

**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

2.2.4 Equipo experimental

El instrumental empleado en la presente Tesis formará parte de un Banco Fotoelástico Automatizado (BFA). Siempre es preferible tener una visión de conjunto, por tanto describiremos los elementos en su posición definitiva.

Dado que la técnica de adquisición de imagen permite una independencia parcial entre el montaje mecánico del ensayo fotoelástico y el equipo de medida, se ha intentado potenciar al máximo esta ventaja en el diseño. En la Fig. 2-24 se encuentra esquematizado el BFA, actualmente en fase de montaje. Constará de los siguientes dispositivos :

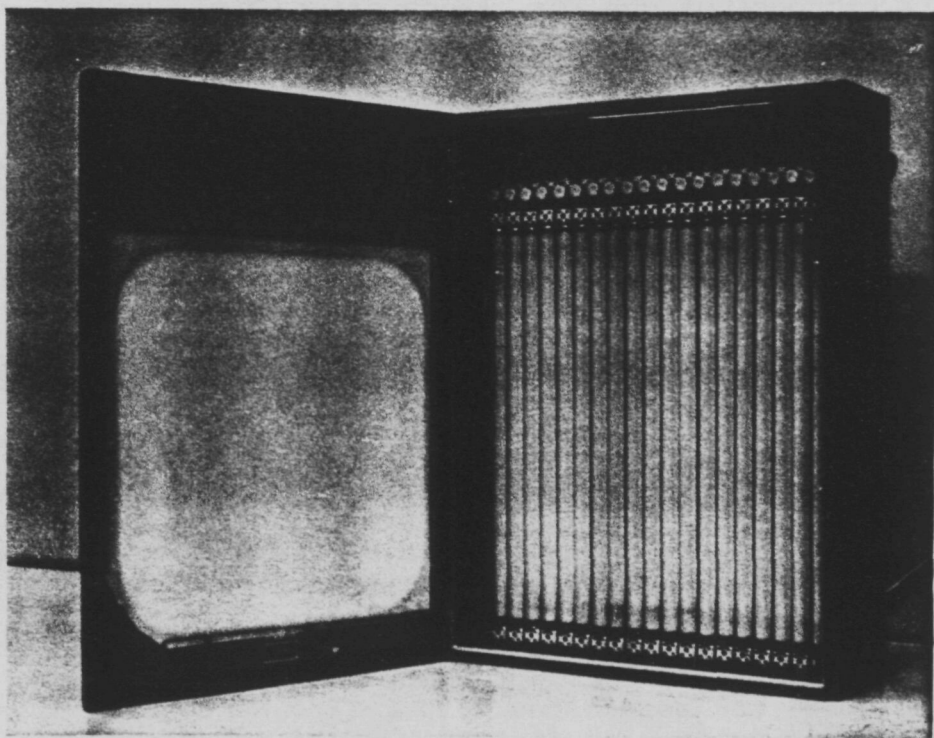
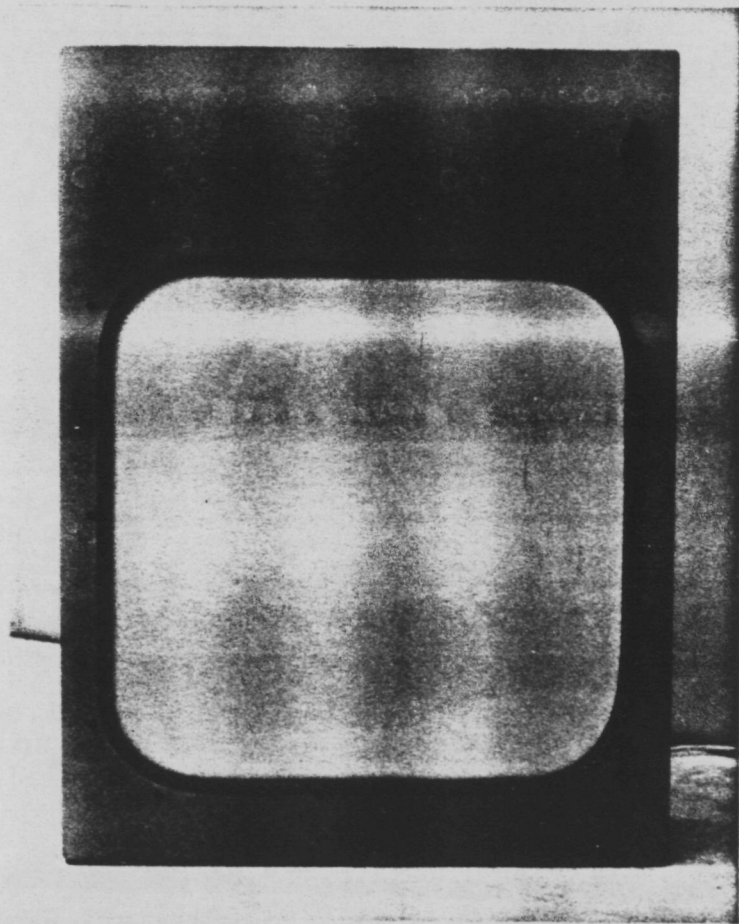
① — FUENTE DE LUZ DIFUSA

Mediante un cuidadoso diseño, una batería de fluorescencia proporciona una luz blanca difusa que cumple los requisitos siguientes :

- Campo extenso, de dimensiones útiles de 500 x 500 mm.
- Iluminación intensa, con un total de 19 tubos fluorescentes de 18 W. electricos, proporcionando una alta intensidad específica de 0,70 Cd/cm². Dado el elevado rendimiento de la técnica de fluorescencia frente a la incandescencia son innecesarios los equipos de ventilación forzada. (Fig.2-25).
- Uniformidad de iluminación. Conseguida mediante la disposición compacta de las lámparas fluorescentes, su diámetro reducido de 26 mm y un difusor plástico opalizado.

Es importante elegir una correcta emisión espectral del flujo luminoso. Como vamos a utilizar filtros monocromáticos sobre luz blanca para obtener las diferentes longitudes de onda, nos interesa una emisión amplia y uniforme en el espectro.

Esta característica depende de las sales fluorescentes depositadas en la pared del tubo. Emisiones discretas e intensas deben ser desechadas (Fig.2-26). Hemos elegido el denominado color "luz de día" PHILIPS/54 por ser el más indicado y adicionalmente usual en el mercado.



2-25 Fuente de luz blanca difusa.

②—④— POLARIZADOR - ANALIZADOR

Son conjuntos rotatorios de idénticas características con un campo útil circular de 350 mm.

Un motor de c.c con sus correspondientes reducciones proporciona el movimiento a la corona exterior dentada. El giro y posicionado es controlado por ordenador mediante lectura sobre un encoder óptico montado en el eje del motor

Un dispositivo permite la inserción de láminas L/4 externas.

③— MARCO DE CARGAS

El marco de cargas de tipo universal desliza sobre railes perpendiculares. Los dispositivos experimentales pueden montarse con toda comodidad exteriormente al BFA.

⑤— SENSOR DE IMAGEN

Una cámara de estado sólido tipo CCD, SONY mod. AVC-DSCE, realiza la adquisición de la imagen con un tiempo de captura de 1/25 seg.

Sus altas características de sensibilidad y linealidad han hecho aconsejable su elección ante otras opciones de cámaras TRC tipo Vidicón. (Apt.2.2.1).

Con una malla de 500 x 582 elementos semiconductores, sobre una zona útil de 8.8 x 6.6 mm ó 2/3" en diagonal, proporciona una salida analógica siguiendo el estandar europeo CCIR de 625 líneas.

Opera con bajas iluminaciones de hasta 3 lux y está exenta practicamente de persistencia.

⑥— PORTA-FILTROS

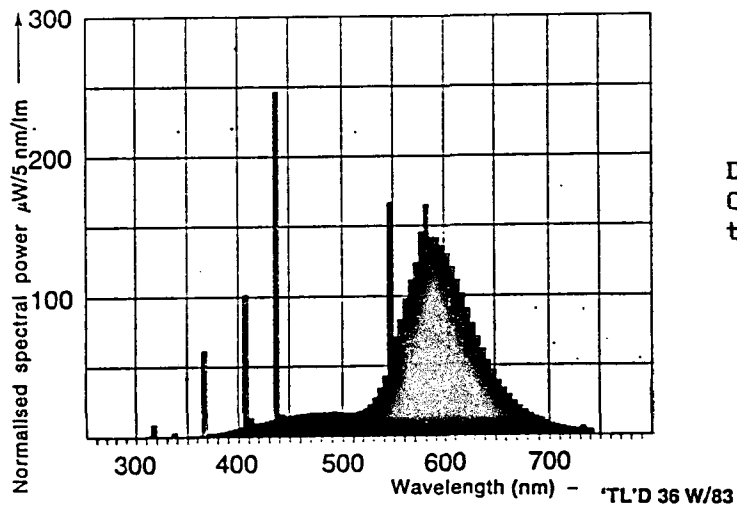
Un disco giratorio será el soporte para los filtros monocromáticos o atenuadores en la obtención de la imagen.

⑦— OPTICA DE ENFOQUE

Optica zoom de f:15 a 90 mm COSMICAR mod. B6 Z1518M3-2/3, con aros suplementarios de expansión. (Fig.2-27).

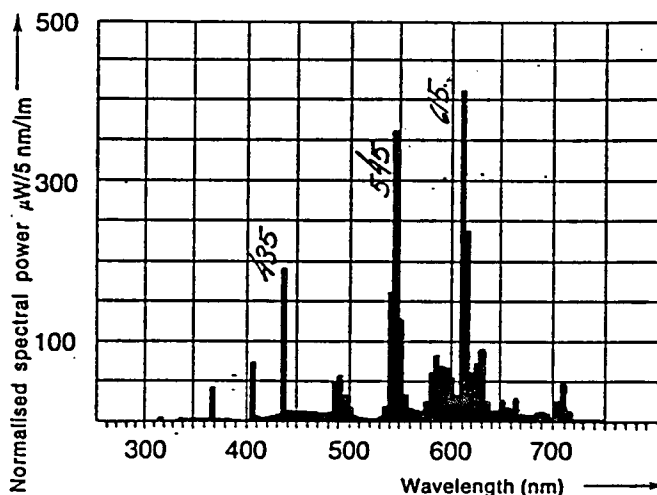
El diafragmado del iris y enfoque se realizan motorizados. El operador del BFA dispone de los controles frente al monitor, permitiendole una cómoda utilización y proporcionando ampliaciones en zonas singulares o de alta concentración de tensiones.

TL'D 36 W/29

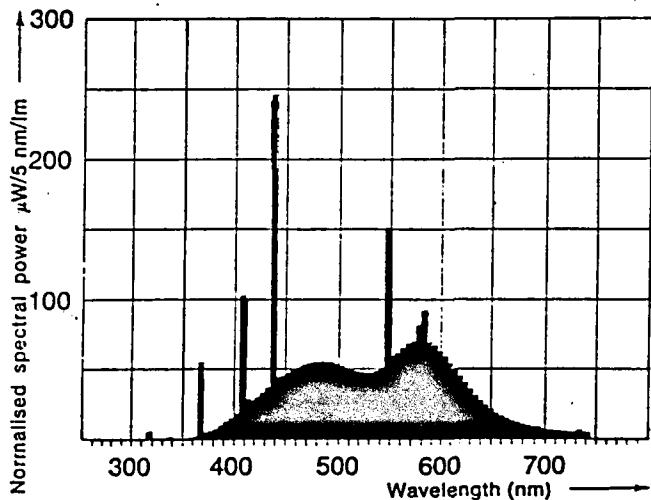


Distribución descompensada.
Carencia de emisión en longitudes de onda bajas.

Distribución discreta en frecuencias preferentes.
No apta, a menos que los filtros monocromáticos coincidan con las mismas.



TL'D 36 W/54



Distribución suficientemente uniforme en el rango visible.
Coincide con el Philips /54 elegido para el BFA.

2-26 Emisión espectral para la batería de fluorescencia.

Ya que las mesas deslizan sobre guías, es posible alejar convenientemente el conjunto cámara + óptica zoom y trabajar en modo teleobjetivo con mínima distorsión geométrica.

⑧ — SOPORTE INFORMÁTICO

Un ordenador personal IBM / AT, con 1 MB de memoria RAM, disco duro de 20 MB y doble unidad de disco de 1.2 MB, constituye la base informática del sistema.

En sus ranuras de expansión se encuentran alojadas las tarjetas de control de los motores c.c y digitización de imagen ocupando regletas independientes. La Fig.2-28 muestra el diagrama de bloques de esta última. Fabricada por Imaging Technology Inc. mod. PCVISION, tiene incorporados los módulos opcionales de expansión de memoria y salida pseudocolor.

La adquisición de la imagen se realiza en tiempo real, no así su procesado lo cual no constituye ninguna limitación en Fotoelasticidad.

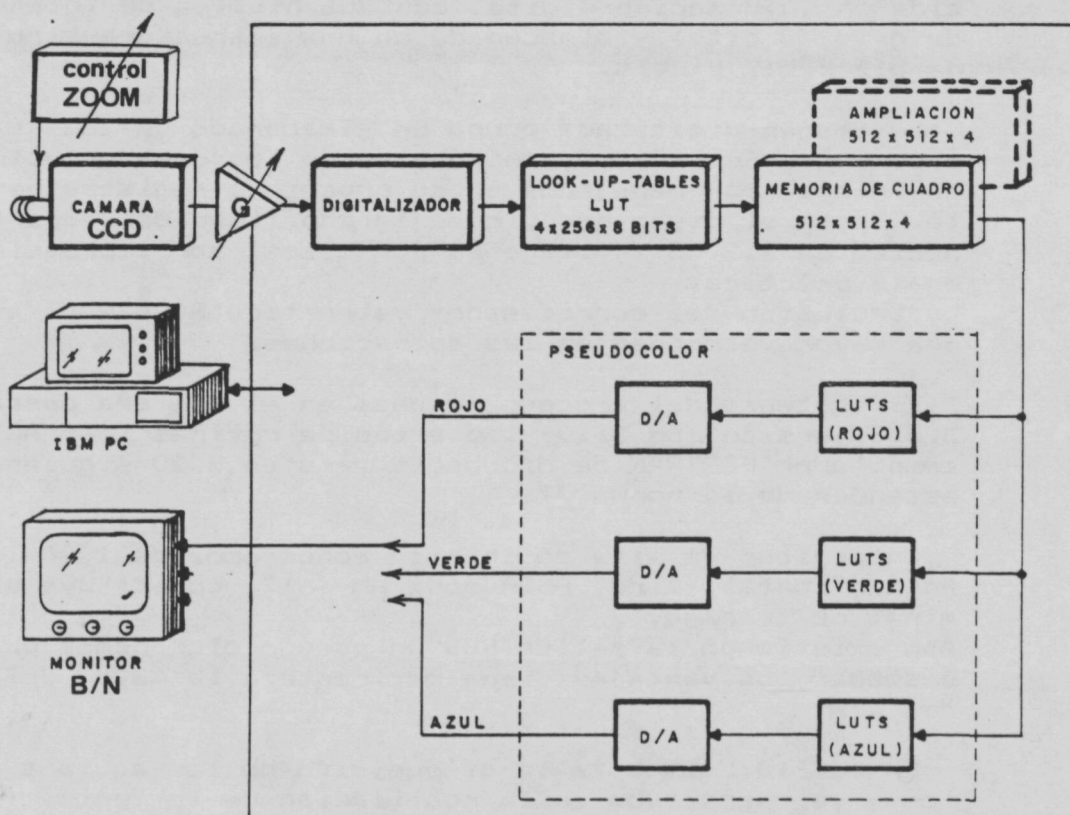
La señal analógica procedente de la cámara CCD es convertida en información digital con 256 niveles de intensidad de gris (8 bits) y almacenada en una estructura tipo Frame de 512 x 512 pixels.

La imagen digitizada ocupa un almacenado de 262 KB aproximadamente. Este dato ya nos avisa de los grandes volúmenes de información manejados en su proceso o registro permanente. Tanto el disco duro, como la capacidad del soporte magnético de 1.2 MB (4 imágenes por disco) son imprescindibles en la práctica. La inclusión del coprocesador matemático 80287-AT asegura una mayor velocidad en las operaciones.

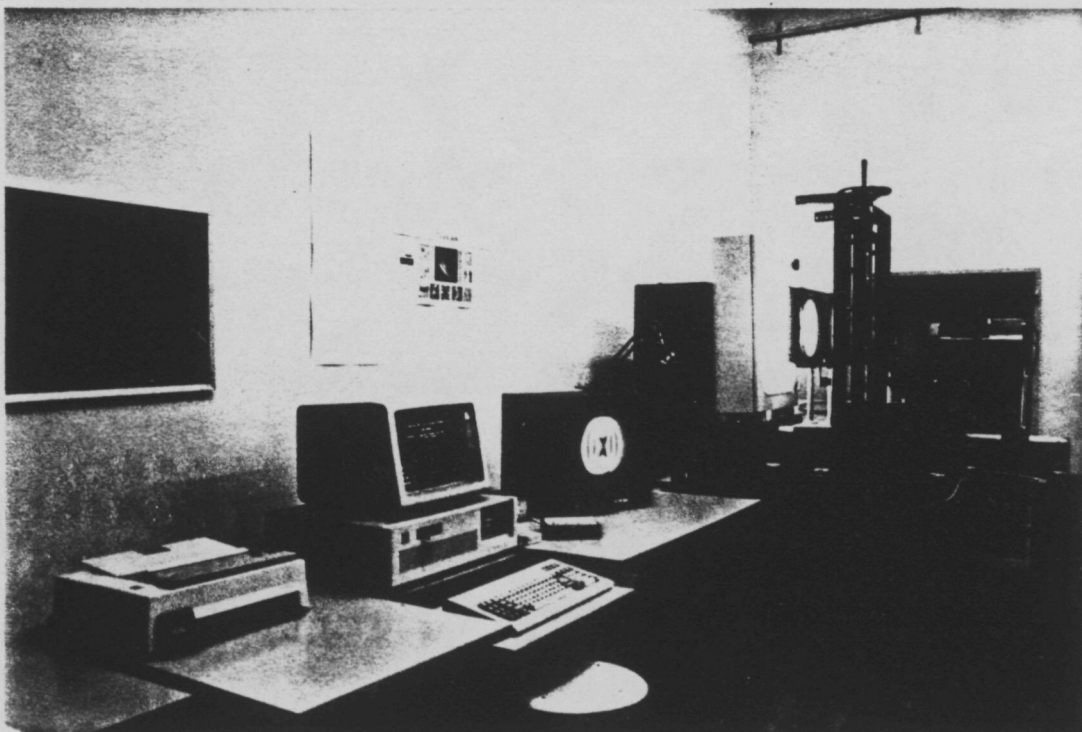
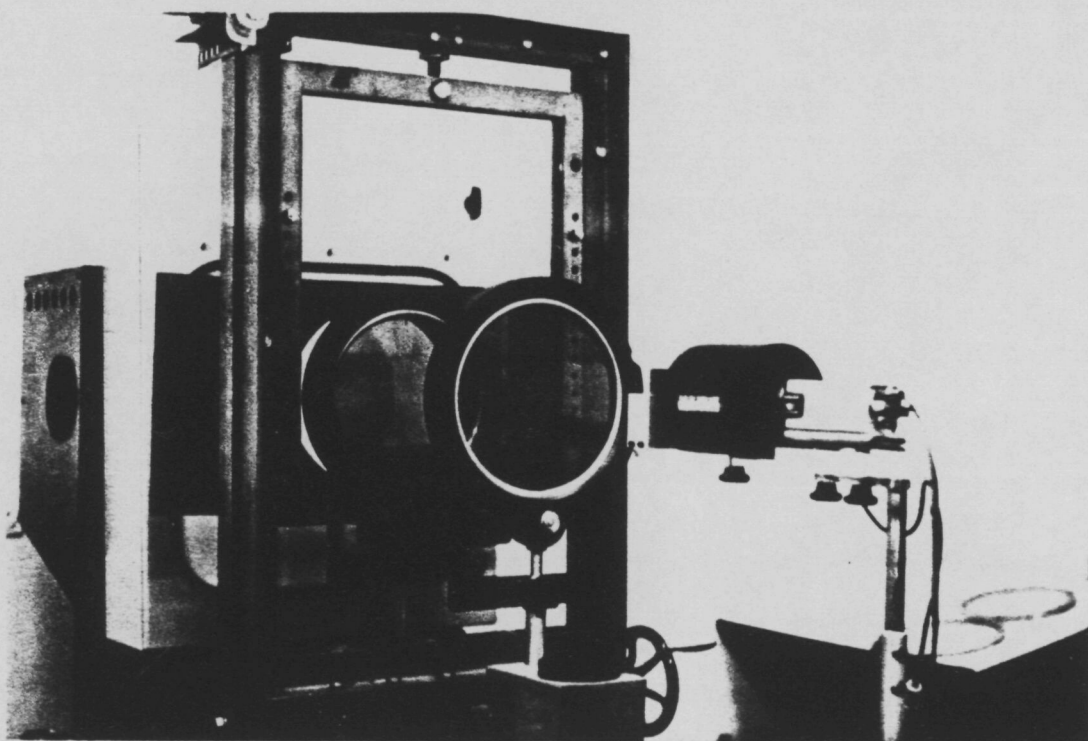
El software del proceso se basa en el sistema operativo D.O.S versión IBM 3.10, librerías de rutinas IMAGEACTION y compilador FORTRAN de Microsoft versión 3.20 siguiendo el estándar de la norma 77.

Un monitor de alta definición monocromo, de 1000 líneas en horizontal, marca PESA mod. HM-3617, constituye el terminal de trabajo. Aún existiendo la salida RGB en pseudocolor hemos preferido desear sus ventajas visuales frente a la mayor definición del B/N.

En la Fig.2-29 está la disposición de los equipos descritos y ya operativos en la realización de la Tesis.



2-28 Diagrama de bloques del sistema PCVISION.



2-29 Disposición completa del equipo de trabajo.

3.0 EXTRACCION DE RESULTADOS

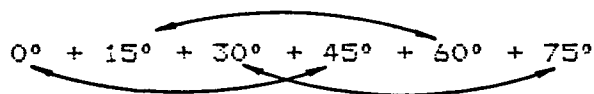
3.0 EXTRACCION DE RESULTADOS

El reconocimiento inteligente del contorno crea el archivo CONT.IMG. Dicha información estará presente en el resto del análisis fotoelástico, constituyéndose en maestro de operaciones.

El ángulo de isóclina \varnothing es obtenido por comparación de imágenes binarizadas registradas con diferente longitud de onda λ .

La franja isóclina resta constante mientras que las isocromáticas evolucionan según λ . Manualmente se corrige \varnothing , proporcionando \varnothing^* en el archivo ISO.IMG.

El retardo absoluto δ se obtiene automáticamente del análisis de las cuatro imágenes λ . Libres previamente de isóclinas mediante la superposición de registros :



Dicho análisis conduce a la minimización de una función Error, resuelta computacionalmente en dos fases, I y II :

$$E \text{ mín} \longrightarrow \delta \text{ solución}$$

La solución para todos los puntos queda almacenada en el archivo RET.IMG.

Finalmente, el necesario tercer Dato es identificado con el invariante S y obtenido por resolución, mediante el MDF, de la ecuación de compatibilidad de Laplace.

La clásica condición de Dirichlet es sustituida ventajosamente por las ecuaciones de equilibrio, convirtiéndose en un problema de Newman.

Se desechan otros planteamientos más complejos como el propuesto por Berghaus (1987) [Ref.43].

Conocidos los tres datos queda resuelto el estado tensional plano, al incorporar la constante fotoelástica C_r y el espesor e :

```
ISO.IMG .....  $\varnothing^*$   
RET.IMG .....  $\sigma_p - \sigma_q$   
SUM.IMG .....  $\sigma_p + \sigma_q$ 
```

3.1 OBTENCION DEL CONTORNO

La extracción y registro de los puntos o pixels pertenecientes al modelo discriminándolos de los pixels externos al mismo, constituye un paso imprescindible para el análisis fotoelástico automatizado.

Adicionalmente es interesante disponer del contorno de la pieza, al objeto de operar sobre estos pixels de borde con sus ecuaciones singulares de gobierno.

No obstante, la imagen fotoelástica no admite una segmentación fácil ya que existen franjas isoclinas e isocromáticas que enmascaran la forma real del modelo. El primer paso constituirá su eliminación o al menos una atenuación de las mismas. (Fig.3-2).

Usualmente trabajamos con el Polarizador y Analizador cruzados. Esto implica la existencia de un fondo oscuro y por tanto los pixels externos deberían tener intensidad nula. En la práctica no es así y existe una intensidad de fondo I_f presente en el registro, consecuencia de la incompleta polarización, entre otros factores.

Además, se encuentran pixels de bajo nivel producto de extinciones parciales. En efecto, según (AII-18) :

$$I = I_f + I_0 \sin^2 N \pi \sin^2 2 \beta$$

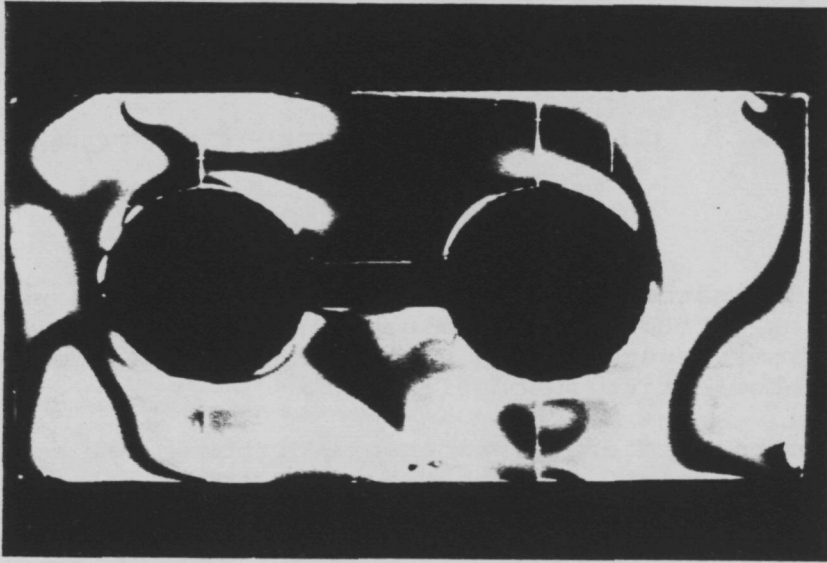
Se han ensayado dos métodos diferenciados :

- Binarizado selectivo
- Operadores gradiente

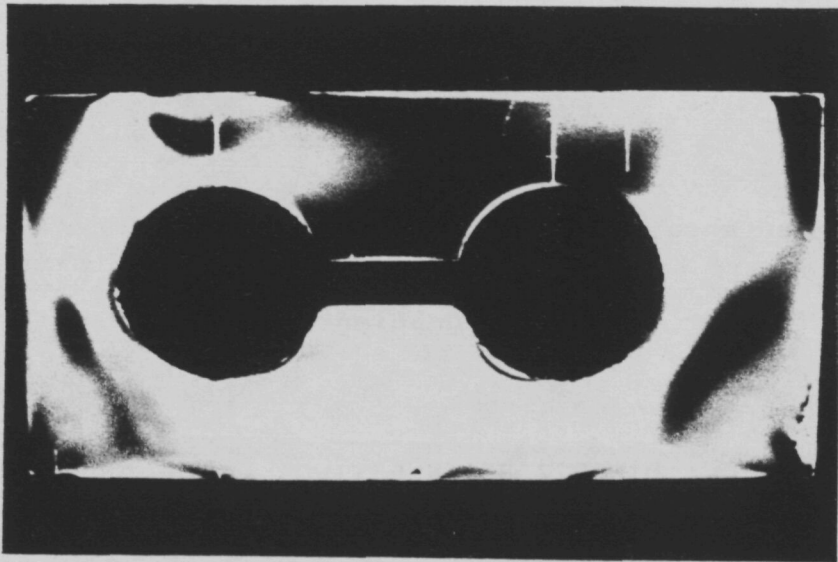
BINARIZADO SELECTIVO

En nuestro caso hemos utilizado un método original basado en la adición de imágenes obtenidas por :

- 1º) Rotación sistemática del conjunto P L A.
- 2º) Cambio de longitud de onda λ .



3-2 Imagen fotoelástica completa.



3-3 Primer paso : Atenuación de isoclinas e isocromáticas.

El resultado es que solo existen pixels de baja intensidad para puntos no pertenecientes al modelo. (Fig.3-3).

El siguiente paso es la binarización del registro con un bajo nivel umbral, cercano a I_f . La operación discrimina en valores 0 ó 1, a los pixels exteriores e interiores respectivamente. (Fig.3-4).

Z = 0 pixel externo.
 Z = 250 pixel modelo.

Finalmente, la aplicación del operador laplaciano nos proporciona la franja del contorno, aprovechando el fuerte gradiente existente en el mismo. (Fig.3-5).

Operador laplaciano :

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

(3-1)

Un segundo binarizado permite seleccionar el espesor del contorno.

Sobre el registro resultante puede incorporarse información adicional aprovechando los 256 niveles de gris disponibles. Así :

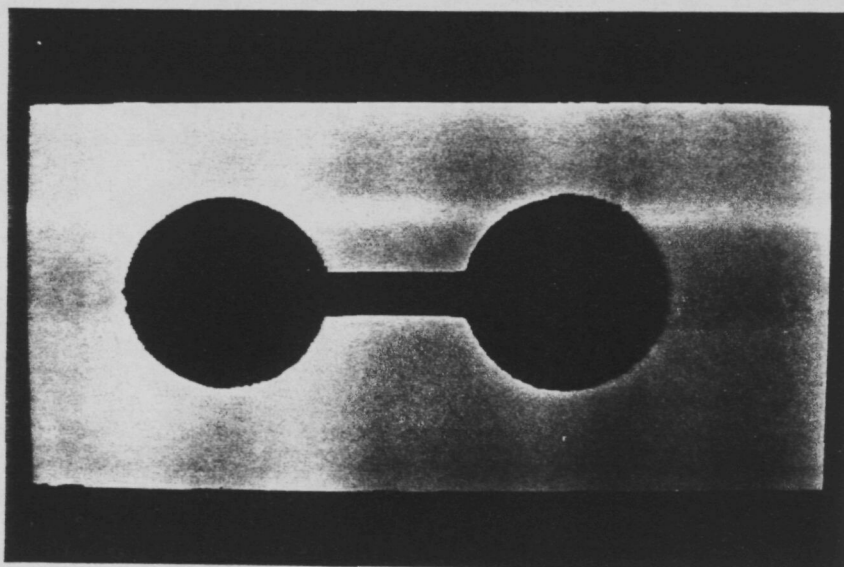
Pixels exteriores : Z = 220
 Pixels interiores : Z = 250
 Pixels contorno : Z = 0 a 200

Por tanto, las cargas externas aplicadas al contorno o el signo de las tensiones de borde , pueden quedar implícitas en la imagen con una resolución de ± 100 niveles. (Fig.3-6)

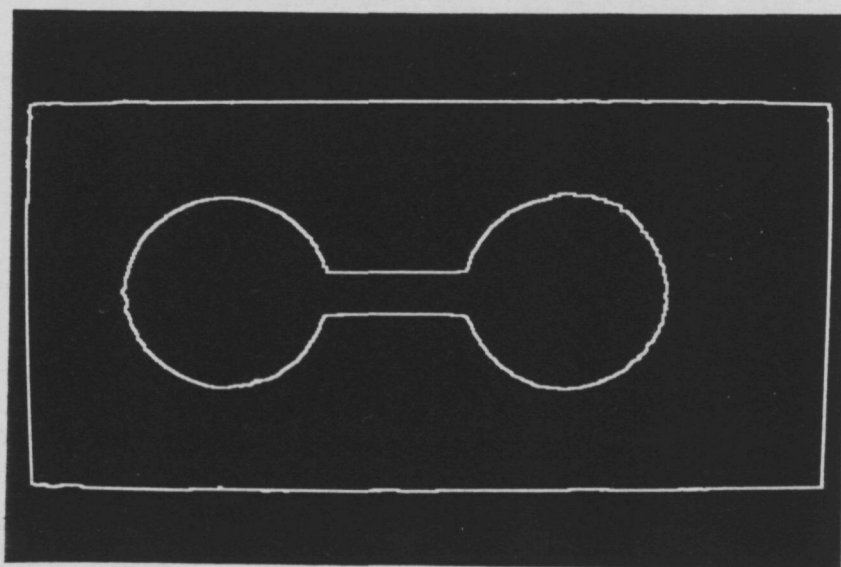
El resultado final se archiva en un registro denominado CONT.IMG y que constituirá el control maestro del proceso.

La aplicación de este método nos ha presentado problemas en algunos casos concretos :

Puntos Isotrópicos y Singulares : Con birrefringencia nula independientemente de la longitud de onda L_i utilizada.



3-4 Segundo paso : Binarización con baja intensidad umbral T_0 .



3-5 Tercer paso : Aplicación del operador Laplaciano.

Zonas cuasi sin Tensión : En algunos casos existen modelos con zonas poco solicitadas o con unos niveles de tensión reducidos. Particularmente los diedros de contorno exentos de carga externa.

La intensidad es parecida a I_f y la binarización exige una elección crítica del umbral de corte T_o . La falta de uniformidad perfecta en la iluminación complica más el problema.

En la práctica, si el contorno de la pieza ha sido correctamente detectado, la eliminación de zonas o puntos indeseables es efectuada de forma manual, corrigiendolos mediante las operaciones gráficas.

Otro método que proporciona resultados aceptables consiste en tomar la imagen del modelo descargado. Los bordes aparecen iluminados debido a la birrefringencia inicial consecuencia de la absorción de humedad.

Aplicando un operador gradiente se extrae el contorno. El inconveniente principal reside en que los movimientos y deformaciones de la puesta en carga disminuyen la precisión del registro inicial.

La teoría del tratamiento de imagen nos proporciona unas sofisticaciones que podrán sernos útiles en algunos casos :

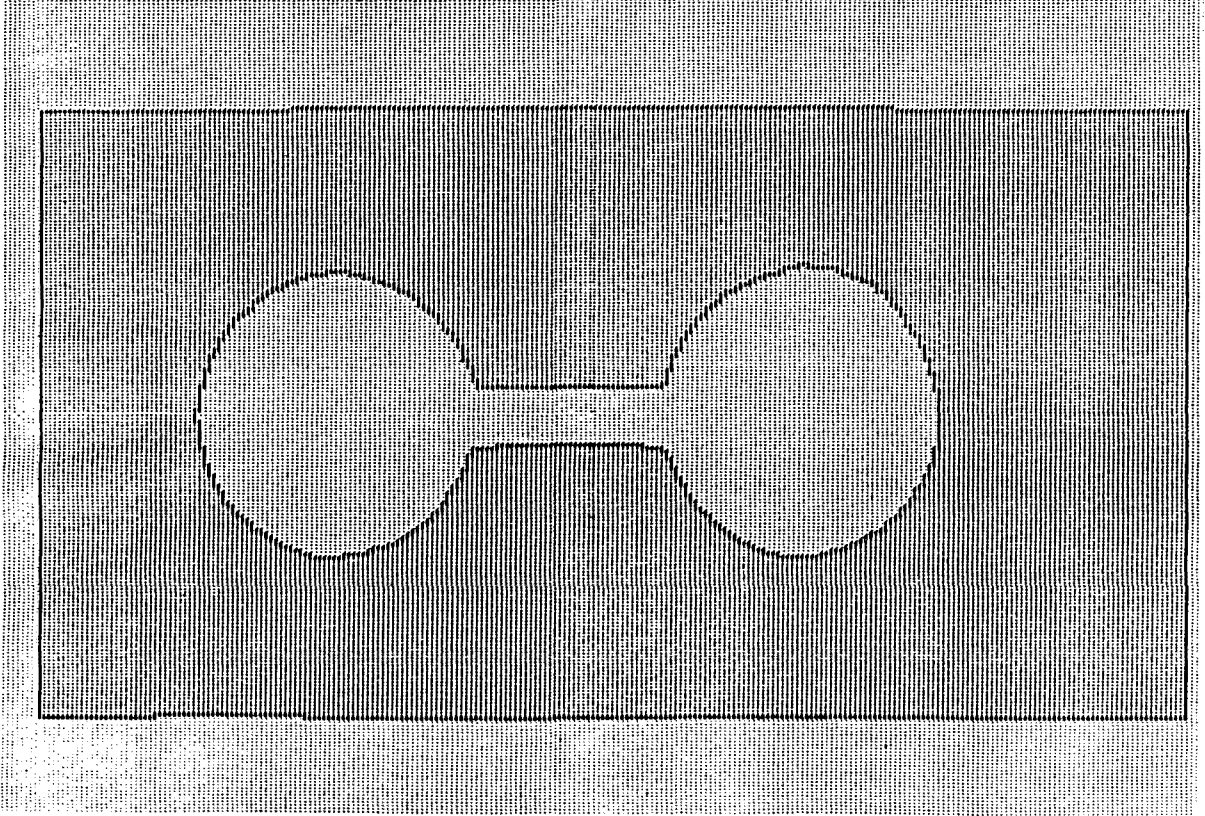
- Selección del umbral óptimo de binarizado T_o^* :
Mediante un estudio estadístico del histograma (Fig.3-7) puede evaluarse una intensidad T_o^* que discrimine adecuadamente los pixels interiores y externos. Aplicando T_o^* en el proceso de binarización obtendremos la automatización de la etapa.
- Umbral adaptativo :
En caso de falta de uniformidad podemos realizar el análisis separadamente en zonas de imagen.

OPERADORES DE GRADIENTE

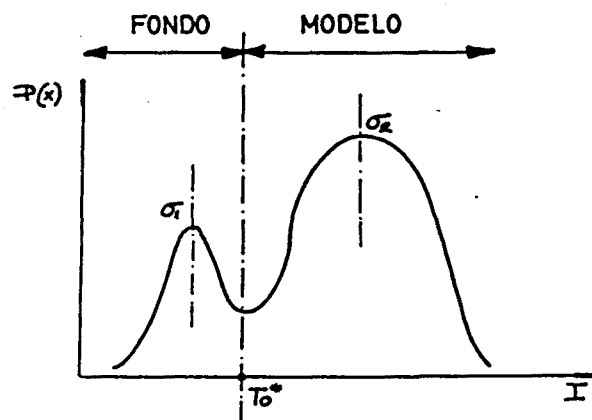
Es una alternativa al proceso anterior. Consiste en aplicar operadores diferenciales aproximados a la imagen fotoelástica, exenta en lo posible de isoclinas e isocromáticas. El gradiente de la función intensidad luminosa en un pixel (I de variables espaciales X e Y) tiene su máxima variación en el contorno. El módulo del gradiente indica la cantidad o fuerza de variación.

Si : S_x = Derivada direccional según x
 S_y = Derivada direccional según y

. Pixel exterior .. Nivel Z= 220
 + Pixel modelo ... Nivel Z= 250
 ■ Contorno Nivel Z= 100



3-6 Claves de nivel para el archivo CONT.IMG.



3-7 Selección automática del umbral óptimo T_{0*} de binarizado.

El gradiente S en módulo será proporcional a :

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

O en forma aproximada y de mayor rapidez computacional :

$$S = |S_x| + |S_y|$$

El operador de Roberts tiene como máscara de convolución con la imagen :

Za	Zb
Zc	Zd

$$S = \sqrt{(Z_a - Z_d)^2 + (Z_b - Z_c)^2}$$

y tiene el inconveniente de que genera un excesivo ruido en el resultado.

El conocido operador de Sobel proporciona un suavizado en el registro final, ponderando adecuadamente el peso específico de cada término. Así :

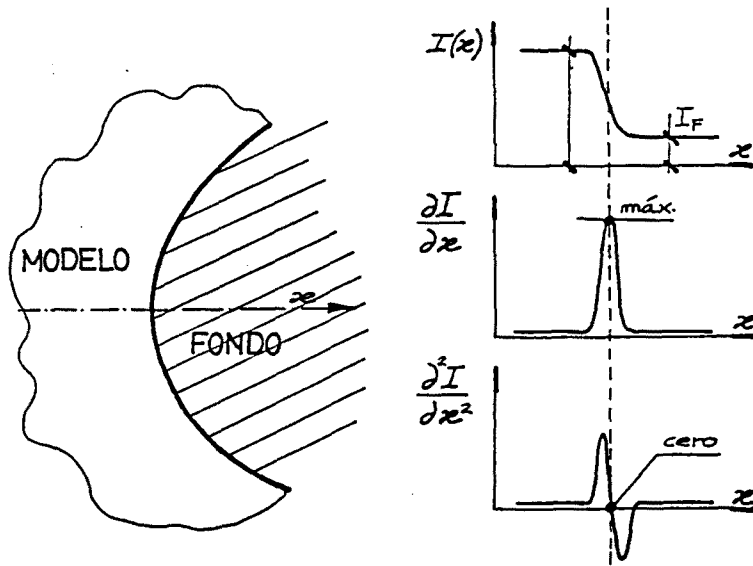
Sx =	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 5px;">-1</td><td style="padding: 5px;">0</td><td style="padding: 5px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">-2</td><td style="padding: 5px;">0</td><td style="padding: 5px;">2</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">-1</td><td style="padding: 5px;">0</td><td style="padding: 5px;">1</td></tr> </table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	0	1								
-2	0	2								
-1	0	1								

Sy =	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 5px;">1</td><td style="padding: 5px;">2</td><td style="padding: 5px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">0</td><td style="padding: 5px;">0</td><td style="padding: 5px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">-1</td><td style="padding: 5px;">-2</td><td style="padding: 5px;">-1</td></tr> </table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1
1	2	1								
0	0	0								
-1	-2	-1								

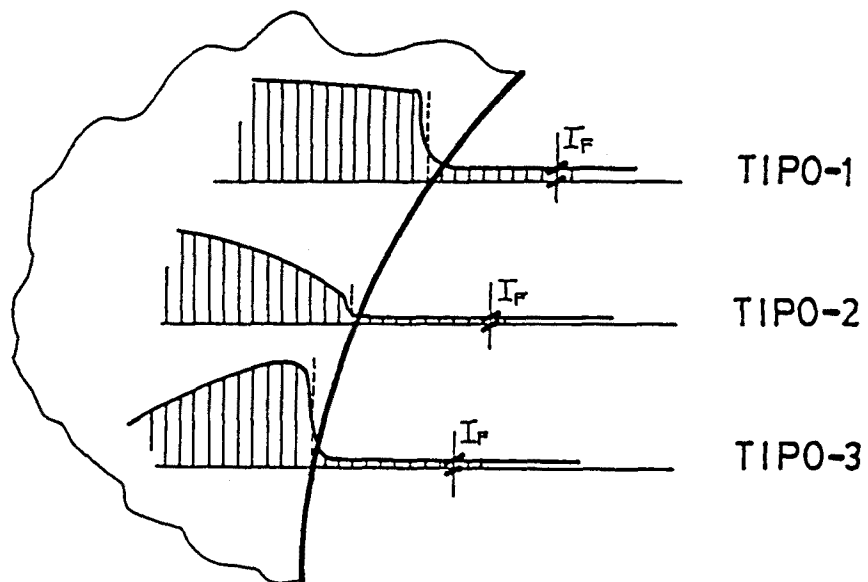
Una vez obtenida la "imagen gradiente" con cualquiera de los operadores disponibles, se binariza la imagen contrastada con un cierto umbral T_0 .

Otros métodos se basan en el estudio de la segunda derivada. La Figura 3-8 aclara los conceptos de forma global :

- La simple binarización discrimina los escalones de intensidad.
- En los operadores gradiente, los valores máximos se encuentran en el contorno dependiendo del grado de variación de la intensidad.
- Dichos máximos al efectuar la segunda derivación son pasos por cero.



3-8 Detección generalizada del contorno.



3-9 Variación de intensidad en el contorno de un registro fotoelástico.

Pero en los registros fotoelásticos, los contornos no poseen necesariamente una variación brusca de intensidad. Esta razón provoca que la mayoría de sistemas estándar de detección de borde, no sean operativos en Fotoelasticidad.

La Figura 3-9 nos visualiza esta afirmación. El tipo 2 no genera gradientes elevados, siendo un caso usual en contornos exentos de tensión y cuasi presente siempre en diedros rectos.

CONCLUSIONES

Hemos llegado a la conclusión que el método de Binarizado Selectivo es el que cumple más satisfactoriamente el cometido de obtener contornos de imágenes fotoelásticas.

Algunos investigadores han solventado el problema incorporando una lámina opaca a modo de fondo artificial, con las consecuentes interferencias con los mecanismos de puesta en carga. No obstante, con modelos en técnica de congelación de tensiones puede ser una solución aceptable.

Finalmente, cabe destacar una variante original, apta exclusivamente para Fotoelasticidad por reflexión, y que es desarrollada en el Apart.4-2.

3.2 ANGULO DE ISOCLINA

En cada punto de un sistema de tensiones bidimensional existen dos tensiones principales (Anexo I), tal que :

$$\sigma_p \geq \sigma_q$$

cuyas direcciones estan relacionadas por la expresi3n (A-30) :

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \implies \theta_p \ \theta_q$$

proporcionando dos raices que forman un 3ngulo de 90° y definiendo las direcciones de p y q respectivamente.

Se denomina linea 33 franja is3clina al lugar geom3trico de puntos en que las direcciones principales tienen la misma inclinaci3n.

Su par3metro ϕ se mide usualmente a partir del eje positivo X, en sentido directo y respecto a la direcci3n principal m3s pr3xima. Por tanto, el 3ngulo de isoclina ϕ no es nunca negativo, ni mayor que 90°.

Sobre un punto concreto solo pasa una isoclina, salvo el caso de ser isotr3pico.

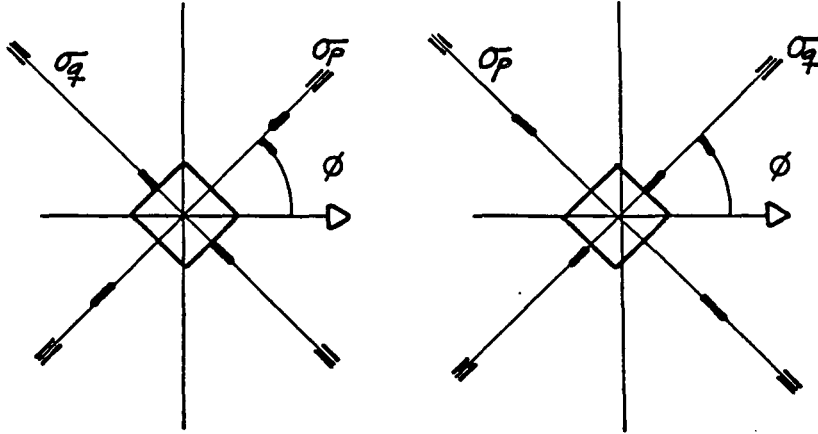
Aparece una clara indeterminaci3n : se conoce la inclinaci3n de las direcciones principales pero respecto a una indefinida. (Fig. 3-10a). Este problema se evidencia al intentar obtener la resoluci3n completa del estado tensional.

En nuestro caso, hemos eliminado formalmente dicha ambigüedad trabajando con el 3ngulo de isoclina corregido ϕ^* .

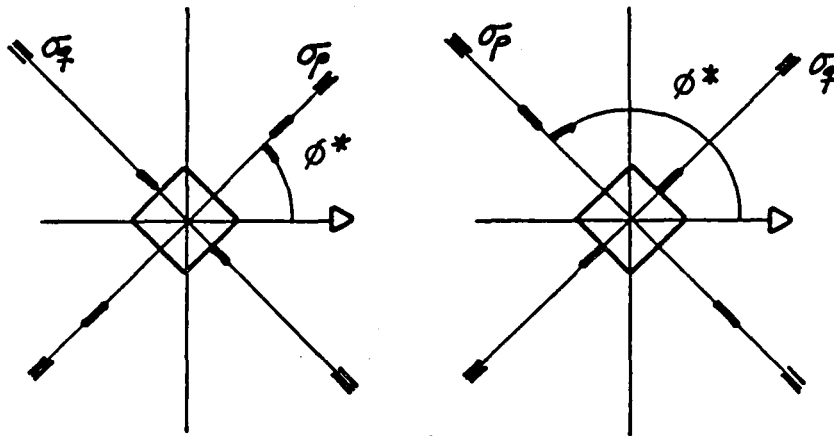
El convenio adoptado obliga a referir el 3ngulo directo entre la tensi3n principal mayor σ_p y el eje X positivo.

Así ϕ^* varia entre 0° y 179°. (Fig.3-10b).

$$0^\circ \leq \phi < 90^\circ$$



3-10a Ambigüedad en el parámetro de isóclina.



$$0^\circ \leq \phi^* < 180^\circ$$

3-10b Eliminación formal de la indeterminación mediante el ángulo de isóclina corregido

La corrección se efectúa manualmente a partir de la observación de las tensiones de contorno, simetría de la pieza y otros . Adicionalmente se dispone del trazado completo de líneas isostáticas (Apart. 3.3) y por consiguiente pueden utilizarse sus importantes propiedades [Ref.5].

En la actualidad estamos formulando algoritmos que de forma experimental o bien por observación programada del registro, nos permitan automatizar esta etapa.

OBTENCION CLASICA DE ISOCLINAS

Debe proyectarse la imagen del modelo sobre un papel tipo traslúcido y manualmente trazar las líneas isóclinas procurando seguir la línea media de las franjas, usualmente no bien delimitadas.

El principal inconveniente reside en la existencia simultánea de isocromáticas en la imagen.

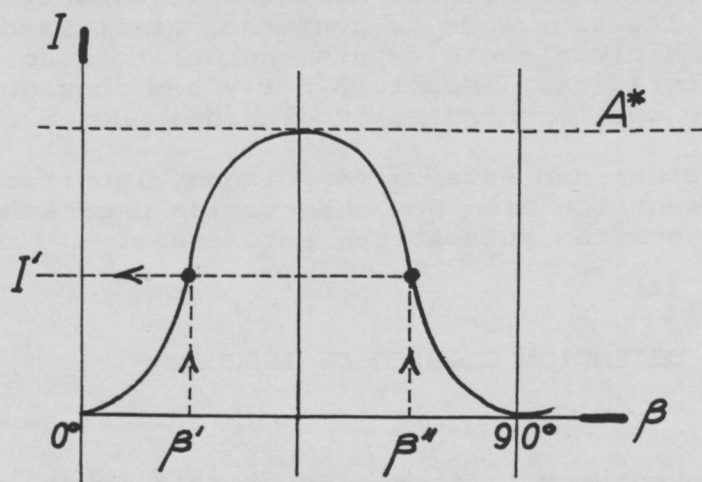
Puede trabajarse con luz blanca en vez de monocromática. Se aumenta la nitidez de las isoclinas, al atenuarse y tomar color las franjas isocromáticas.

Otro método consiste en trabajar con baja carga, de forma que el nivel de tensiones no provoque la aparición del primer orden de extinción $N \leq 1$. No es viable trabajar en técnica de congelación de tensiones . Además la birrefringencia inicial se superpone a las del ensayo de bajo nivel desvirtuando así el registro.

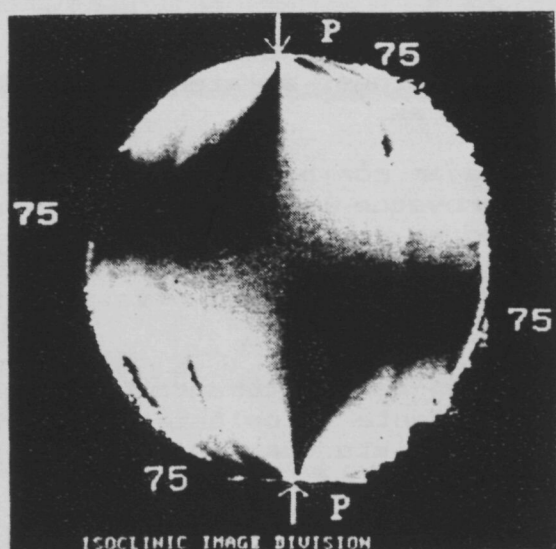
Mejores resultados se consiguen manufacturando un modelo clónico exprofeso, con baja constante fotoelástica F . Materiales como el vidrio y el metacrilato cumplen este cometido.

Evidentemente, lo ideal sería que un solo modelo fotoelástico proporcionarse directamente el registro de isoclinas, incluso con tensiones retenidas o congeladas.

Se ha trabajado en este sentido utilizando la técnica de tratamiento de imagen y automatizando finalmente el proceso.



3-11 Doble solución en la medida simple de intensidades.



$$\text{PLA } I = I_0 \operatorname{sen}^2 \frac{\delta\pi}{\lambda} \operatorname{sen}^2 2\beta$$

$$\text{PLA} + 1/4 \quad I' = I_0 \operatorname{sen}^2 \frac{\delta\pi}{\lambda}$$

$$\frac{I}{I'} = \operatorname{sen}^2 2\beta \quad \text{---} \quad \beta$$

3-12 Obtención del ángulo de isoclina mediante el cociente de imágenes en polariscopio plano y circular, según J.Y. Yao (1987)

3.2.1 Principios de medida

Hemos formulado dos sistemas originales para registrar y procesar isóclinas :

- Metodo Fotométrico : Basado en la medida, para un mismo punto o pixel, de su intensidad con diferentes inclinaciones del conjunto P_{LA}. Conduce a una expresión residual o de error E, cuya evaluación proporciona ϕ .
- Metodo de Binarización Espectral : Se comparan mediante el operador lógico Y las imagenes registradas con diferentes longitudes de onda Li. Se corrige el ángulo ϕ , obteniendo ϕ^* .

Se ha desarrollado con más detalle este último, hasta hacerlo operativo e incorporarlo al programa general de cálculo.

METODO FOTOMETRICO

Constituye una resolución analógica del problema. La intensidad luminosa, en un polariscopio PLA, tiene como expresión :

$$I = I_0 \operatorname{sen}^2 \frac{\delta\pi}{\lambda} \operatorname{sen}^2 2\beta$$

Para un punto o pixel determinado, la intensidad incidente I_0 y el retardo δ son constantes e independientes de la inclinación β .

Así :

$$I = A^* \operatorname{sen}^2 2\beta \quad A^* = \text{cte} = I_0 \operatorname{sen}^2 \frac{\delta\pi}{\lambda}$$

La relación entre I y β no es biunívoca, la medida de una cierta intensidad I nos proporciona dos soluciones posibles (Fig.3-11).

Además es preciso el conocimiento previo de los terminos de A^* : I_0 y el retardo δ .

El cociente de imágenes obtenidas en un polariscopio plano y circular respectivamente [Ref.44] (Fig.3-12), no pro-

porciona un resultado aceptable. Entre otras, las razones son :

- La intensidad luminosa en ambas configuraciones no es la misma $I_0 \neq I_0 (L/4)$.
- En la práctica es difícil conseguir la eliminación total de la influencia del retardo δ .

Por nuestra parte, proponemos un algoritmo original que nos permita solventar la ambigüedad en la determinación de ϕ sin recurrir a láminas $L/4$.

Para fijar ideas, nos limitaremos a la comparación entre cuatro imágenes obtenidas con las siguientes inclinaciones del conjunto $P \perp A$:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0^\circ \\ \alpha_2 &= 22.5^\circ \\ \alpha_3 &= 45^\circ \\ \alpha_4 &= 67.5^\circ \end{aligned} \quad \Delta \alpha = 22.5^\circ$$

Así, para un pixel determinado :

$$\begin{aligned} I_1 &= A \star \text{sen}^2 2\beta \\ I_2 &= A \star \text{sen}^2 2(\beta+22.5^\circ) \\ I_3 &= A \star \text{sen}^2 2(\beta+45^\circ) \\ I_4 &= A \star \text{sen}^2 2(\beta+67.5^\circ) \end{aligned}$$

Los cocientes relativos :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A \star \text{sen}^2 2\beta}{A \star \text{sen}^2 2(\beta+22.5^\circ)} \quad \frac{I_3}{I_4} = \frac{A \star \text{sen}^2 2(\beta+45^\circ)}{A \star \text{sen}^2 2(\beta+67.5^\circ)}$$

Si la respuesta de la cámara ha sido corregida, obtendremos unos niveles de medida respectivos :

$$\begin{matrix} \star & \star & \star & \star \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{matrix}$$

y con independencia de los valores absolutos, se verificará la proporcionalidad :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{z_1^*}{z_2^*} \quad \frac{I_3}{I_4} = \frac{z_3^*}{z_4^*}$$

Igualdades que no serán exactas ya que se trata de medidas experimentales y por tanto sujetas a todo tipo de factores modificativos.

No obstante, puede plantearse una función error, E, que constituye un residual :

$$E = \left| \frac{z_1^*}{z_2^*} + \frac{z_3^*}{z_4^*} - \frac{\text{sen}^2 2\beta}{\text{sen}^2 2(\beta+22.5^\circ)} - \frac{\text{sen}^2 2(\beta+45^\circ)}{\text{sen}^2 2(\beta+67.5^\circ)} \right|$$

y por tanto su mínimo nos proporciona la solución :

$$E \text{ min} \implies \beta \text{ solución} \xrightarrow{\alpha_1 = 0} \phi$$

El algoritmo debe plantearse para cada punto o pixel perteneciente al modelo.

La generalización del método a más de cuatro registros, aumentará la precisión a costa de una pérdida de velocidad computacional.

En cambio, con tan solo dos medidas separadas $\Delta\alpha$:

$$I_1 = A^* \text{sen}^2 2\beta$$

$$I_2 = A^* \text{sen}^2 2(\beta+\Delta\alpha)$$

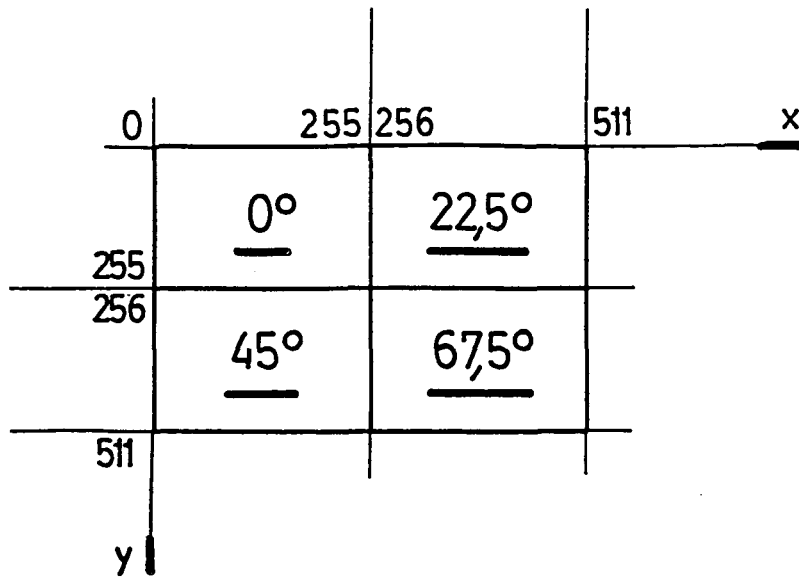
El cociente :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A^* \text{sen}^2 2\beta}{A^* \text{sen}^2 2(\beta+\Delta\alpha)} = \frac{z_1^*}{z_2^*}$$

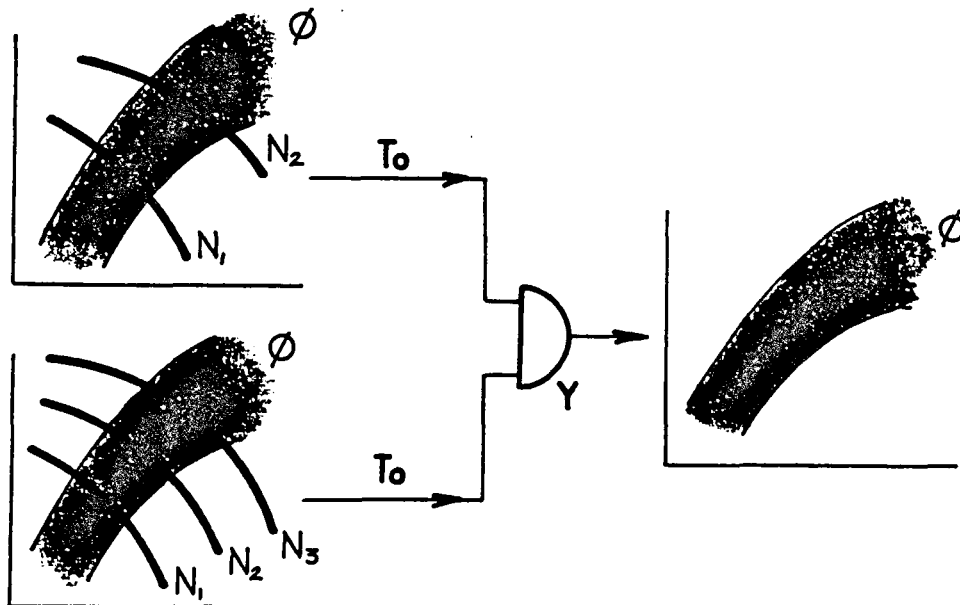
Puede plantearse la obtención analítica directa . Como :

$$\text{sen}(A+B) = \text{sen} A \cos B + \cos A \text{sen} B$$

Operando queda la expresión :



3-13 Utilización de la memoria Frame de la placa conversora A/D .



3-14 Metodo de Binarización Espectral.

$$\tan 2\beta = \frac{\sin 2\Delta\alpha}{\sqrt{\frac{z_2^*}{z_1^*} + \cos 2\Delta\alpha}}$$

Y en el caso particular que $\Delta\alpha = 45^\circ$:

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \sqrt{\frac{z_1^*}{z_2^*}}$$

con problemas de indeterminación singular.

Con una resolución de 256 x 256 pixels, la memoria tipo Frame de la placa digitalizadora permite el almacenado simultáneo de cuatro registros independientes. Pueden visualizarse en pantalla del monitor (Fig.3-13). Se accede directamente al nivel dentro del programa principal y la memoria RAM del ordenador queda libre de todo gravámen.

En consecuencia, la toma de cuatro medidas Z^* es una solución de compromiso operatividad-precisión del método.

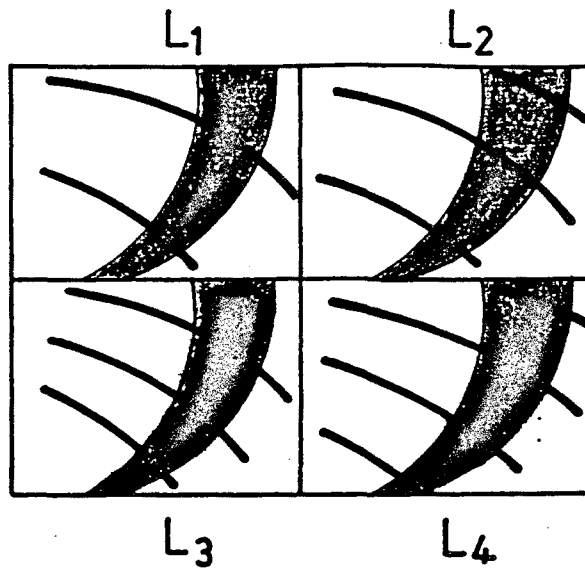
La toma de imágenes debe realizarse con baja carga del modelo, al objeto de evitar $N \leq 1$. Si esto no es posible, por ejemplo utilizando técnica de congelación de tensiones, se promedian imágenes registradas con diferente longitud de onda L_i ó directamente con luz blanca. Así se evitan las isocromáticas absolutas que impedirían el estudio de intensidad en el pixel.

METODO DE BINARIZACION ESPECTRAL

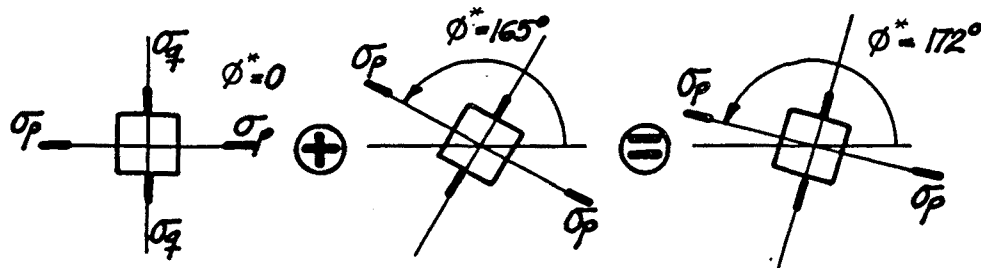
Es un método de resolución digital.

La estrategia se basa en que las franjas isocromáticas evolucionan sobre el modelo según la longitud de onda utilizada. No sucede lo mismo con las franjas isóclinas que permanecen constantes.

Por tanto una adecuada comparación entre dos imágenes binarizadas obtenidas con diferente longitud de onda nos permite discriminar isóclinas e isocromáticas. Dicha compara-



3-15 Generalización del proceso a varias longitudes de onda.



3-16 Promedio correcto de valores angulares discretos.

ción es realizada por el conocido operador lógico Y , cuya tabla de operación es :

0	Y	0	⇒⇒⇒	0
0	Y	1	⇒⇒⇒	0
1	Y	0	⇒⇒⇒	0
1	Y	1	⇒⇒⇒	1

La Fig-14 nos esquematiza claramente el proceso. Los puntos isotrópicos son detectados pero confundidos con la isóclina correspondiente.

Una generalización del método a cuatro longitudes de onda:

$$L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad L_4$$

permite aumentar la resolución del proceso, ya que la evaluación de isocromáticas es más clara y definida. (Fig. 3-15). Así :

$$L_1 \quad Y \quad L_2 \quad Y \quad L_3 \quad Y \quad L_4$$

En definitiva obtendremos un registro binarizado para un cierto ángulo ϕ , es decir los pixels en que las direcciones principales forman un ángulo cercano a ϕ respecto al eje horizontal y en particular los puntos isotrópicos.

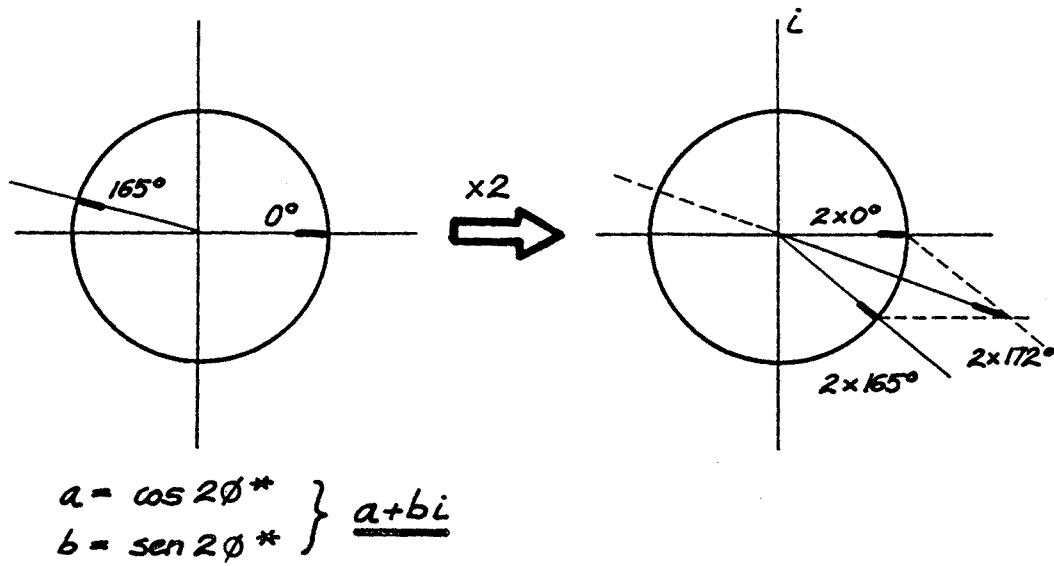
Es necesario corregir manualmente el ángulo ϕ para cada franja, quedando almacenado ϕ^* .

Hemos decidido que un incremento angular de 15° entre registros, y por tanto con un total de 6 imágenes :

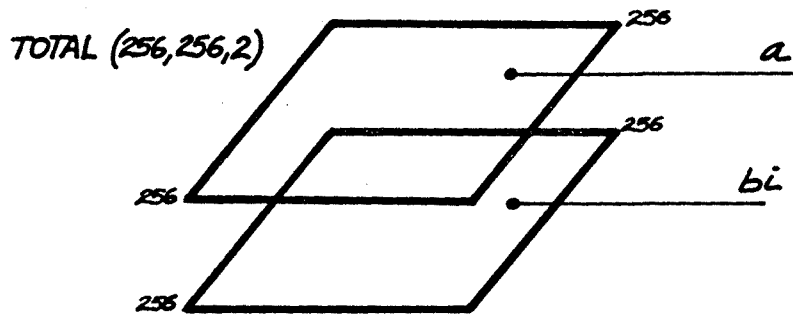
$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_4 = 45^\circ$
$\phi_2 = 15^\circ$	$\phi_5 = 60^\circ$
$\phi_3 = 30^\circ$	$\phi_6 = 75^\circ$

proporciona una precisión suficiente, si además se incorporan unas funciones de interpolación y suavizado al proceso.

La tarea la realiza el programa ISOCCLIN. FOR.



3-17 Utilización de la variable compleja.



3-18 Artificio de almacenado.

El algoritmo de análisis parte de los archivos del ángulo de isóclina corregido : IC - ϕ .IMG.

IC - 0. IMG	IC - 45. IMG
IC - 15. IMG	IC - 60. IMG
IC - 30. IMG	IC - 75. IMG

Todo el proceso esta controlado por el archivo CONT.IMG, correspondiente al contorno del modelo.

Para un pixel o punto concreto puede existir información redundante debido a que su valor real es intermedio a los valores discretos ϕ^* . Su obtención no puede realizarse mediante un promedio trivial.

Para fijar ideas, supongamos que tengamos valores simultaneos (Fig.3-16) : 0° y 165° . Mediante una interpolación lineal, el angulo tendrá un valor cercano a 172° . En cambio, un promedio simple nos proporcionaría un resultado incorrecto de $82,5^\circ$.

Se ha resuelto operativamente el problema mediante la utilización de la variable compleja en ángulo doble. (Fig.3-17)

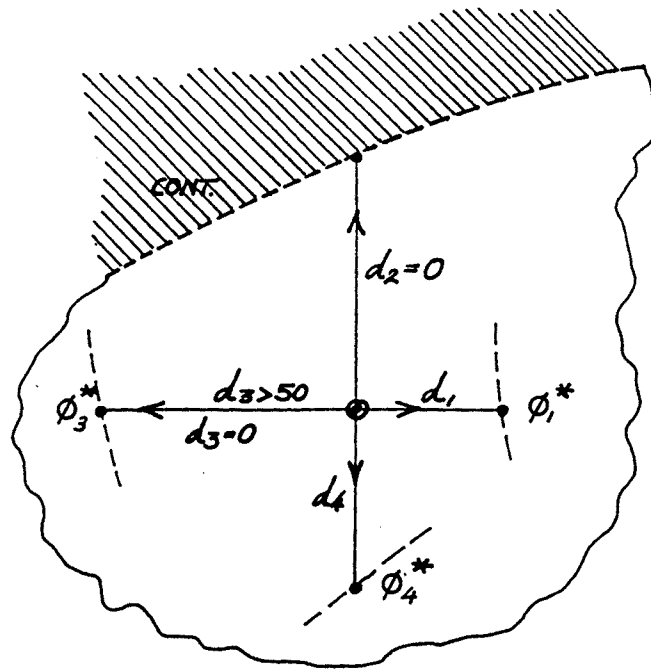
Con una resolución de 256×256 pixels se precisa una capacidad de almacenado superior a 1.0 MB, ya que el número complejo ocupa 16 bytes. En la práctica hemos recurrido a una matriz de dos capas de números enteros, discriminando la parte real e imaginaria respectivamente (Fig.3-18) y ocupando un total de 262 KB.

Una vez promediados todos los archivos IC- ϕ .IMG, existirán pixels o puntos sin información. El programa realiza la interpolación bidimensional indicada en la Fig.3-19, eliminando su presencia.

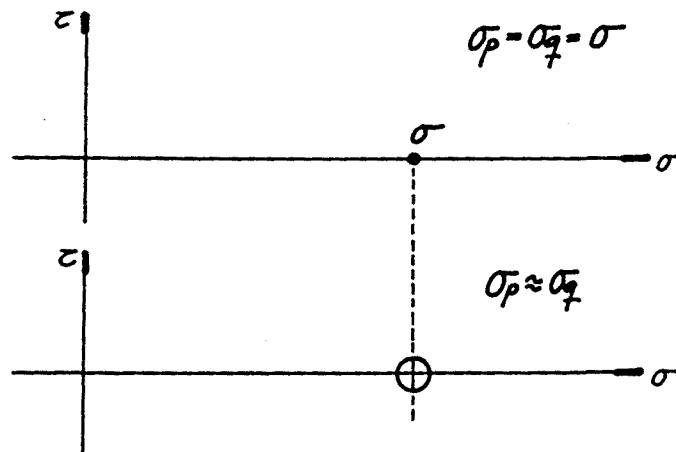
Finalmente se procede a un suavizado repetitivo del registro mediante el operador local :

1	-	1
-	2	-
1	-	1

En ambos casos la presencia del contorno es tratada adecuadamente, sino los pixels próximos al borde perderían su



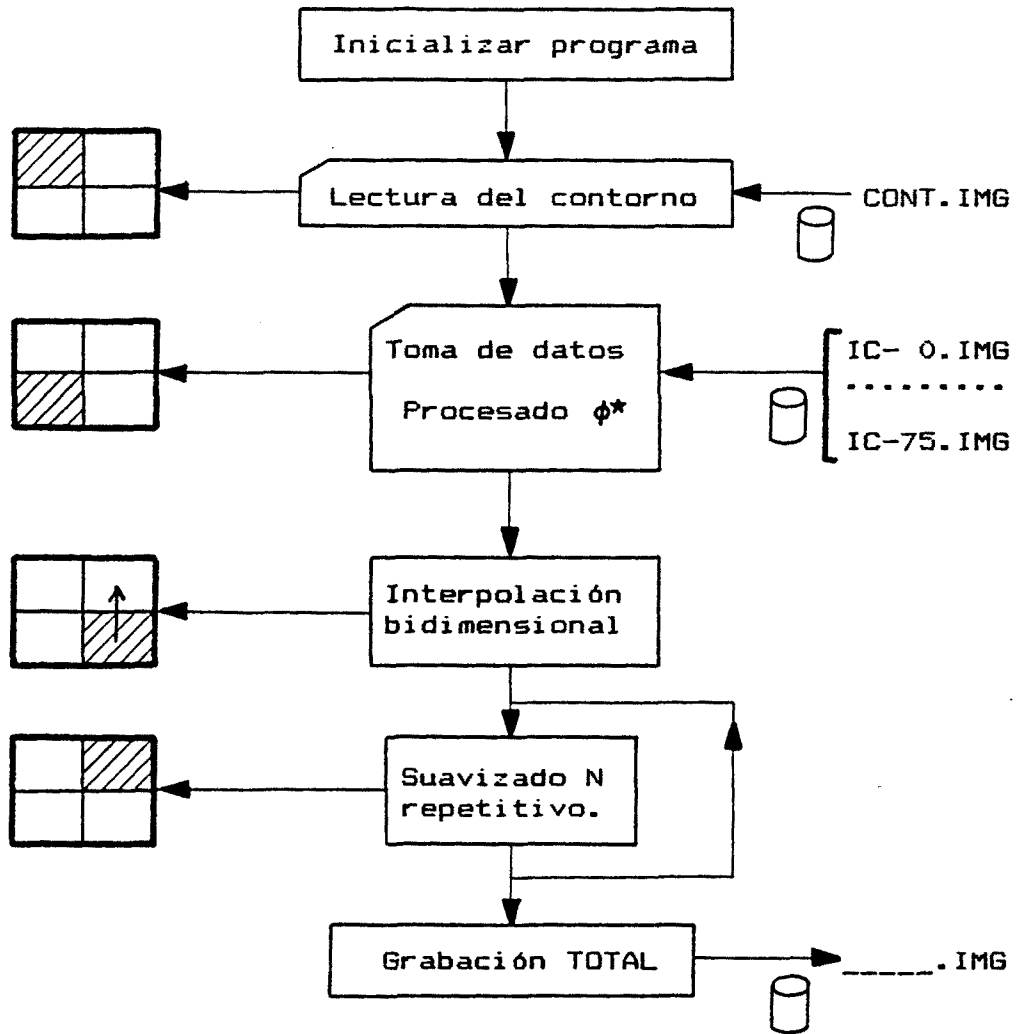
3-19 Interpolación bidimensional para pixel exento de información.



3-20 Puntos isotrópicos o cuasi-isotrópicos.

correcto valor.

El esquema operativo de ISOCLIN.FOR es en forma simplificada :



No se ha realizado ningún tratamiento especial para los puntos isotrópicos. Cualquier valor angular es solución. Debido a la continuidad del medio, para un pixel cercano:

$$\sigma_p \geq \sigma_q$$

y la influencia de ϕ^* es escasa. (Fig.3-20).

El método de Binarizado Espectral permite la obtención del

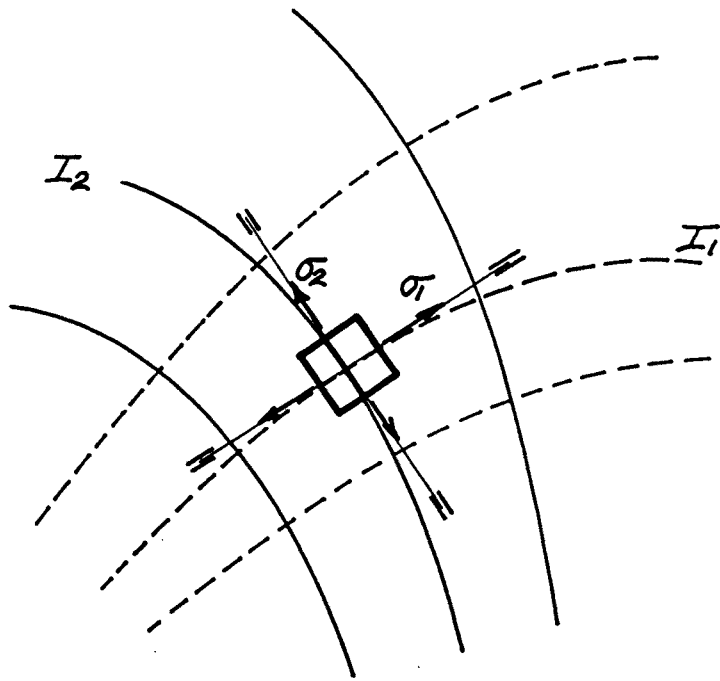
ángulo de isoclina corregido ϕ^* a partir del modelo cargado y por tanto con coexistencia de franjas isóclinas e isocromáticas.

En el caso que ambas no quedaran suficientemente diferenciadas, puede recurrirse mediante idéntico programa al procesamiento de imágenes con intensidad de carga variable. Así :

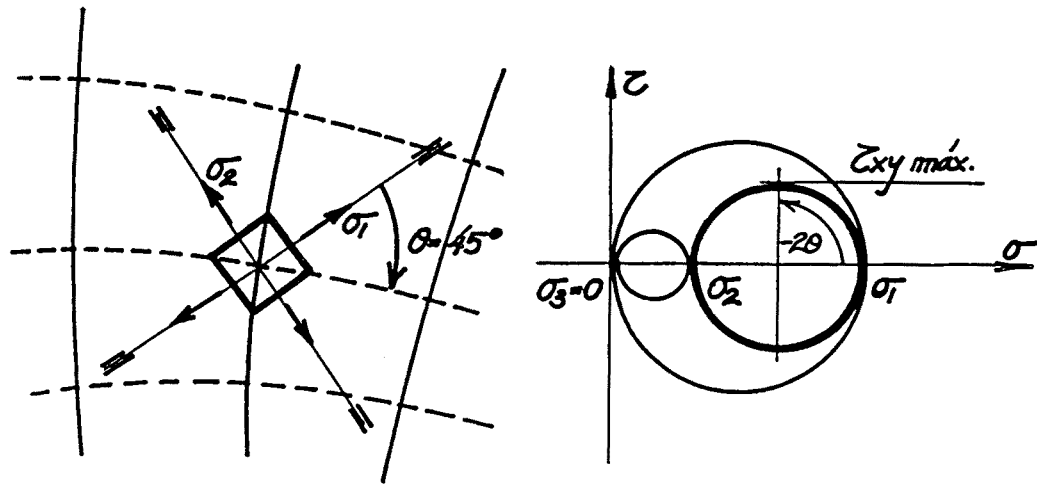
$$P_1 < P_2 < P_3 < P_4$$

$$P_i = A_i R_i$$

El efecto obtenido es más acentuado.



3-21a Líneas isostáticas.



3-21b Líneas de cizalladura máxima.

3.3 ISOSTATICAS

Las isostáticas son curvas tangentes a las direcciones principales de tensión en cada uno de sus puntos. (Fig.3-21)

Evidentemente forman una red de curvas ortogonales. Están diferenciadas en dos familias que siguen la tensión principal máxima y mínima respectivamente.

Son utilizadas en el análisis fotoelástico convencional para el estudio de :

- Puntos isotrópicos ($\sigma_p = \sigma_q$)
- Signo de las tensiones de contorno
- Líneas de integración numérica, etc...

No obstante, para un ingeniero su interés primordial reside en proporcionar una visión rápida e intuitiva del flujo de tensiones.

Esta analogía está sujeta a claras restricciones y debe cuidarse de su aplicación sistemática.

Las líneas de máxima cizalladura indican los planos sobre los cuales actúa la tensión tangencial máxima en cada punto sobre el plano de referencia xy.

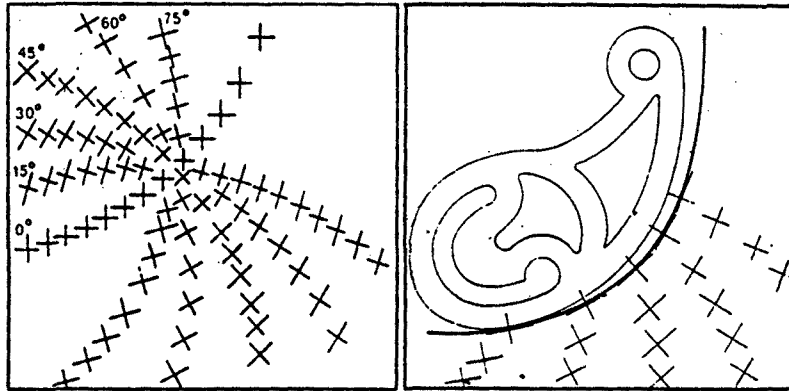
Forman una red ortogonal inclinada a 45° de las isostáticas.

Sus importantes aplicaciones están en las áreas de Criterios de Falla y Plasticidad.

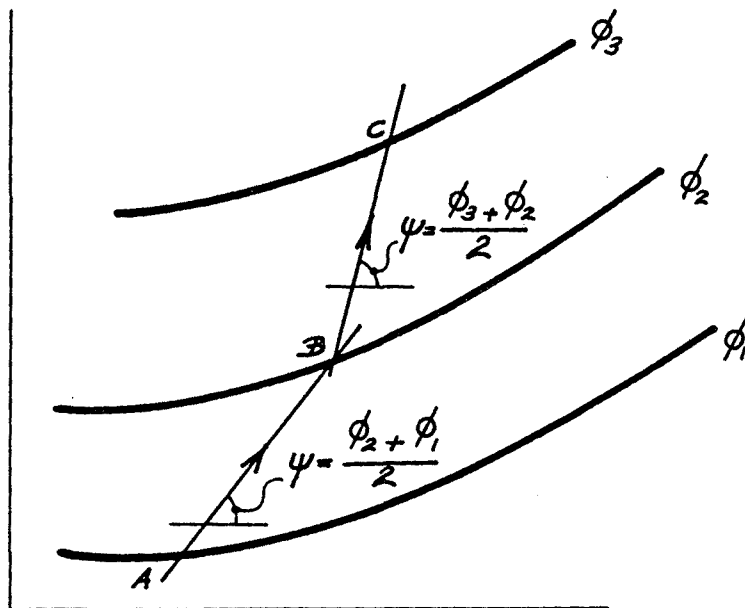
METODOS CLASICOS DE TRAZADO

Hay básicamente dos métodos para construir la red de isostáticas a partir de las líneas isóclinas dibujadas en incrementos discretos $\Delta\phi$.

1º) Método de la tangencia gráfica (Fig.3-22).



3-22 Trazado manual de isostáticas.



3-23 Obtención gráfica de isostáticas.

Se dibuja sobre cada isóclina una serie de cruces consecutivas con una inclinación coincidente con su parámetro ϕ .

A sentimiento y con la ayuda de una plantilla de curvas, se ajustan tramos variables utilizando el criterio de máxima tangencia.

2º) Metodo de las cuerdas o de Euler. (Fig.3-23).

Se aproxima la curva isostática comprendida entre dos isóclinas a un arco de circunferencia definido por una cuerda de inclinación :

$$\phi_1 \text{ y } \phi_2 \qquad \psi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

La aplicación sistemática genera una poligonal, cuya bondad de ajuste viene condicionada a la densidad experimental de isoclinas.

Existen variantes del método [Ref.5] [Ref.9], pero sin alterarlo sustancialmente.

En todos los casos son construcciones manuales de tipo gráfico.

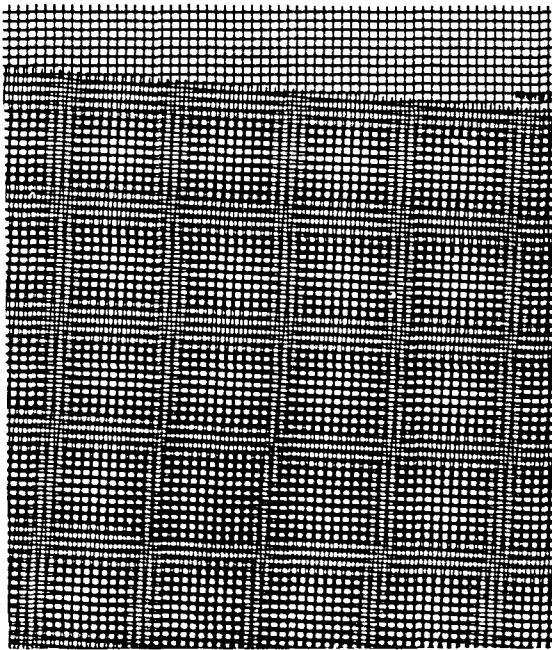
Sin embargo, es posible una automatización del proceso : Así, A. Ros Felip [Ref.13] utiliza el registro de líneas isóclinas obtenido mediante un equipo de adquisición de imagen. Emplea un algoritmo de tipo interactivo que partiendo de un punto del modelo genera la poligonal de Euler y la aproxima mediante splines cúbicos. (Fig.1-19).

Puede concluirse que el tema queda cerrado en esta vertiente.

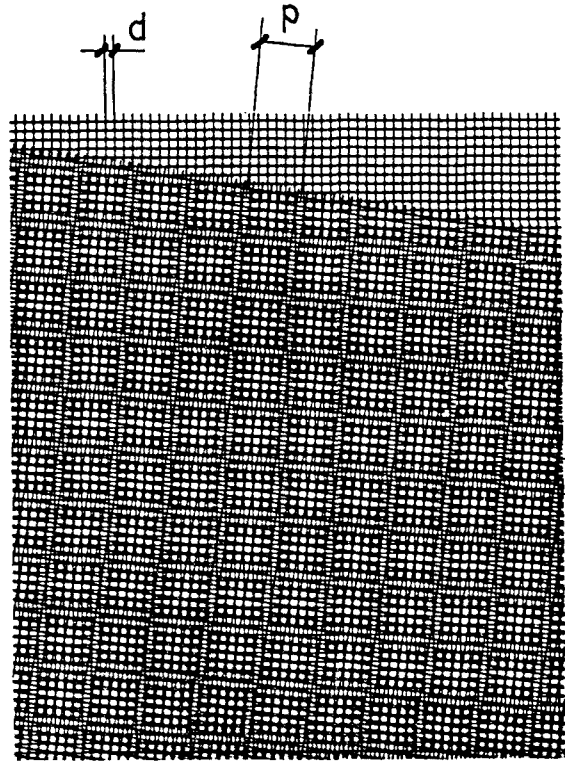
En nuestro caso, hemos seguido una vía original de trabajo adaptando un método experimental de procedencia fotográfica a la técnica de adquisición y tratamiento de imagen por ordenador.

REGISTRO EXPERIMENTAL DE PSEUDO-ISOSTATICAS

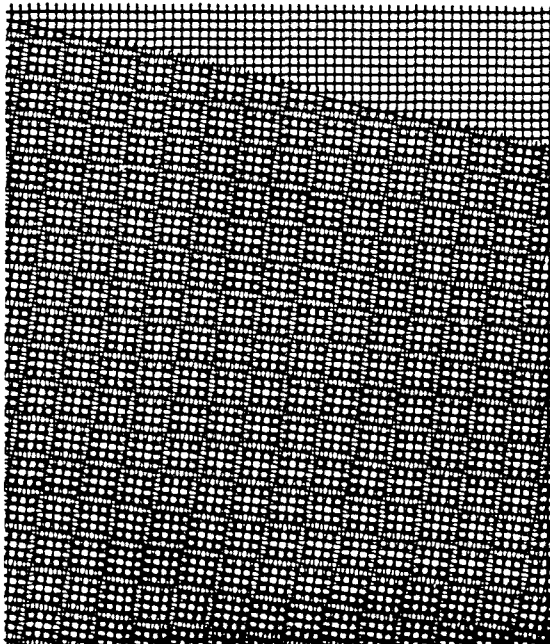
Consiste en superponer a la imagen fotoelástica convencional una trama o retícula posicionada θ_j según la isóclina existente ϕ_j .



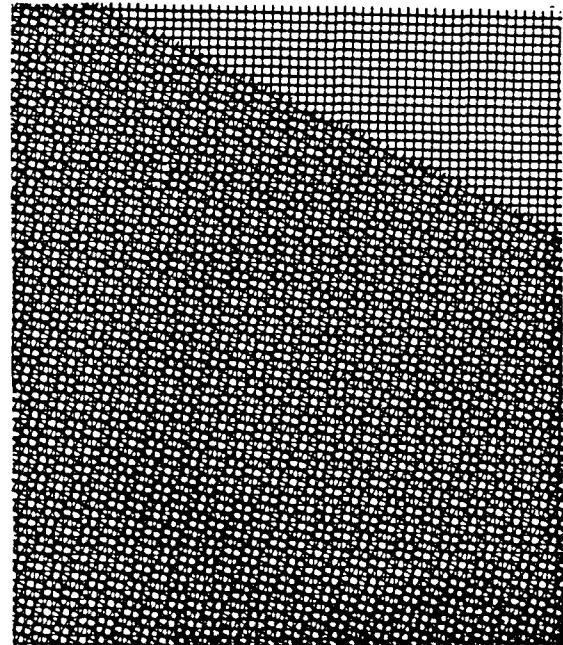
$\Delta\theta = 5^\circ$



$\Delta\theta = 10^\circ$



$\Delta\theta = 15^\circ$



$\Delta\theta = 25^\circ$

3-24 Interferencia entre retículas idénticas según el parámetro $\Delta\theta$.

La exposición sobre una misma película fotográfica de todos los n registros, provoca la aparición de un efecto moiré [Ref.30].

La intensidad de la trama θ_j queda modulada por el ángulo β que forman las direcciones principales respecto al conjunto P_{LA} :

$$I = I_0 \text{ sen}^2 N\pi \text{ sen}^2 2\beta = \text{Cte} \text{ sen}^2 2\beta$$

Como la función senoidal tiene una fuerte variación, en la práctica solo se superponen dos o tres retículas, dependiendo del incremento angular elegido :

$$\Delta\theta = \frac{90^\circ}{n}$$

En la Fig.3-24 se muestran las interferencias provocadas por dos tramas de idéntico paso y posicionadas con una inclinación relativa variable.

Puede observarse que para ángulos superiores a 30° el efecto moiré se hace confuso y prácticamente desaparece.

Un estudio más detallado del fenómeno desborda el contenido del apartado. Utilizaremos directamente sus conclusiones. [Ref.31] :

- El paso interfranjas P es función del paso de trama d y la inclinación relativa :

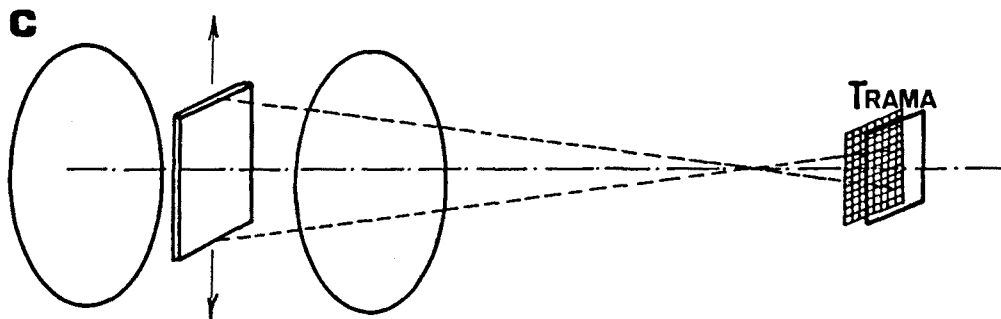
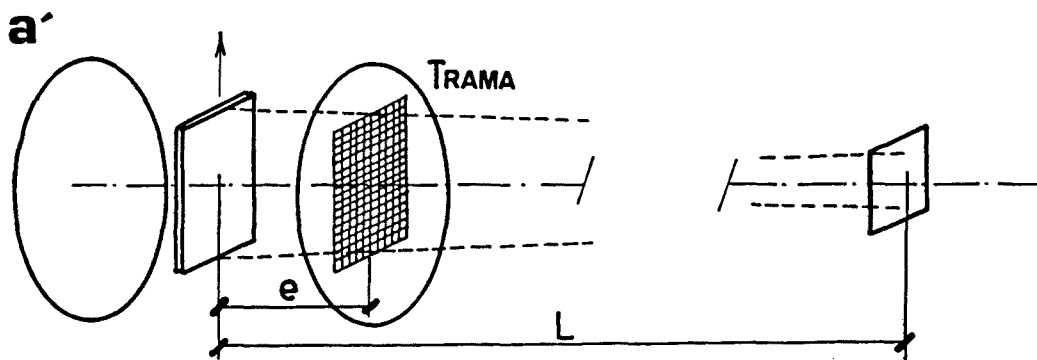
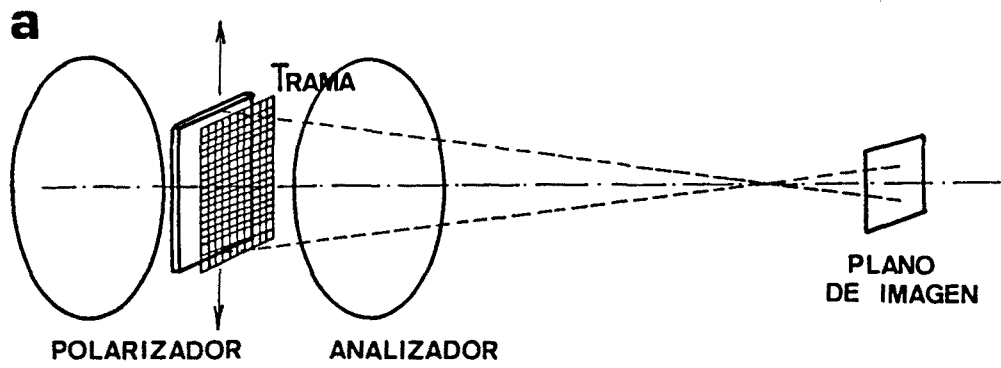
$$P = \frac{d}{2 \text{ sen} \frac{\Delta\theta}{2}}$$

- El contraste máximo se obtiene para $n = 2$ exposiciones. Con $n = 14$ el efecto deviene imperceptible.
- Valores de compromiso que optimizan el registro total con un mínimo error angular, son :

$$n = 6 \text{ a } 9 \text{ exposiciones.}$$

y por tanto :

$$\Delta\theta = 10^\circ \text{ a } 15^\circ$$



3-25 Disposiciones posibles de la trama giratoria en el Polariscopio.

Existen tres disposiciones clásicas posibles (Fig.3-25) :

- a) La trama esta aplicada sobre un soporte traslúcido coincidente con una de las caras del modelo fotoelástico. El soporte no debe ser birrefringente y su presencia ocasiona problemas con los mecanismos de puesta en carga.
- b) Se proyecta la imagen del modelo sobre una pantalla auxiliar conteniendo la trama giratoria. Es la versión más utilizada.
- c) La trama esta confundida con la imagen del modelo sobre la película fotográfica.

Hemos descartado la segunda disposición por precisar un banco fotoelástico especial y la última por la dificultad que presenta el montaje de un dispositivo giratorio que alojé una trama de gran precisión sobre el target electrónico

Ha sido ensayada con aceptables resultados una variante de la primera disposición (a' en Fig 3-25). Consiste en fijar la trama sobre la cara externa de la lámina analizadora. Puede tener soporte birrefringente y gira facilmente solidaria al Analizador.

Sin embargo, para conseguir un doble enfoque es preciso que el modelo este muy próximo y la cámara CCD convenientemente alejada. No es posible trabajar en Fotoelasticidad por reflexión.

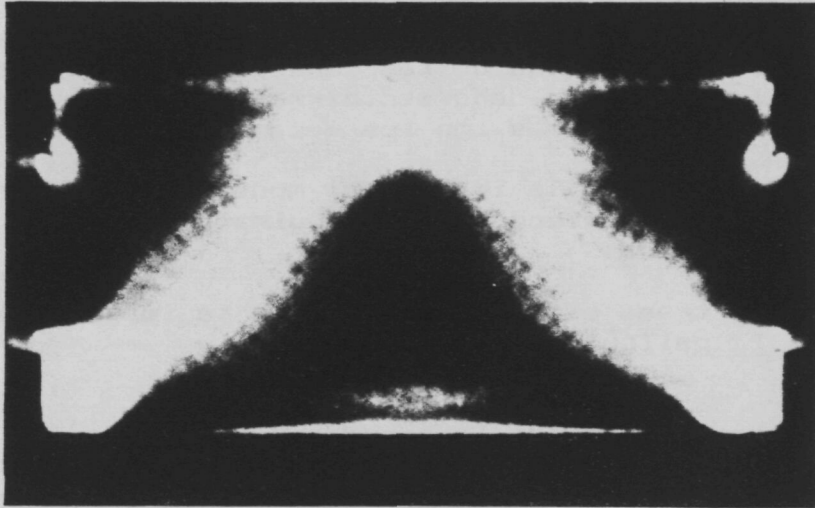
El algoritmo de cálculo consiste en un simple promedio de n imagenes :

$$I_{total} = \frac{\sum I_i}{n} \quad 1 < i < n$$

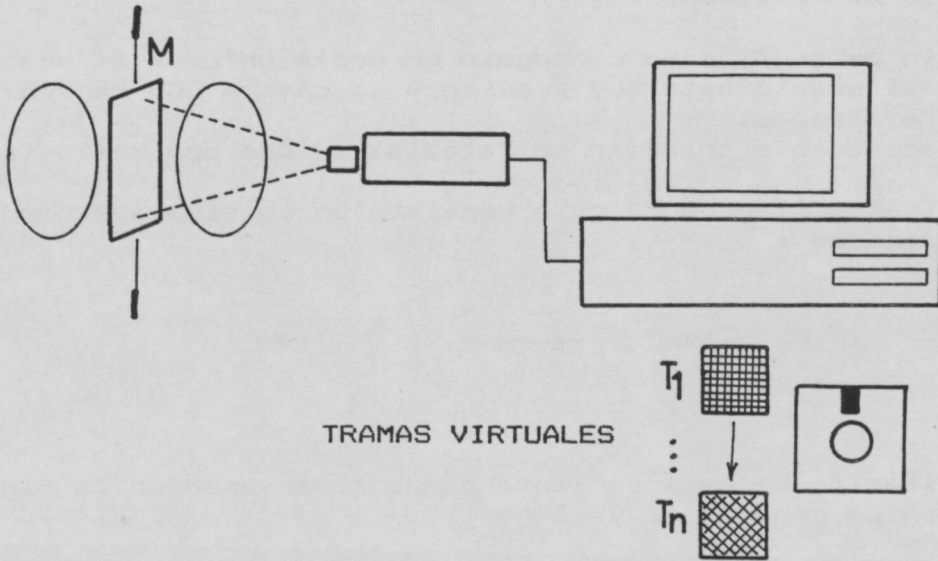
Aplicación de esta variante puede observarse en la Fig.3-26 obtenida con $n = 6$ y $\Delta\theta = 15^\circ$.

SOLUCION ORIGINAL MEDIANTE TRATAMIENTO DE IMAGEN

La potencia de la técnica utilizada nos permite formular una solución original y más elegante al problema.



3-26 Promedio de imagenes ($n=6 / \Delta\theta = 15^\circ$) mediante la variante a².



3-27 Solución original basada en la técnica de tratamiento de imagen .

En efecto, no es necesaria la existencia de una reticula física en el ensayo, ya que esta puede haberse registrado previamente o ser simulada mediante programa informático. (Fig.3-27).

El problema principal reside en conseguir una correcta "convolución" entre la imagen fotoelástica I_i y la imagen de la malla virtual M_j :

$$I_i \oplus M_j$$

Una operación convencional, como el promedio simple efectuado pixel a pixel entre I_i y M_j :

$$I_i \oplus M_j = \frac{I_i \oplus M_j}{2}$$

ó una suma ponderada con parámetros seleccionables A y B :

$$I_i \oplus M_j = \frac{A I_i + B M_j}{2(A+B)}$$

no produce resultados finales satisfactorios.

En cambio, una operación producto simula correctamente la modulación de la trama mediante la intensidad de isocлина.

Así, hemos adoptado la expresión normalizada :

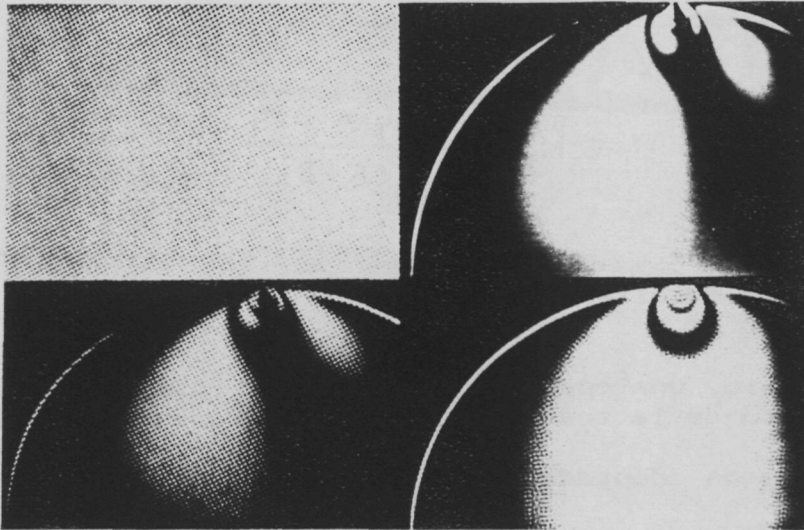
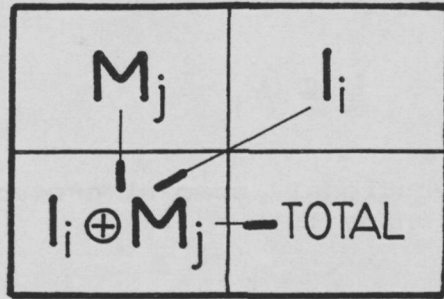
$$I_i \oplus M_j = \left(\frac{I_i}{254} * \frac{M_j}{254} \right) 250$$

La Fig. 3-28 muestra la convolución entre la imagen fotoelástica y la malla virtual. La imagen resultante incorpora la trama en el modelo como si existiera realmente.

Según la combinación elegida entre I_i y M_j se obtienen las líneas de máx. cizalladura o las isostáticas.

Así, eligiendo como parámetros óptimos del proceso :

$$n = 6 \quad \Delta\phi = 15^\circ$$



3-28 Convolución entre la imagen fotoelástica y la trama virtual.

LINEAS DE MAX. CIZALLADURA CIZAMAX

I 0°	⊕	M 0°
I 15°	⊕	M 15°
I 30°	⊕	M 30°
I 45°	⊕	M 45°
I 60°	⊕	M 60°
I 75°	⊕	M 75°

$$TOTAL = \sum \frac{I_i \oplus M_j}{6}$$

ISOSTATICAS ISOSTAT

I 0°	⊕	M 45°
I 15°	⊕	M 60°
I 30°	⊕	M 75°
I 45°	⊕	M 0°
I 60°	⊕	M 15°
I 75	⊕	M 30°

$$TOTAL = \sum \frac{I_i \oplus M_j}{6}$$

Hemos formulado dos programas clónicos para ambos casos :

CIZAMAX. FOR
ISOSTAT. FOR

Operan con una resolución de 256 x 256 pixels y permiten seleccionar entre dos tipos de reticula : normal y fina.

El registro final TOTAL(256, 256) es procesado para mejorar su definición, mediante un cambio de niveles :

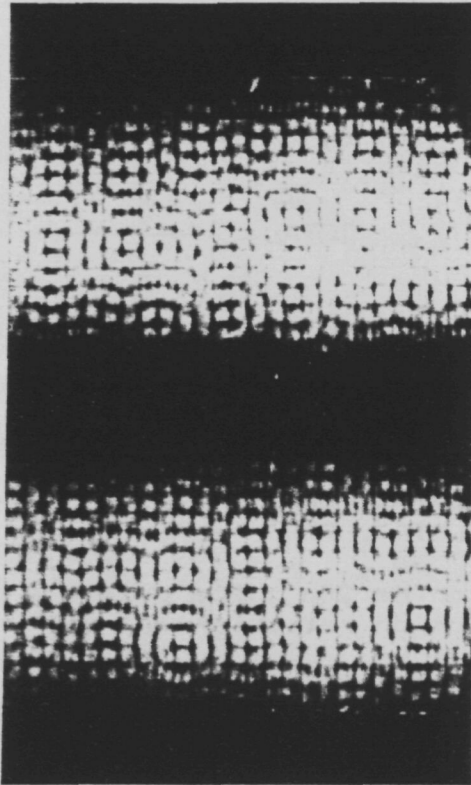
TOTAL max. $\implies z = 250$
TOTAL min. $\implies z = 0$

Es opcional la utilización de operadores estandar de imagen.

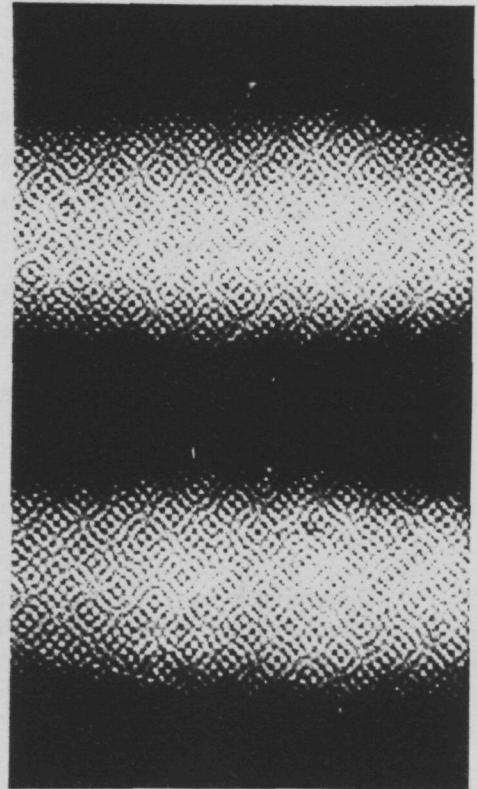
La amplicación de la resolución a 512 x 512 pixels implica simplemente la ejecución repetitiva del programa.

El algoritmo de cálculo sigue el siguiente esquema simplificado :

Resolución común de 256x256 pixels.

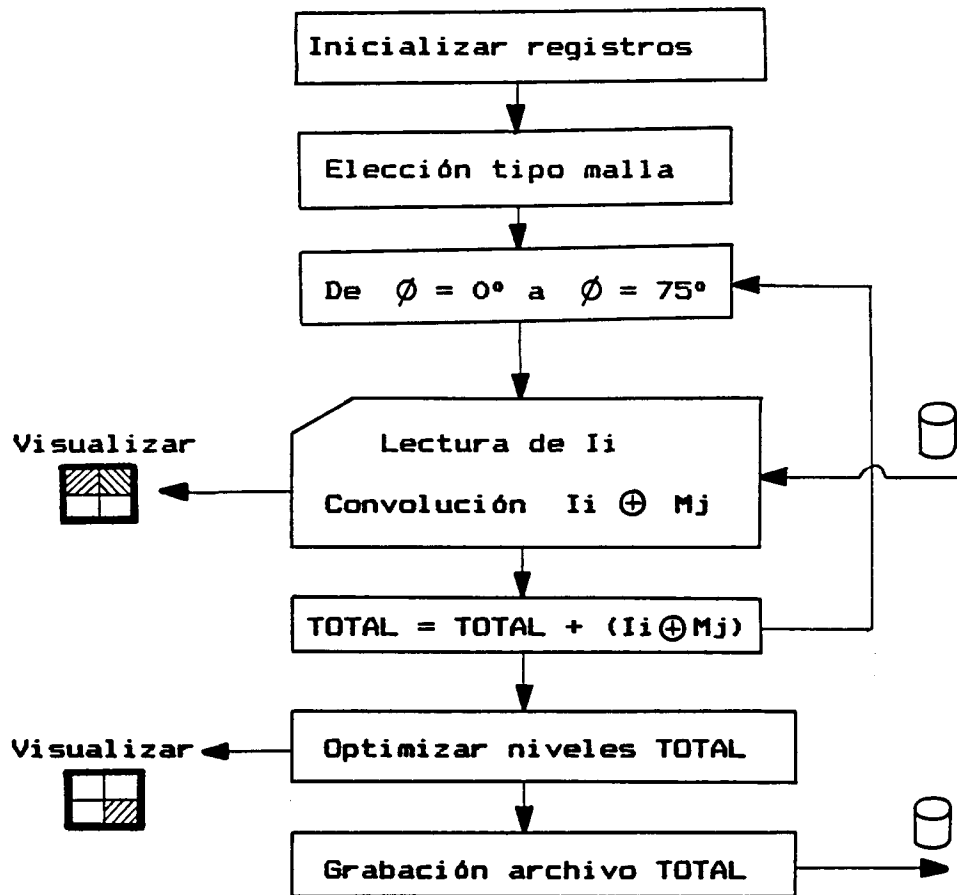


ISOSTATICAS
(Malla normal)



LINEAS DE MAX.
CIZALLADURA
(Malla Fina)

3-29 Aplicación al caso de Flexión Pura.



Una prueba del proceso puede observarse en la Fig. 3-29 correspondiente a un caso de flexión pura.

Las direcciones principales de tensión coinciden con los ejes coordenados de referencia. La red isostática envolvente de las mismas sigue idéntica inclinación. Las líneas de máxima cizalladura se sitúan sobre los planos a 45°.

CONCLUSIONES

El trazado experimental de pseudo-isostáticas mediante adquisición y tratamiento de imagen ha sido satisfactoriamente resuelto.



Sus ventajas residen en :

- Utilizar el registro de isoclinas común en la presente Te_usis. Pueden eliminarse las franjas isocromáticas mediante los métodos descritos en el apartado anterior.
- No es necesario ningún dispositivo adicional, ni tan solo la existencia real de una trama o retícula giratoria.
- La Fotoelasticidad por reflexión admite un cómodo estudio de isostáticas. No es necesario controlar con precisión el espesor del recubrimiento.

Por contra, la definición del equipo limitada a 512 x 512 pixels, es inferior a la proporcionada por una película fotográfica de calidad.