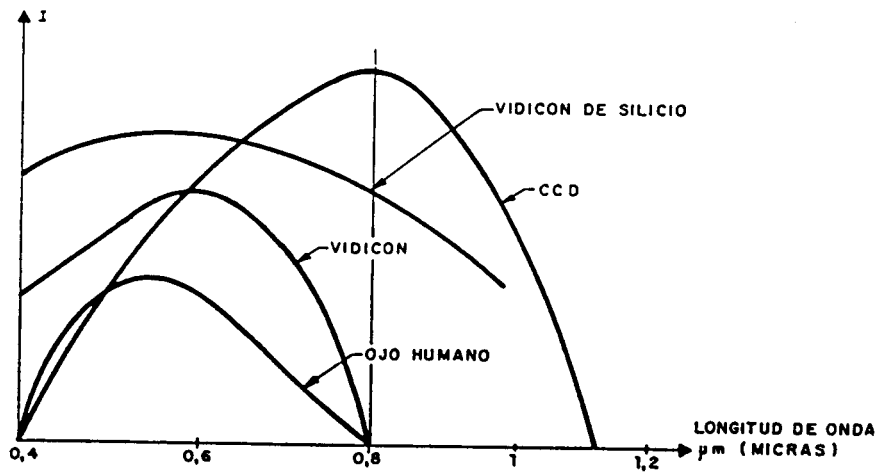


2-11 Efecto de la persistencia en cámaras TRC.

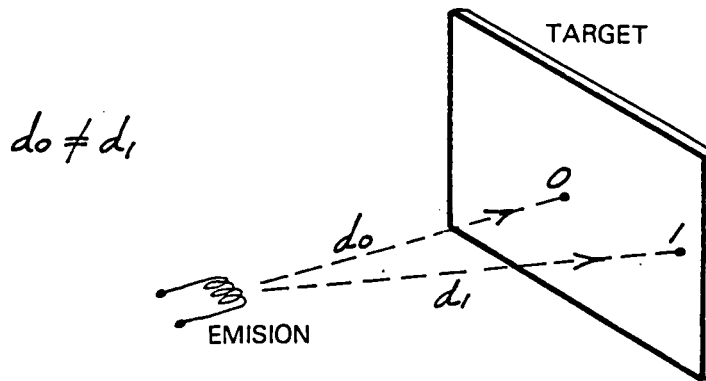
vase este efecto en una imagen fotoelástica.
Las cámaras CCD están exentas practicamente de persisten-
cia.

- Respuesta espectral : Constituye un aspecto básico para su aplicación fotoelástica . Las cámaras TCR tienen su respuesta usual de 400 a 800 nm, similar a la visión humana. Las cámaras de estado sólido CCD presentan sensibilidad incluso en la zona de 1000 nm, propiedad que no interesa para nuestra aplicación. No obstante, dicho inconveniente puede solventarse con un filtro interno de corte en el infrarrojo. (Fig.2-12)
- "Bloomning" o Florecimiento : Aparece cuando se ilumina excesivamente una zona del target, provocando la saturación y un volcado de las cargas en el área circundante. La respuesta del Vidicon es más insensible que las CCD en este aspecto.
- Distorsión parabólica : Se produce unicamente en cámaras TCR y es debida a la variación de la distancia del cañon electrónico respecto a los puntos centrales o extremos del plano de imagen. La falta de uniformidad lateral da desviaciones hasta del 20 % (Fig.2-13).
- Distorsión geométrica: Las cámaras CCD poseen una mínima distorsión. Son utilizadas en tecnicas interferométricas y en Optomecánica en el análisis de franjas de moire.
- Definición geométrica : Si bien, en general, las cámaras TCR poseen mayor definición (625 lineas y hasta 1000 lineas en horizontal), las cámaras CCD podrán ofrecer en un futuro inmediato dispositivos de 1024 x 1024 pixels en forma comercial (en actualidad hasta 512 x 512).
- Ruido de fondo : Constituye un aspecto importante en la extracción de datos de la imagen fotoelástica. En las cámaras TRC aparece una señal de fondo constante, incluso en ausencia total de iluminación. Su eliminación es fácil, ya que evaluado su valor, solo es preciso el restar del nivel existente. No obstante, queda reducido notablemente el rango util de medida. En la Fig. 2-14 se muestra un ejemplo bien significativo, la discretización del equipo en 256 niveles queda infrautilizada.

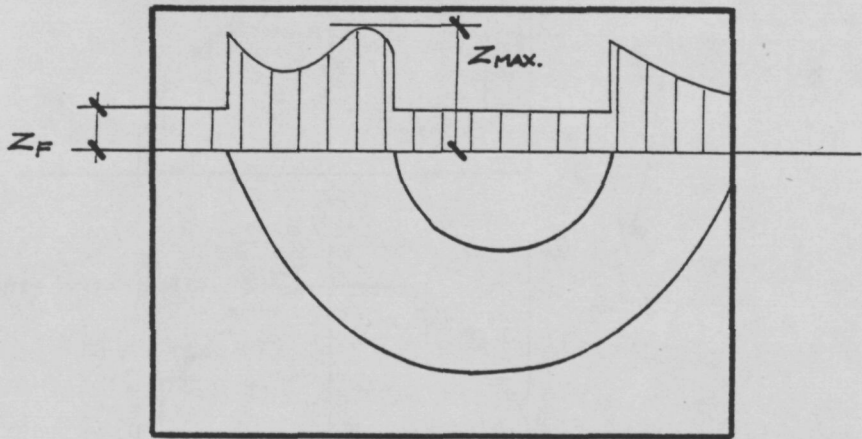
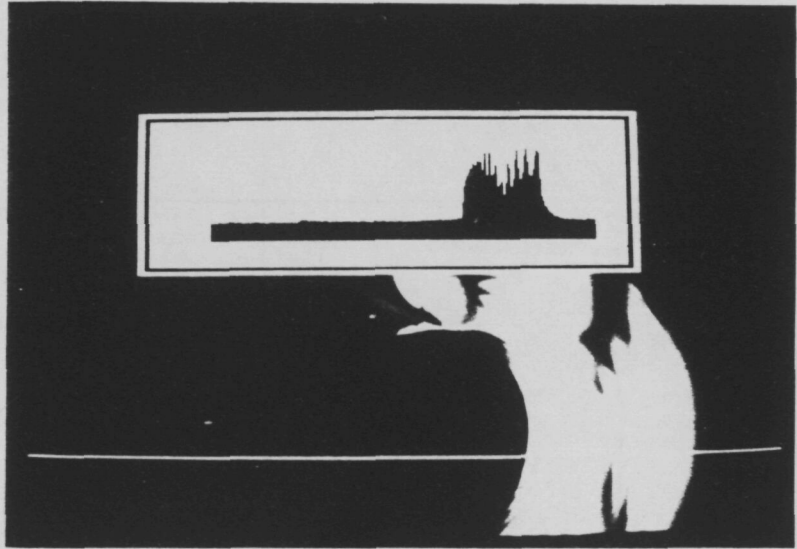
La cámara de estado sólido ha presentado problemas de ruido variable en el tiempo. Su eliminación se ha resuelto mediante el promedio simple de 2 ó 3 imagenes.(Fig.2-15) (Fig.2-16).
- Linealidad: La señal de salida V en función de la iluminación incidente I, admite una aproximación de tipo exponencial. Asi :



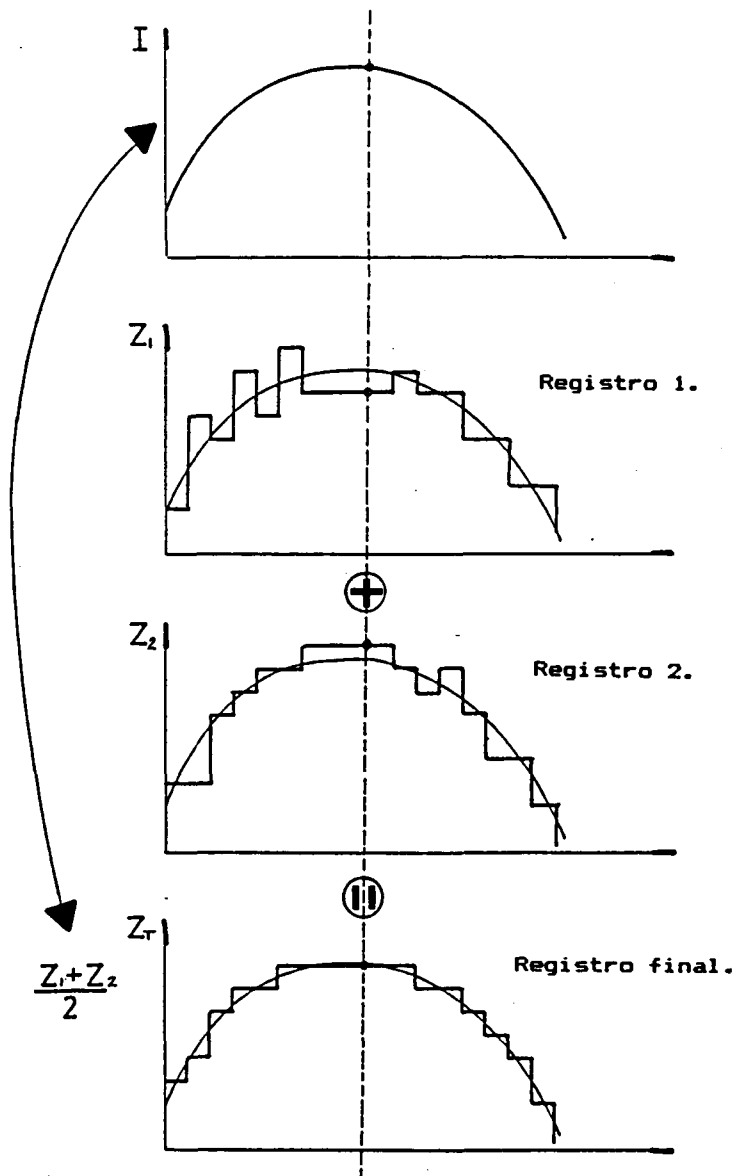
2-12 Respuesta espectral.



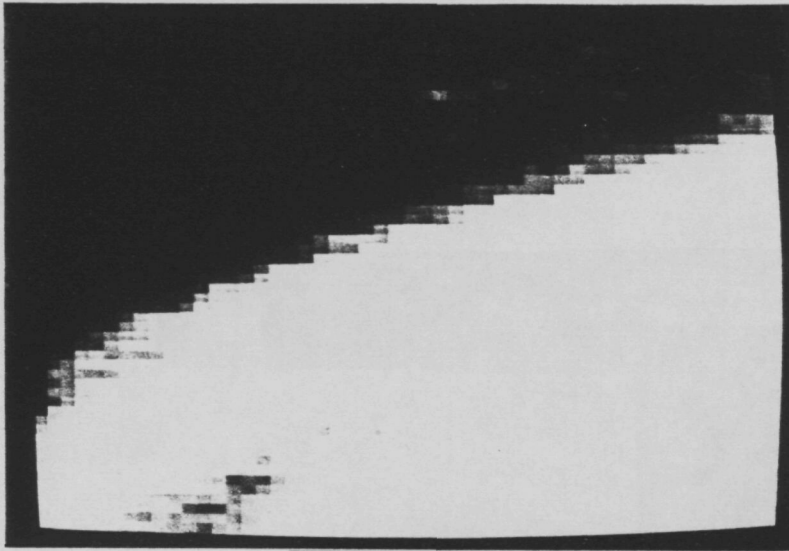
2-13 Distorsión parabólica en cámaras TRC.



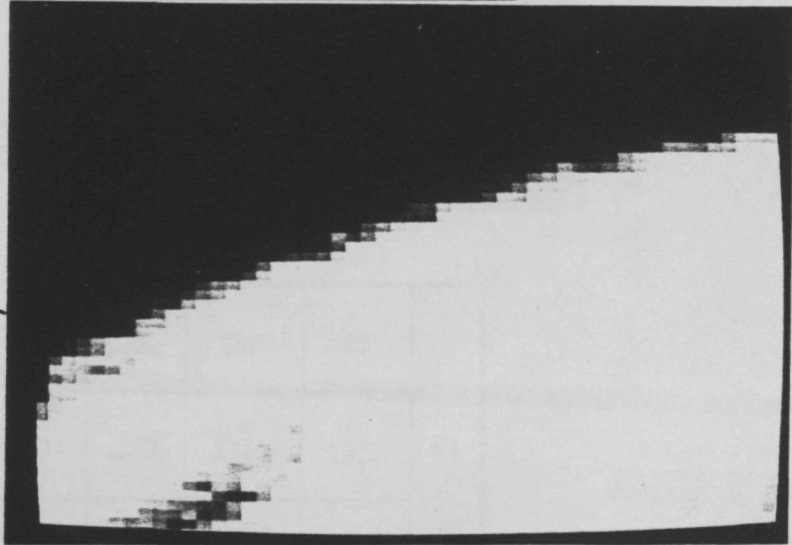
2-14 Ruido de fondo constante en cámaras TRC.



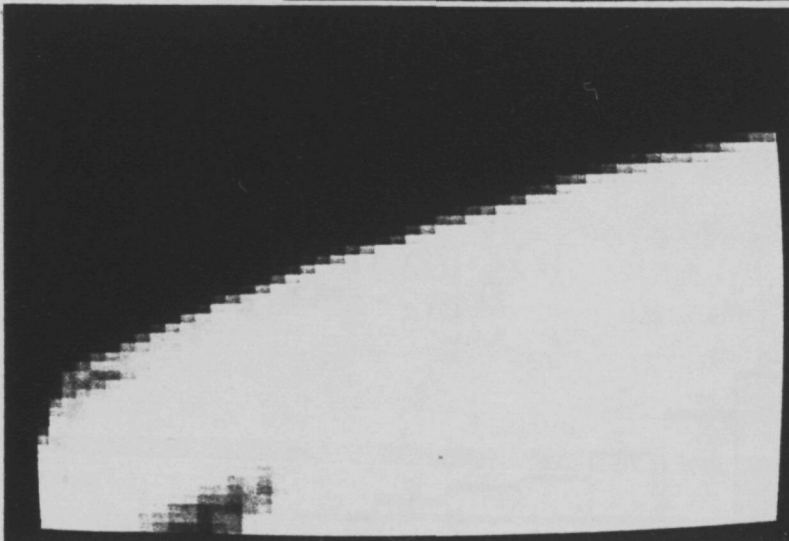
2-15 Eliminación del ruido aleatorio mediante promedio de imágenes en cámaras CCD.



A

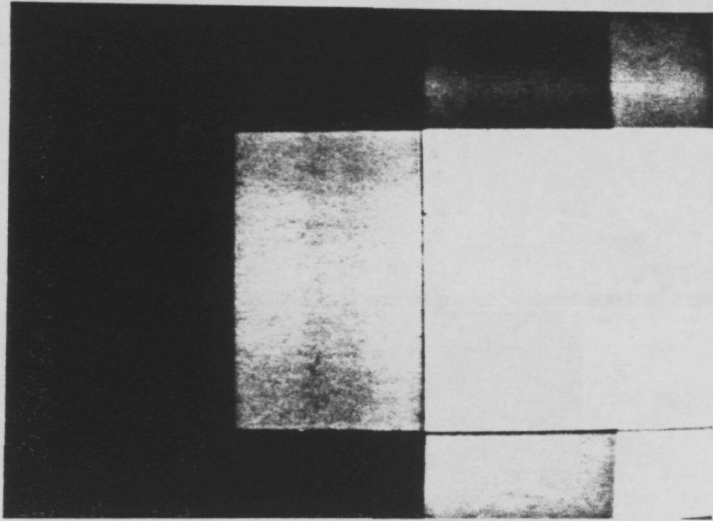


B

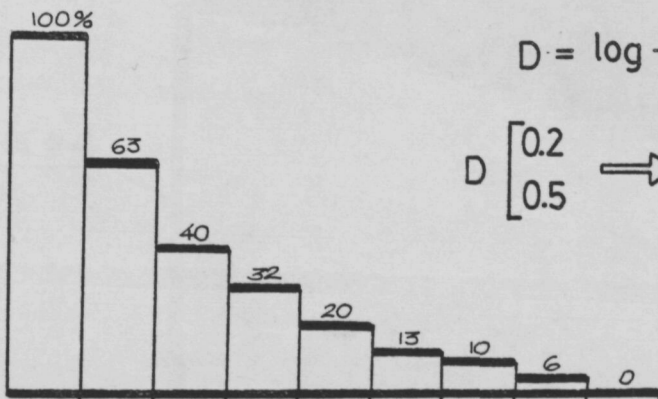


A+B

2-16 Ejemplo práctico de promedio de imágenes fotoelásticas.



	6	10	20	32
0	20	32	63	100
	13	20	40	63



$$D = \log \frac{1}{T}$$

$$D \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.5 \end{bmatrix} \rightarrow T \begin{bmatrix} 63\% \\ 32\% \end{bmatrix}$$

2-17 Cuña calibrada de equidensidades.

$$V = V \text{ fondo} + \text{Cte. } I^\gamma$$

El valor de Gamma γ indica la linealidad de respuesta. Hemos comprobado que en una cámara TCR los valores de γ son del orden de 0,8 y que varían según el nivel de iluminación general de la imagen.

Este mismo fenómeno ocurre con la cámara CCD. En el siguiente apartado se realiza su calibración cuantitativa.

En conclusión, comparando los diferentes aspectos comentados, la cámara de estado sólido CCD presenta mejor respuesta ante los registros fotoelásticos. Además, su sensibilidad permite trabajar con niveles de iluminación muy bajos, del orden de 3 lux e inferiores, y por tanto pudiendo utilizar filtros monocromáticos muy selectivos.

2.2.2 Calibración cámara CCD

Se ha realizado la calibración experimental de la cámara de estado sólido CCD, marca SONY mod. AVC-D5CE, con resolución de 500 x 582 pixels y salida en estándar europeo.

El bajo nivel de la señal comparado con el alto umbral de digitización ha obligado a incorporar un amplificador intermedio entre la cámara y la placa convertora A/D.

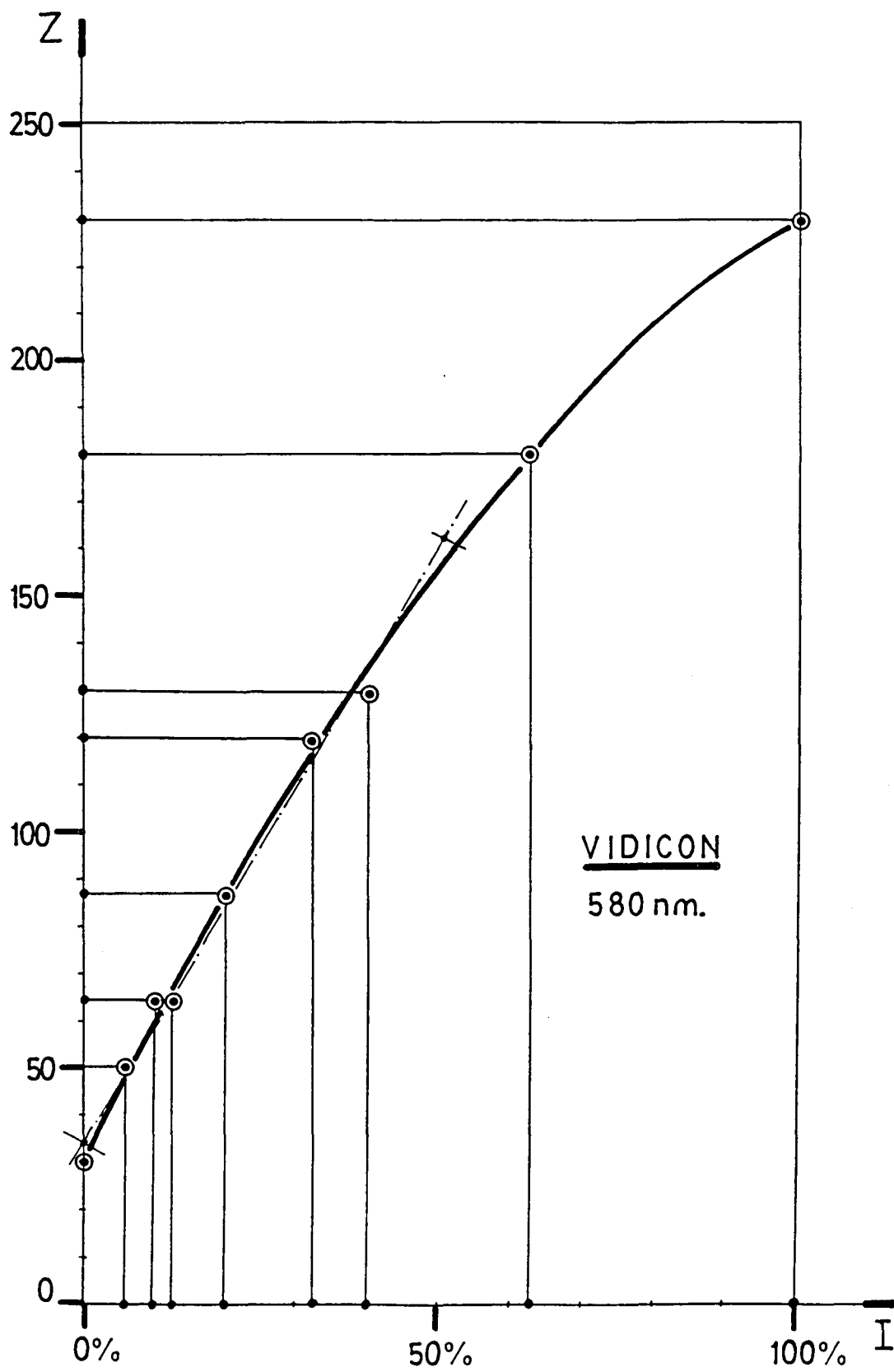
Este inconveniente se ha transformado en ventaja, ya que en algún caso, permite prescindir de la curva de calibración y trabajar en la zona lineal de respuesta.

Hemos previsto una regulación fina en el amplificador. Se optimiza el punto de trabajo variándolo simultáneamente con el iris de la óptica zoom.

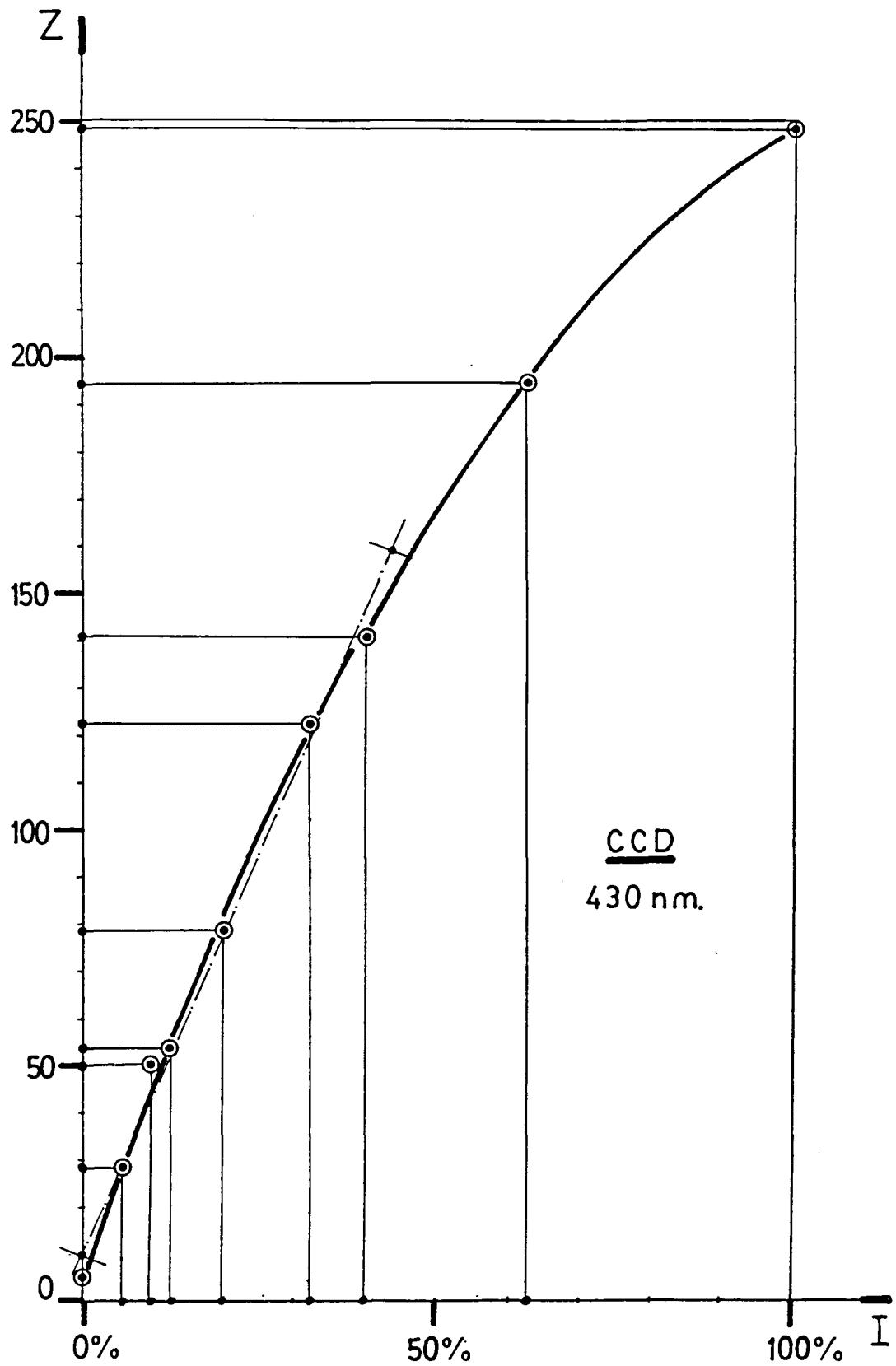
Adicionalmente también se ha calibrado la cámara TRC tipo Vidicon, marca RCA mod. TC2000, con ajuste interno del factor Gamma γ y externo de la ganancia del preamplificador.

El sistema para obtener unas intensidades de iluminación conocidas se ha resuelto originalmente utilizando una cuña de equidensidades calibradas.

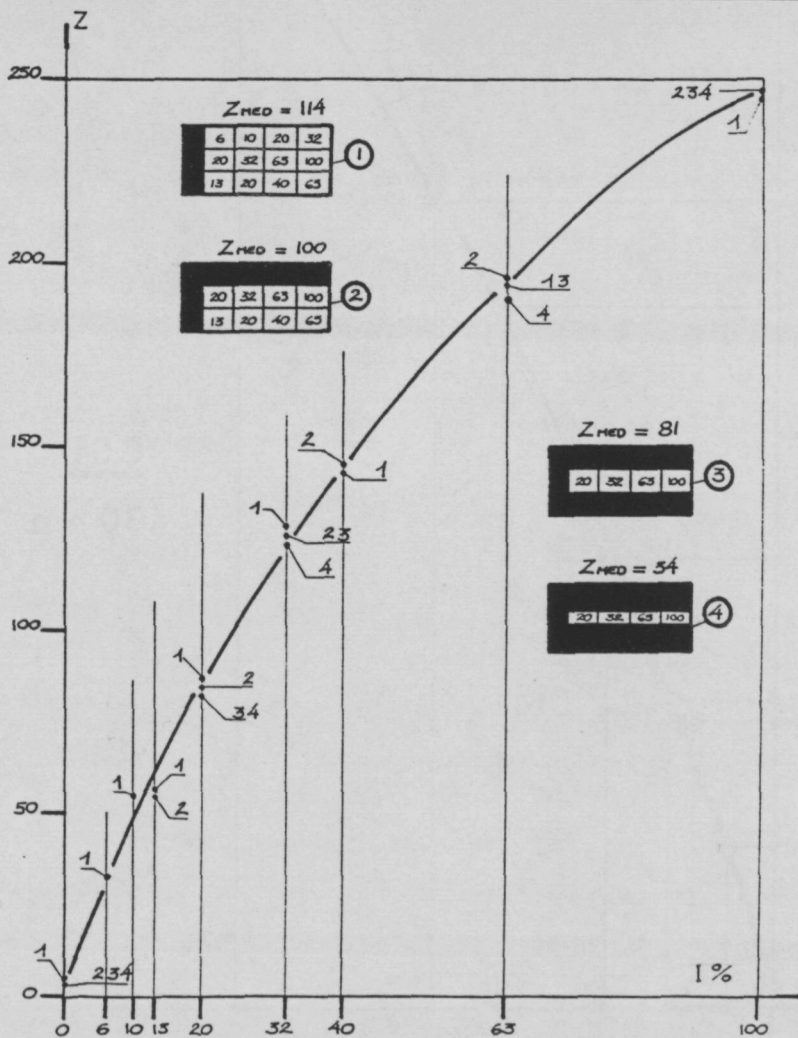
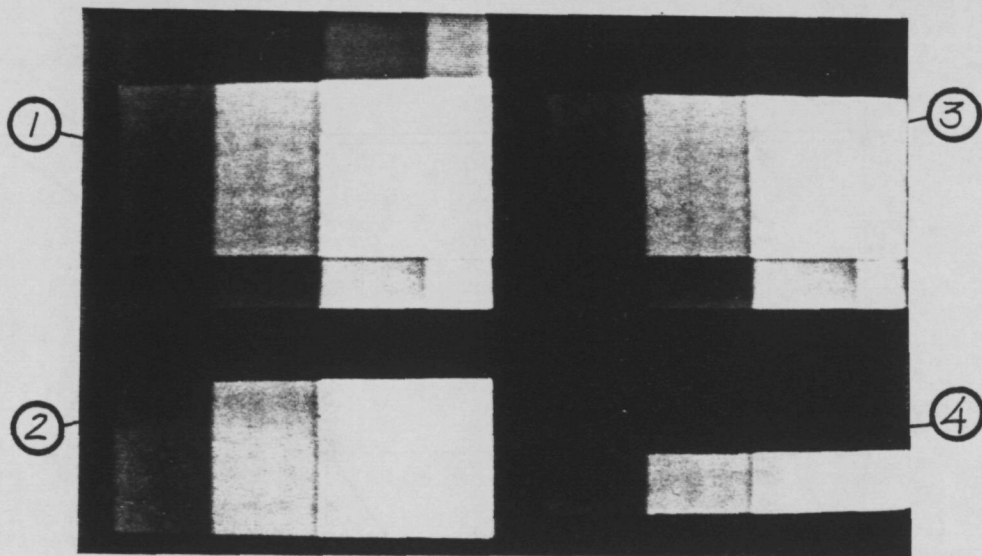
A partir de dos filtros atenuadores de factor conocido: $T = 63\%$ y 32% , marca KODAK tipo Wratten 75 x 75 mm, se ha construido mediante la adición adecuada de los mismos en un marco autoportante, una cuña de equidensidades con valores escalonados según se indica en la Fig.2-17.



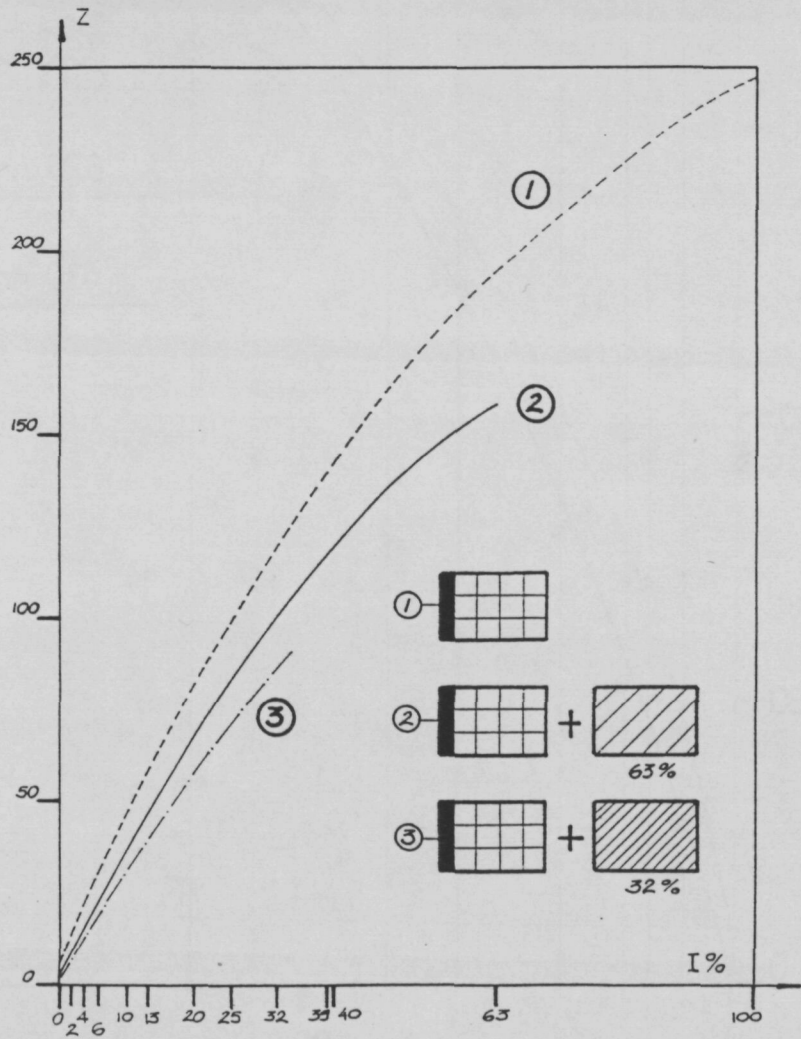
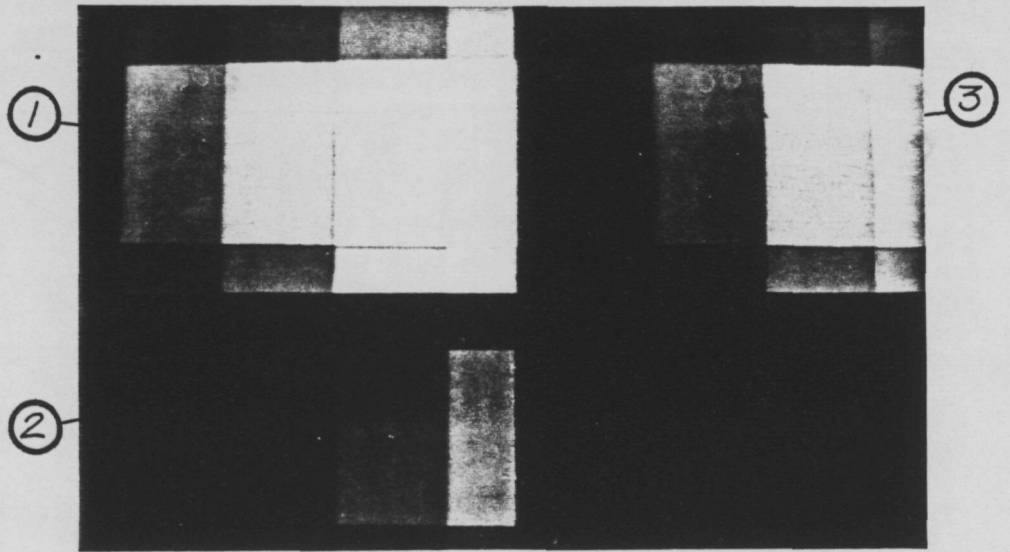
2-18 Respuesta de cámara TRC.



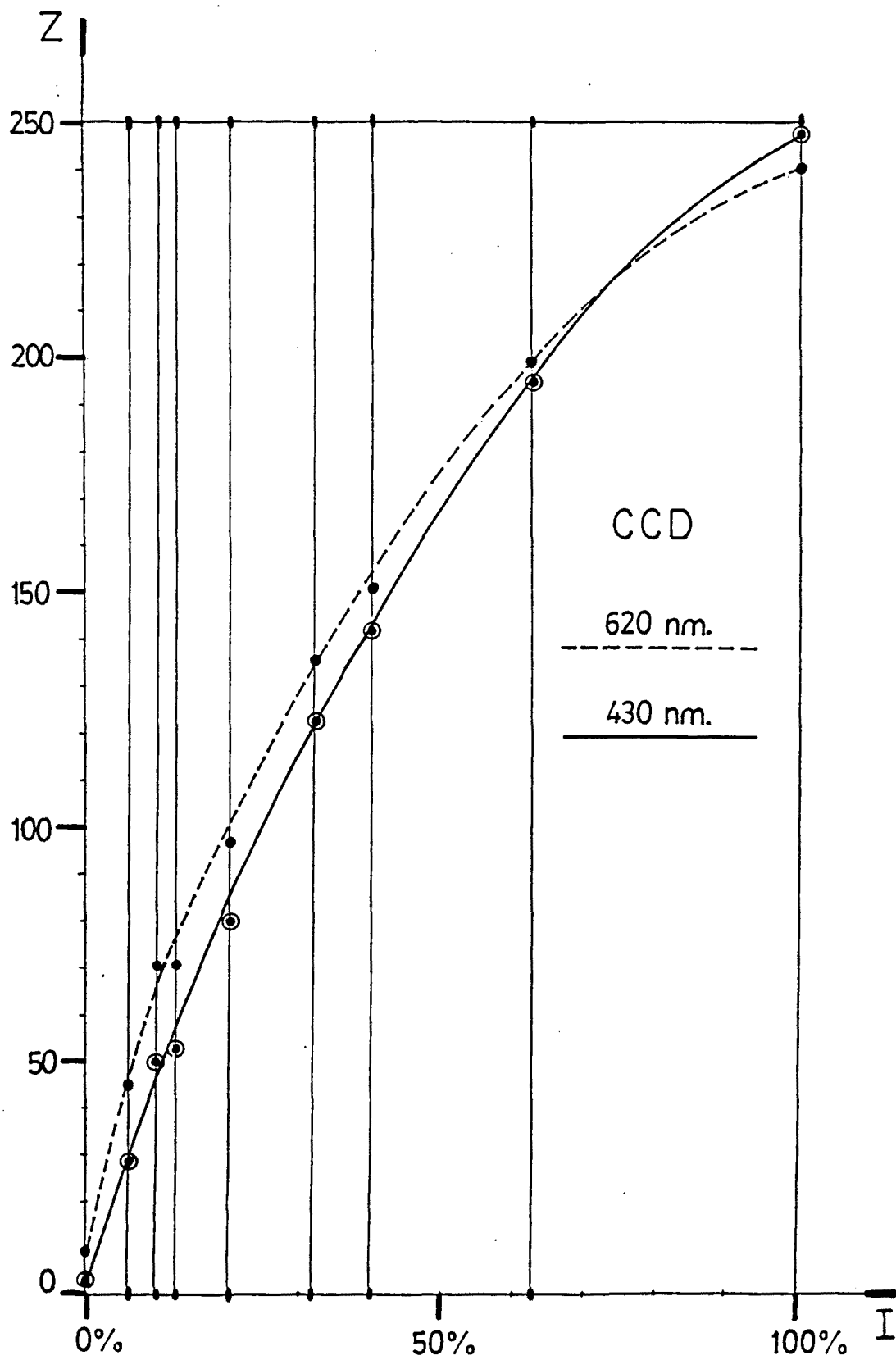
2-19 Respuesta de cámara CCD.



2-20a Influencia del valor medio Z_m en cámara CCD.



2-20b Influencia de los valores máximos y medio en CCD.



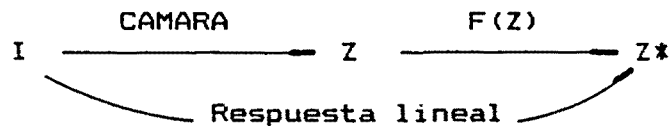
2-21 Respuesta espectral relativa en cámara CCD.

Iluminando uniformemente el marco y enfocando la imagen sobre su plano, puede procederse a la lectura de los niveles detectados por la cámara y digitalizados por el conversor A/D.

La medida, correspondiente a un recuadro de equidensidad, no se ha realizado puntualmente sino promediando el valor del mismo en una superficie suficientemente significativa. A tal efecto se ha confeccionado un programa que de forma automática nos proporciona el total de las medidas necesarias (Programa VER.SCR).

A continuación con dichos valores se procede a un ajuste polinomial de los datos experimentales mediante el método de mínimos cuadrados. (Fig.2-18) (Fig.2-19)

La ecuación nos suministra la respuesta analítica de la cámara, siendo por tanto posible realizar la corrección de los valores medidos Z y transformarlos en valores linealizados Z^* , mediante una nueva función $F(Z)$:



En la práctica la función elegida debe ser de grado igual o superior a 3.

No obstante, posteriores ensayos realizados con variación de los valores característicos de la imagen (Fig.2-20a/b):

ZMED = Valor medio de la imagen.
 IMAX = Intensidad máxima.

condicionan la función F y por tanto obligan a incorporarlos como parámetros de la misma. Así, realmente :

$$Z^* = F (Z, ZMED, IMAX)$$

En la imagen fotoelástica no se dispone de IMAX real del ensayo, por tanto es obligado proceder a la calibración con su valor medido ZMAX :



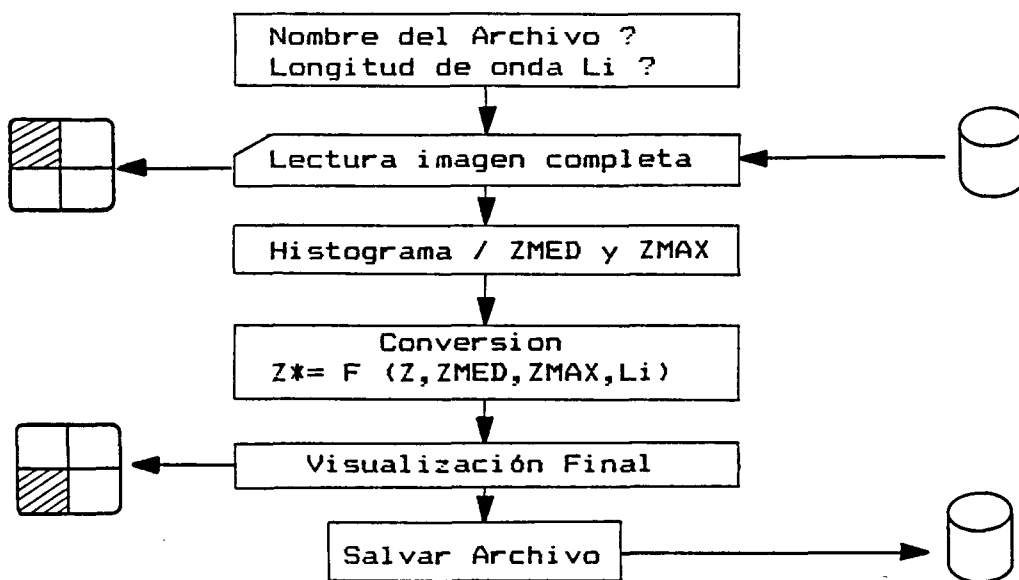
Por tanto:

$$Z^* = F (Z, ZMED, ZMAX)$$

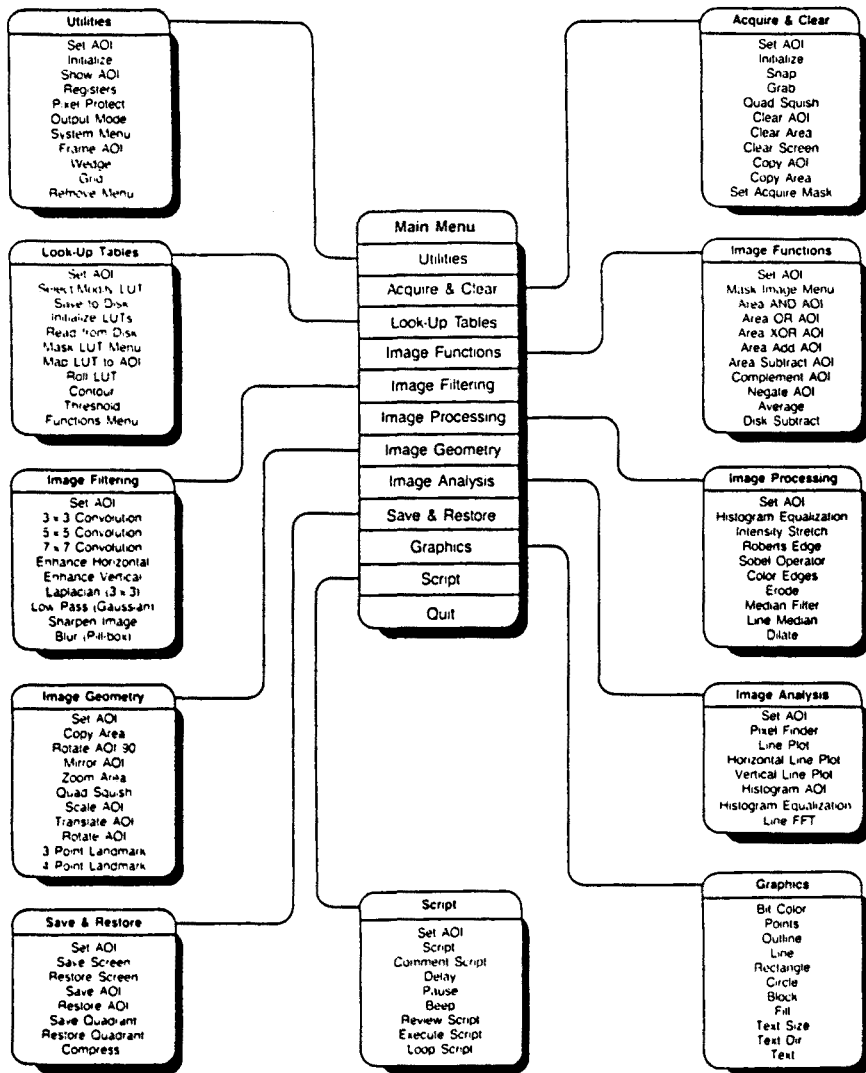
Adicionalmente la respuesta de la cámara también depende de la longitud de onda utilizada L_i (Fig.2-21). Así :

$$Z^* = F (Z, Z_{MED}, Z_{MAX}, L_i)$$

Evidentemente la linealización de la imagen es un problema complejo al intervenir tantas variables. Así, el cálculo de sus parámetros característicos debe ser de forma automática, aplicando seguidamente la función de conversión y obteniendo finalmente la imagen linealizada. Esta tarea la realiza el programa CONVERT.EXE formulado con el siguiente algoritmo :



La utilización sistemática del proceso sobre imágenes reales fotoelásticas ha sido empleada en multitud de ocasiones, demostrándose que los resultados no son siempre del todo satisfactorios. Finalmente hemos optado por trabajar sobre la zona de comportamiento lineal de la cámara, en los casos que esto sea factible.



2.2.3 Algoritmos estandar

Desde areas de interés diferenciadas, se ha dedicado un considerable esfuerzo a la extracción y procesado de la información implícita en la imagen.

En la actualidad, se dispone de algoritmos estandar que permiten abordar la mayoría de operaciones habituales en la manipulación del registro.

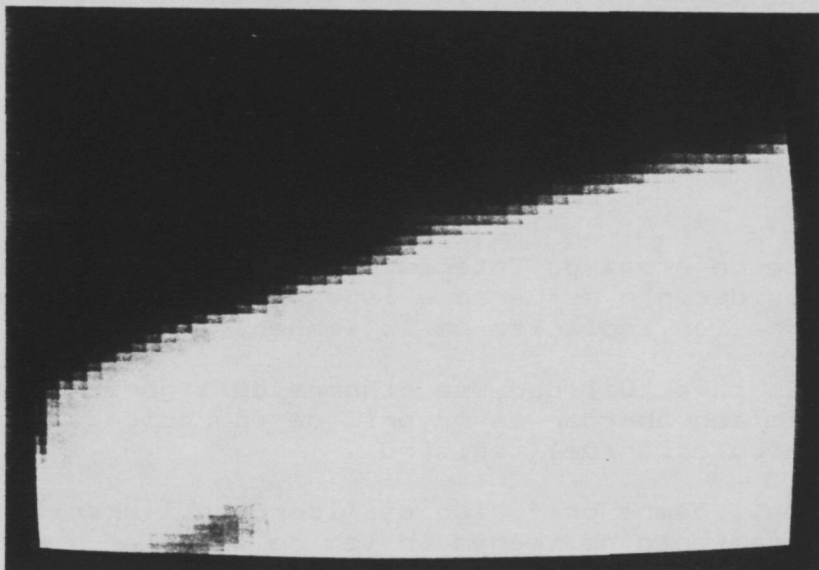
Así, hemos preferido utilizar una librería completa de tratamiento de imagen en vez de formular personalmente los programas. Los algoritmos disponibles para las operaciones rutinarias de adquisición, grabado, suavizado, histogramas de nivel, etc... se encuentran escritos en lenguaje ensamblador de alta velocidad y convenientemente optimizados.

El software utilizado ha sido IMAGEACTION (Fig.2-22), de la firma Imaging fabricante de la tarjeta digitizadora. A nuestro entender es suficientemente extenso y con prestaciones actualizadas [Ref.16].

Esta opción nos ha permitido realizar nuestros propios programas de aplicación optomecánicos y recurrir a la librería citada en forma de subrutinas de utilidades.

De forma general, las operaciones más conocidas que tengan interés en el análisis de imágenes fotoelásticas, son las siguientes [Ref.15] [Ref.17] :

- TABLAS DE CONVERSION : La adquisición de la imagen se realiza a través de una función de transferencia previamente elegida.
- ANALISIS DE LA IMAGEN : Se procede a un estudio del registro dando como resultado un histograma de niveles de gris y la obtención de las variables estadísticas de la distribución. Se accede directamente al nivel de un pixel concreto.
- FILTRADO : Reduce el ruido óptico y eléctrico en la imagen.
- REALCE : Se aumenta el contraste útil de la imagen con un estudio previo del histograma inicial. Mejora el registro obtenido con bajas iluminaciones.



Operador Gaussiano o pasa-bajos sobre 2-16.



Zoom informático sobre zona de interes.

2-23 Operaciones estandar en tratamiento de imagen.

- BINARIZADO : Consiste en reducir los 256 niveles de gris a tan solo dos valores 0 ó 1, utilizando como criterio el de la intensidad umbral T_0 ó "Threshold". Permite la identificación de franjas de extinción fotoelásticas.
- OPERADORES : Existen multitud de operadores que se basan en la aplicación de una máscara o ventana de 3x3, 5x5 e incluso 7x7 elementos. (Fig.2-23). Se aplica sucesivamente todos los pixels del registro. Es la convolución de la matriz con la imagen.

Operador de Suavizado ó Gaussiano: Elimina las variaciones bruscas de intensidad, comportandose como un filtro pasa-bajos.

Operador Gradiente ó Laplaciano : Constituye un severo filtro pasa-altos de tal forma que las singularidades se ven convenientemente realzadas.

Operadores de Borde (Roberts, Sobel) : Tienen como objeto la obtención del borde de la pieza a partir de la imagen digitalizada en niveles de gris, mediante la detección de las regiones de transición.

Se recurre a las derivadas direccionales ortogonales expresadas de forma discreta y aproximada.

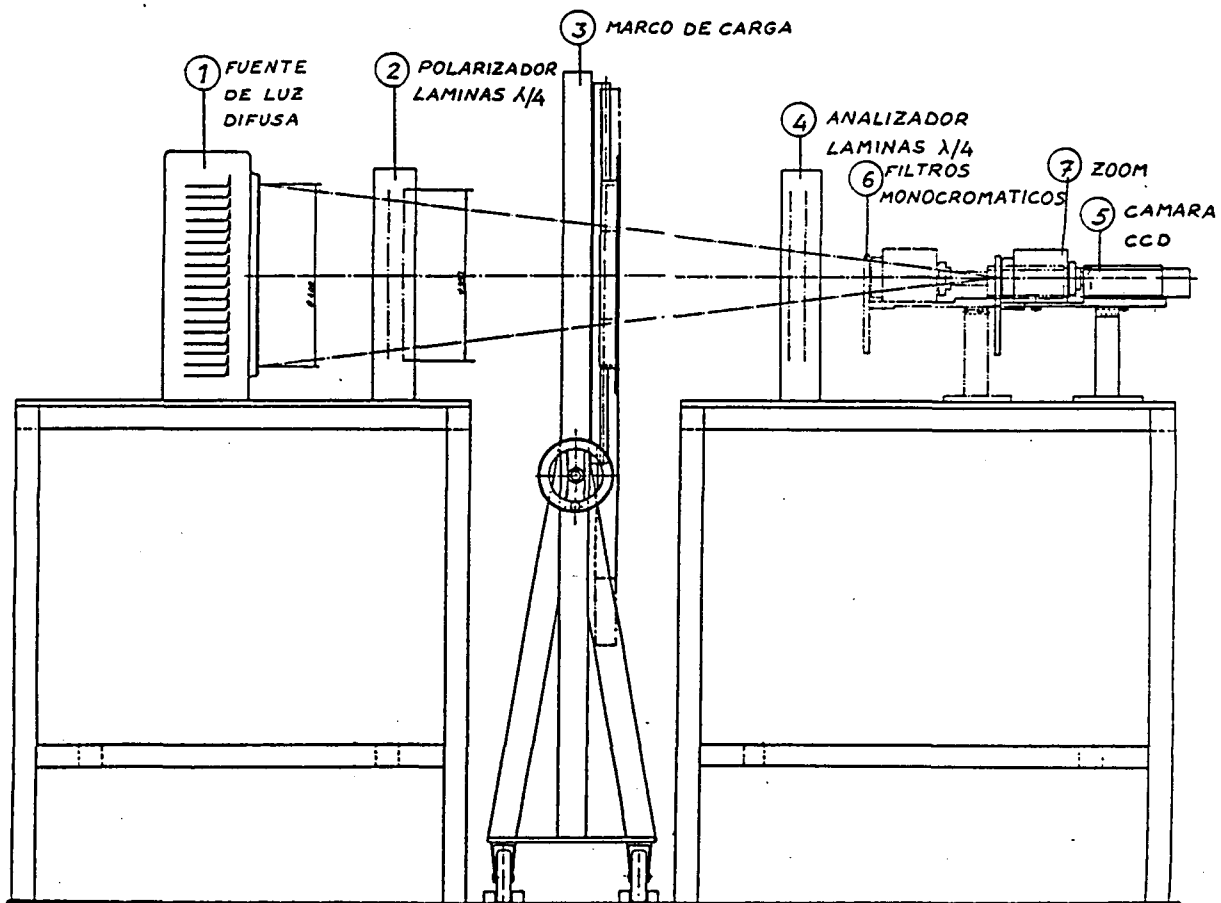
No son operativos con imagenes fotoelásticas. (Ap. 3.1)

- GEOMETRIA : Es posible amplificar el tamaño de una zona de imagen, realizar traslaciones en la misma o incorporar grafismos externos (Fig.2-23)

Hay multitud de operaciones específicas adicionales :

- Afinado y continuidad de franjas o líneas.
- Operaciones entre imagenes reales o virtuales.
 - Sumas, Substracciones.
 - Operadores lógicos o booleanos.
- Codificación y almacenado óptimo del registro, etc...

En definitiva, existe un potente soporte logístico disponible.



2-24 Elementos principales del BFA.

Prof. Sr Daniel Audi. (*)
 Prof. Sr Francesc Roure (**)
 Prof. Sr Frederic Marimón (**)
 Sr A. Roldan (Proyectista) (*)

(*) Departamento de Proyectos en Ingeniería.
 (**) Departamento de Resist. de Materiales y Estructuras.
 E.T.S. Ingenieros Industriales de Barcelona
 Universidad Politecnica de Catalunya.