

# *Estudio de elementos resistentes en la arquitectura mediante el método fotoelástico*

Aurora RUIZ MATEOS y Antonio ROS FELIP

Si el arte no es un fenómeno aislado, sino que el arte y el hombre están íntimamente asociados, y el hombre está inmerso en un marco geográfico, cultural, científico, social, económico, espiritual..., el objeto artístico tendrá que ser estudiado, por un lado, dentro del marco antes descrito y, por otro, abordado como la forma materializada que es.

Por tanto, el historiador del arte tiene que trabajar con todos los factores que estén presentes en la obra objeto de estudio. Dentro de la arquitectura es fundamental el proceso técnico que da lugar a que la obra que se ha concebido se materialice, proceso que pone de manifiesto el avance de los métodos constructivos de una época con respecto a otra.

El mundo medieval plantea un serio problema en ese punto por la carencia de tratados técnicos. De una etapa tan importante como la del nacimiento de la arquitectura gótica, podemos citar las descripciones del abad Suger sobre Saint Denis, o la crónica del monje Gervasio sobre Canterbury; de representaciones gráficas podemos mencionar el álbum de Villard de Honnecourt, el palimpsesto de Reims o el dibujo de la fachada de la catedral de Estrasburgo. Pero ninguna de las fuentes citadas hace alusión al proceso técnico, a las dificultades que se plantearon en la nueva arquitectura, ni a la manera de resolverlas, vacío que puede ser subsanado mediante la fotoelasticidad. Este método, aplicado a la arquitectura, ofrece una doble vertiente al historiador del arte: la investigadora y la docente.

En el campo de la investigación ha sido aplicado a las estructuras góticas<sup>1</sup>, lo que ha supuesto una comprensión más amplia de esta arquitectura, si bien es verdad que sólo es un paso, ya que queda mucho por investigar.

En cambio, no se han aprovechado estos conocimientos técnicos en el campo de la docencia, siendo así que creemos que es el método idóneo para que un alumno de arte pueda comprender, por ejemplo, por qué funciona mejor un arco de medio punto que un dintel, o un arco apuntado que un arco de medio punto. Y comprender no es «saber de memoria».

Así, como un alumno de cualquier rama de las Ciencias entiende el desarrollo y el porqué de una fórmula, el de Letras debe saber en arquitectura el porqué del funcionamiento de los elementos o estructuras que determinan una obra, tanto por la obra en sí como por lo que supone un avance técnico dentro del contexto cultural que rodea a la obra de arte en el momento de su nacimiento. La fotoelasticidad es un método gráfico que hace posible, al alumno o al especialista en arte, la interpretación técnica de un elemento constructivo o de un edificio, sin tener que recurrir a cálculos matemáticos.

Vamos a exponer sintéticamente lo que es la fotoelasticidad y a hacer un esbozo de su aplicación a elementos constructivos.

La fotoelasticidad es una vieja técnica experimental de análisis mecánico que, en su configuración más simplificada, precisa un equipo muy sencillo y accesible: una fuente de luz y dos láminas polarizadoras.

Para estudiar mediante fotoelasticidad el comportamiento mecánico de una estructura (una viga, una columna, un arco...) frente a las cargas que actúan sobre ella, primeramente se fabrica un modelo a escala de la misma en un material plástico transparente. A continuación se dispone un montaje colocando alineados los siguientes elementos: una fuente de luz, una lámina polarizadora, el modelo transparente y una segunda lámina polarizadora. Sometiendo el modelo a unas cargas proporcionales a las reales, por detrás del segundo polarizador se observa un espectro de franjas de colores que está directamente relacionado con las deformaciones existentes en la pieza, y que, por tanto, suministra una valiosa información sobre el comportamiento mecánico de la pieza considerada (fig. 1).

Las franjas de colores se denominan isocromáticas. Existe una relación directa entre el color de una isocromática y los niveles de tensión mecánica presentes en las zonas del modelo ocupadas por la misma. Las tensiones mecánicas son las intensidades de las fuerzas interiores que se desarrollan en el material como consecuencia de la actuación de las cargas exteriores.

Para interpretar cuantitativamente un espectro de isocromáticas, generalmente es preciso recurrir a las ecuaciones matemáticas de la resistencia de materiales y de la teoría de la fotoelasticidad, las cuales relacionan ten-

---

<sup>1</sup> R. MARK y W. W. CLARK: «Experimentos sobre estructuras góticas». *Rev. Investigación y Ciencia*, 100, Barcelona, 1985, pp. 92-100.

siones, deformaciones y propiedades ópticas del material. Asimismo son necesarias algunas nociones de análisis dimensional para extrapolar a la estructura real los resultados obtenidos en el modelo de plástico transparente.

Sin embargo, es posible una interpretación de orden cualitativo que no requiere más que la sencilla regla siguiente: las tensiones son importantes en aquellas zonas del modelo que aparecen cubiertas de franjas de isocromáticas finas y apretadas. Es decir, basta un golpe de vista para hacerse una clara idea intuitiva del comportamiento mecánico de la pieza (fig. 2).

Esta posibilidad convierte a la fotoelasticidad en un valioso instrumento didáctico e investigador capaz de desvelar un gran número de complicadas cuestiones mecánicas y constructivas. Pasemos, pues, a comprobarlo mediante el examen del comportamiento y de la evolución de los principales elementos resistentes de las construcciones.

La columna es elemento básico de sustentación de cualquier edificio. Las cargas exteriores que actúan sobre la misma son fundamentalmente dos: la fuerza vertical descendente transmitida al extremo superior y constituida por el peso del edificio, y la reacción vertical ascendente transmitida por el terreno al extremo inferior.

Aplicando estas mismas cargas a un modelo fotoelástico de la columna, se obtiene la imagen de la figura 3. En ella se observa que, salvo en las zonas cercanas a los puntos de transmisión de cargas, la distribución de isocromáticas es uniforme: sólo hay una isocromática (de color anaranjado en el caso de la figura) que cubre toda la superficie de la pieza. Esto significa que también el nivel de tensión es uniforme. Cualquier sección de la columna se encuentra sometida a una tensión de compresión que es igual en todo punto. Es decir, salvo en los extremos, la columna trabaja de forma óptima, ya que la carga se reparte uniformemente por todos sus puntos.

El extremo superior de la columna es una de sus dos zonas críticas. El dintel transmite sobre el mismo una carga más o menos concentrada constituida por el peso del edificio. En las proximidades de la zona de transmisión de carga del correspondiente modelo fotoelástico, se aprecia una complicada distribución de isocromáticas que revela una fuerte concentración de tensiones, con valores muy superiores a los que aparecen en la zona central de la columna (fig. 4).

Con la intención de suavizar estas tensiones surgió la idea de intercalar entre columna y dintel un elemento de descarga. Este elemento, que inicialmente fue un dado o un cilindro, es el capitel.

En el modelo fotoelástico puede observarse cómo, al intercalar el capitel, las isocromáticas, y en consecuencia las tensiones que llegan a la columna, están ya muy suavizadas y se acercan a la forma existente en el resto de la columna. Las máximas tensiones se han quedado en el capitel, que, por ser de mayor sección, tiene mayor capacidad para absorberlas (fig. 4).

En la figura 5 se ilustra mediante modelos fotoelásticos la influencia que tiene la forma de aplicación de la carga sobre la columna.

En el primer caso se ha aplicado una carga puntual y centrada. La carga puntual, constituida por una fuerza aplicada en un área muy pequeña, produce un considerable efecto de concentración de tensiones en sus proximidades.

En el segundo caso, la misma carga se aplica repartida por la superficie de los bordes, dando lugar al mismo estado de compresión uniforme en la zona central y a una notable reducción de la concentración de tensiones en las proximidades de los bordes. Este es el efecto ya señalado de la presencia del capitel.

En el tercer caso, la carga es puntual y descentrada, es decir, las fuerzas actuantes no están alineadas. Este caso se da, por ejemplo, como consecuencia de un anclaje defectuoso o de un deslizamiento de terreno que impide que la base de la columna se apoye uniformemente (Santa María del Sar, en Santiago de Compostela). El espectro de isocromáticas difiere claramente de los dos casos anteriores; la columna ya no trabaja de forma óptima, pues a la compresión inicial se ha añadido una flexión que es proporcional a la distancia entre las líneas de acción de las dos fuerzas actuantes.

La sollicitación de flexión es característica de la construcción adintelada. Se dice que un elemento prismático, esto es, un sólido con una de sus dimensiones mucho mayor que las otras dos, está sometido a flexión cuando los esfuerzos sobre el mismo son tales que tienden a doblarlo o flectarlo. Efectivamente, el dintel que transmite el peso de la estructura a las columnas sufre fundamentalmente una sollicitación de flexión.

En la figura 6 se muestra la imagen fotoelástica de un modelo sometido a un conocido ensayo de compresión simétrica en cuatro puntos, que da lugar en toda la zona central a un estado de flexión pura.

En la parte inferior se ha representado la distribución de tensiones resultante en una sección cualquiera. Su variación es lineal, es decir, tanto las tensiones como los niveles de las isocromáticas crecen proporcionalmente a la distancia al eje de la pieza, siendo máximas en los bordes y nulas en el eje. Efectivamente, sobre el eje de la pieza (la línea horizontal media) aparece la isocromática negra, que es la de orden cero, mientras que, en los bordes, las isocromáticas son más densas y de niveles superiores.

La mitad superior de la pieza está comprimida, y la mitad inferior, traccionada. Este hecho es de especial importancia, dado que toda la construcción antigua está caracterizada por el empleo de materiales con pocas aptitudes para resistir tracciones, lo que constituye una severa limitación. La imposibilidad de conseguir grandes luces entre columnas, la invención del arco y la bóveda, la sensibilidad a los efectos del viento y circunstancias como la rotura de una muralla por el lado opuesto al que está siendo batida

por un ariete, son hechos directamente relacionados con la general ineptitud de los materiales pétreos para resistir tracciones.

En la figura 7 se ve el efecto de la separación entre columnas en una construcción adintelada.

La pieza fotoelástica ensayada está apoyada por el borde inferior sobre dos puntos (que simulan las columnas sobre las que se apoya el dintel) y en el centro del borde superior actúa una carga concentrada que corresponde al peso de la estructura. En los tres ensayos realizados, la carga es constante y sólo varía la distancia entre los puntos de apoyo.

Las imágenes fotoelásticas son bien elocuentes de la severidad del efecto. Las tensiones aumentan linealmente con la distancia entre columnas, y en el dintel de piedra la rotura se producirá en el punto medio del borde inferior por ser esa la zona de máximas tracciones.

Pero hay un radical alivio de tensiones en la construcción adintelada cuando se vacía un triángulo sobre el dintel (fig. 8).

Este triángulo, como el de la puerta de los Leones y el de la puerta del tesoro de Atreo en Micenas, constituye un falso arco. Las cargas son llevadas hacia las jambas, dejando al dintel en una función casi testimonial. En efecto, obsérvese cómo las isocromáticas se concentran entre los vértices del triángulo y las zonas de apoyo sobre las jambas, mientras que, en el resto del dintel, se tiene una distribución de isocromáticas de órdenes inferiores.

En el arco de medio punto, el peso de la estructura se transmite a las columnas mediante tensiones mayoritariamente de compresión. El arco más antiguo conocido es el de Eridu, en Mesopotamia, región cuyo único material de construcción disponible era el ladrillo cocido o adobe; material de casi nula resistencia a la tracción, lo que imposibilita su utilización en construcciones adinteladas.

En la figura 9 se ofrece el espectro de isocromáticas presente en un modelo de arco de medio punto sometido a una carga puntual centrada sobre la clave.

En la parte inferior de la lámina se indica la forma aproximada de la distribución de tensiones en una sección característica para este tipo de carga. Puede observarse que las tracciones se reducen a una pequeña porción del extradós y que su magnitud es mucho menor que la de las compresiones.

Comparando esta distribución de tensiones con la representada en la figura 6 se comprende la ventaja que supone la utilización del arco de medio punto en lugar del dintel clásico cuando el material constituyente soporta mal las tracciones.

La figura 10 representa dos modelos fotoelásticos, uno de un arco de medio punto y otro de un pórtico adintelado; ambos, de igual altura y sección, se han sometido a la misma carga puntual, tal como se indica en la parte superior de la lámina. Las zonas sombreadas son las que corresponden a las imágenes de isocromáticas de la parte inferior.

Una simple ojeada basta para comprobar que el arco de medio punto funciona mejor que el pórtico adintelado. La distribución de isocromáticas es más suave y los máximos niveles de las mismas también son inferiores.

En el pórtico adintelado se observa, además, una zona muy crítica alrededor del ángulo interno del extremo del dintel. Estas zonas de fuertes concentraciones de tensiones aparecen a causa de la aplicación directa de cargas y, como en este caso, por variaciones bruscas en la geometría de la estructura.

La influencia de la luz, o diámetro, del arco de medio punto en la distribución de tensiones, se pone de manifiesto en la figura 11.

Los dos modelos ensayados son de igual sección y la luz del primero es la mitad de la del segundo. Ambos tienen dos puntos de apoyo por la base en la vertical de las columnas. Se ha aplicado una compresión puntual centrada e idéntica para cada uno. En consecuencia, los dos arcos están sometidos a las mismas fuerzas, tal como se indica en la figura: la acción sobre la clave y las reacciones sobre los puntos de apoyo (la magnitud de cada una de estas últimas es la mitad de la primera).

De la observación de los espectros de isocromáticas resultantes es fácil deducir el efecto negativo del aumento de la luz. El arco pequeño, pues, es capaz de soportar mucha más carga que el grande. Este hecho está directamente relacionado con un fenómeno característico de los arcos: el empuje.

Cuando un arco cualquiera se somete a cargas verticales, tiende a «abrirse», es decir, a aumentar la separación entre sus extremos. Al impedir este desplazamiento aparecen fuerzas horizontales, que son las que constituyen el dominado empuje del arco.

La figura 12 es una clara ilustración de este fenómeno. El arco de la parte superior de la figura descansa por sus extremos sobre dos puntos de apoyo representados con puntos blancos. Al aplicar la carga señalada con una flecha, el arco se abre en cierta medida y las isocromáticas, o las tensiones, se agrupan en la zona central del arco siendo, casi inexistentes en los dos puntos de apoyo. Los bordes de la zona central del arco están sometidos a fuertes tensiones, de compresión en el extradós y de tracción en el intradós.

A continuación se ha ensayado el mismo arco con la misma carga, pero impidiendo el desplazamiento horizontal mediante dos nuevos apoyos, también representados con puntos blancos. En el centro de la lámina y en la parte inferior se presenta el espectro de isocromáticas y un detalle del mismo.

Puede observarse que, al impedir la apertura del arco, se ha mejorado su funcionamiento, ya que hay una gran reducción de tensiones en la zona central. Sin embargo, aparecen nuevas tensiones en los extremos con tres claras zonas de concentración de franjas. Una, en el ángulo interno del extremo, debida a la brusca variación de geometría del arco. Otra, en la base, que co-

responde a la reacción del apoyo. Y una tercera, en la parte inferior de la cara vertical externa, que corresponde a la reacción del apoyo frente al empuje del arco. Es de notar que esta reacción es superior a la de la base de apoyo.

La tendencia de los arcos a abrirse aumenta con la luz. Este efecto impuso la limitación en el tamaño de las iglesias románicas, así como la necesidad de utilizar gruesos muros y contrafuertes capaces de soportar los empujes.

El arco apuntado es el elemento estructural que permitió el aumento de altura y la apertura de grandes ventanales en las catedrales góticas. Este arco minimiza el efecto del empuje al transmitir las cargas con mayor verticalidad, es decir, más directamente hacia las columnas.

En la figura 13 se ofrece la imagen fotoelástica correspondiente a un ensayo idéntico al realizado en la figura 9 con el arco de medio punto. En el detalle representado de la distribución aproximada de tensiones de la sección, puede apreciarse que las tracciones son aún más reducidas que en el caso mencionado.

Una clara comparación del funcionamiento de los tres elementos constructivos fundamentales considerados: el pórtico adintelado, el arco de medio punto y el arco apuntado se representa en la figura 14.

Sobre los tres modelos fotoelásticos se ha realizado nuevamente el ensayo de simulación del peso de la estructura mediante una fuerza centrada en la parte superior del elemento. La magnitud de la fuerza es la misma en los tres casos. La altura y dimensiones de la sección son las mismas en los tres modelos, o sea, que los tres elementos soportan la misma carga en igualdad de condiciones.

Las imágenes fotoelásticas resultantes revelan que la mejor respuesta a la sollicitación la da el arco apuntado y que el peor comportamiento corresponde al pórtico adintelado.

El aumento de altura de las catedrales góticas trajo consigo un nuevo problema estructural: la fuerza del viento. La velocidad del viento aumenta con la elevación, y la fuerza que ejerce es proporcional al cuadrado de la velocidad; por consiguiente, sus efectos se multiplican drásticamente en estructuras de altura considerable.

La figura 15 es un sencillo ejemplo ilustrativo de este fenómeno. A la derecha se indica la forma habitual que se considera para la carga de viento: una fuerza distribuida triangularmente, nula al nivel del suelo y creciente linealmente con la altura.

A la izquierda se representan las imágenes fotoelásticas correspondientes a dos columnas de igual sección y diferentes alturas. Ambas se han sometido a una carga horizontal aplicada en el punto más alto de la parte derecha. La carga es la misma en ambos casos, pero sus efectos son mucho más severos en la columna de mayor altura. Nótese también que, si bien la carga

está aplicada en la parte superior de la columna, sus máximos efectos se presentan en la base.

El problema de la fuerza del viento no fue tenido en cuenta por los maestros de la nueva arquitectura, quienes fueron comprobando sus efectos negativos en los edificios. Ellos no sólo buscaron la solución del problema, sino que fueron introduciendo modificaciones que hicieron óptima la estructura de la catedral gótica.

En la figura 16 se muestra un modelo fotoelástico de un arco apuntado sujeto por la base y sometido a una carga horizontal en la parte superior, con la que se pretende simular el efecto del viento. Tal como indican las aglomeraciones de isocromáticas, el viento produce severos niveles de tensión cerca de las bases de las columnas y en los riñones.

Como se ha comentado en la figura 15, dichas tensiones crecen fuertemente si se aumenta la altura del arco. Precisamente, la necesidad de fortalecer los muros de las naves góticas frente a los efectos del viento propició la introducción de un nuevo elemento: el arbotante.

En la figura 17 se presentan dos ensayos sobre el mismo arco apuntado. En ambos casos, la carga horizontal es la misma, pero en el de la izquierda se ha añadido un apoyo que simula el efecto de un arbotante. Observando los espectros de isocromáticas resultantes, es fácil comprobar el alivio de tensiones que supone la presencia de este elemento.

Observemos finalmente cuál es el efecto de la inclinación del arbotante, modificación introducida en la catedral de Bourges. En la figura 18 se ofrecen nuevamente los dos arcos apuntados sometidos a la carga de viento horizontal. Para simular los efectos de los arbotantes horizontal e inclinado, se ha dispuesto un apoyo que transmite una reacción horizontal en el primer caso y una reacción inclinada  $45^\circ$  en el segundo. Examinando con atención las isocromáticas resultantes, comprobaremos que el mejor funcionamiento del arco se da para el arbotante horizontal. Este resultado parece indicar que la modificación introducida en Bourges fue un error. Sin embargo, examinemos una estructura más completa antes de extraer conclusiones precipitadas.

En la figura 19 se presentan dos modelos constituidos por la mitad izquierda de un arco apuntado y un arbotante que descansa sobre el contrafuerte. En ambos casos se ha aplicado una carga horizontal idéntica, señalada por una flecha, que simula la carga de viento. Las isocromáticas demuestran claramente que, en el conjunto de la estructura, el arbotante inclinado supone una notable mejora y que, en consecuencia, el sistema de arbotantes inclinados de la catedral de Bourges es más eficaz que el sistema horizontal de la catedral de Chartres.

Es interesante comentar que, al considerar aislado el arco apuntado en el ensayo de la figura 17, hemos actuado según la mentalidad analítica propia de nuestro siglo, lo que casi nos ha inducido al error de menospreciar el



comportamiento de todo un conjunto estructural por los resultados derivados del estudio de una porción aislada del mismo. Este tipo de error nunca lo cometería el constructor medieval, ya que, en consonancia con el espíritu de su época, en lugar de analizar tendía a comprender de forma global el funcionamiento de la estructura.

Esta capacidad de intuición, unida al saber empírico, permitió que el constructor medieval introdujera mejoras como la ya comentada o como el vaciado de los pináculos que rematan los contrafuertes que reciben los arbotantes en la catedral de Reims. Esta última modificación tiene por objeto la mejora de la estabilidad del contrafuerte y es decididamente genial, puesto que la estabilidad de columnas es un problema que fue estudiado teóricamente por primera vez por Euler ¡en el siglo XVIII!, y cuya importancia no se manifiesta hasta nuestro siglo con la utilización de la estructura metálica en la construcción.

Digamos, como conclusión, que la valoración de las soluciones adoptadas en las estructuras góticas, y en la construcción antigua en general, es posible mediante la aplicación de los conocimientos técnicos y científicos actuales. Y que la fotoelasticidad permite, además, una visión clara, asequible y atractiva del comportamiento mecánico de los edificios en la historia de la arquitectura.

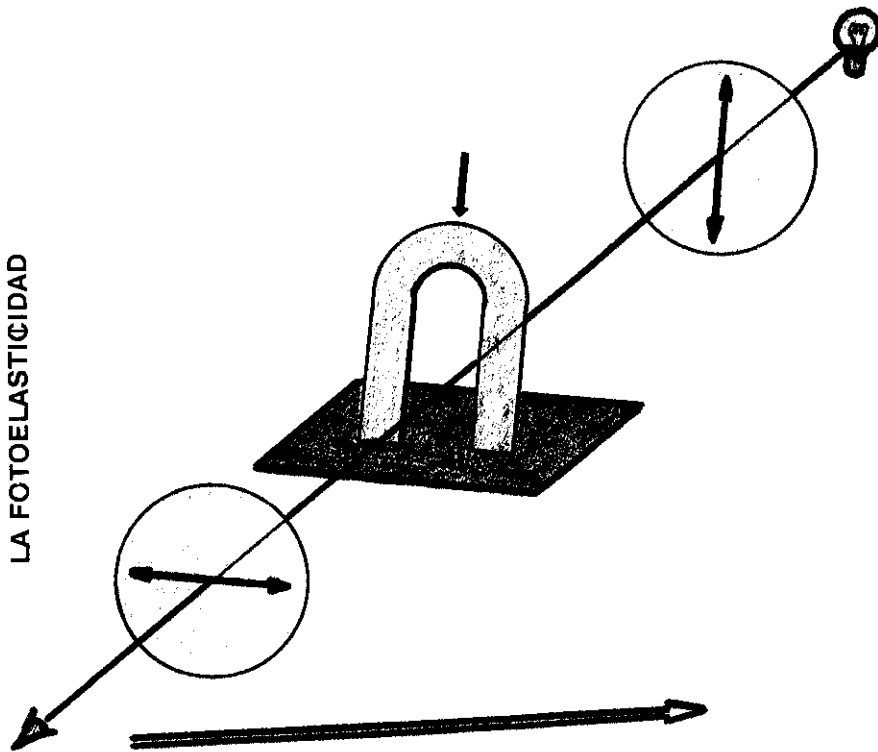
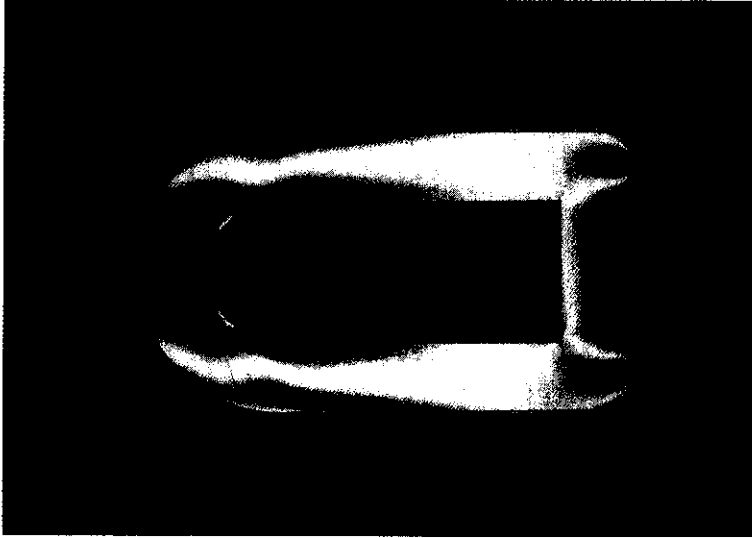
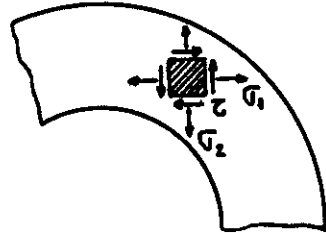
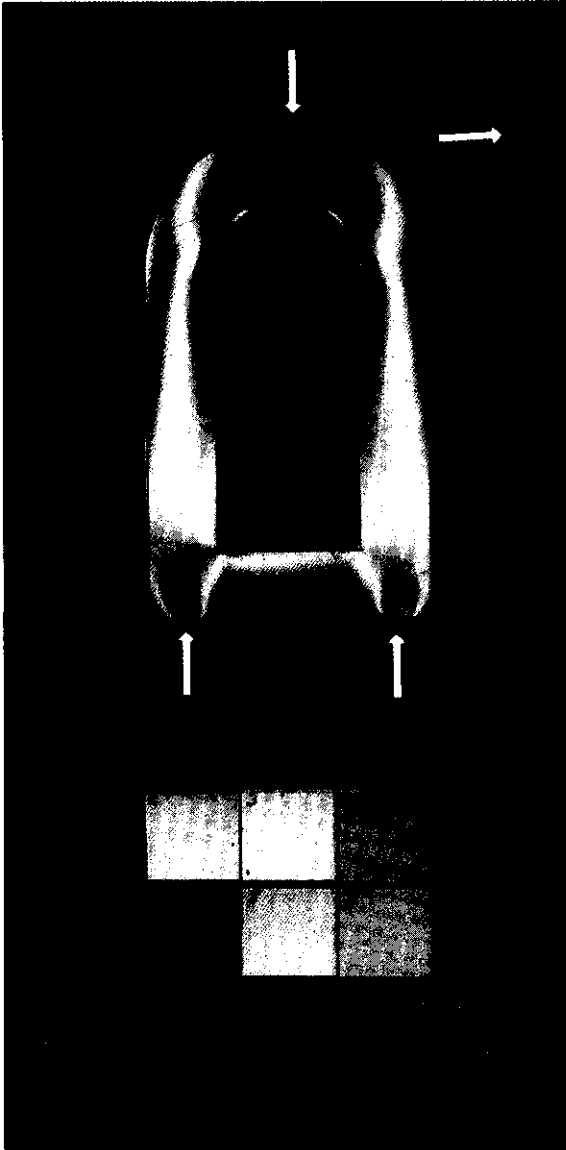


Figura 1.

## LA FOTOELASTICIDAD



### INTERPRETACION

- **Cuantitativa:**

$$(\sigma) = (c)(\epsilon)$$

$$(\sigma) = (f)(u)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \eta f / e$$

- **Cualitativa:**

CONCENTRACION FRANJAS



MAXIMAS TENSIONES

Figura 2.

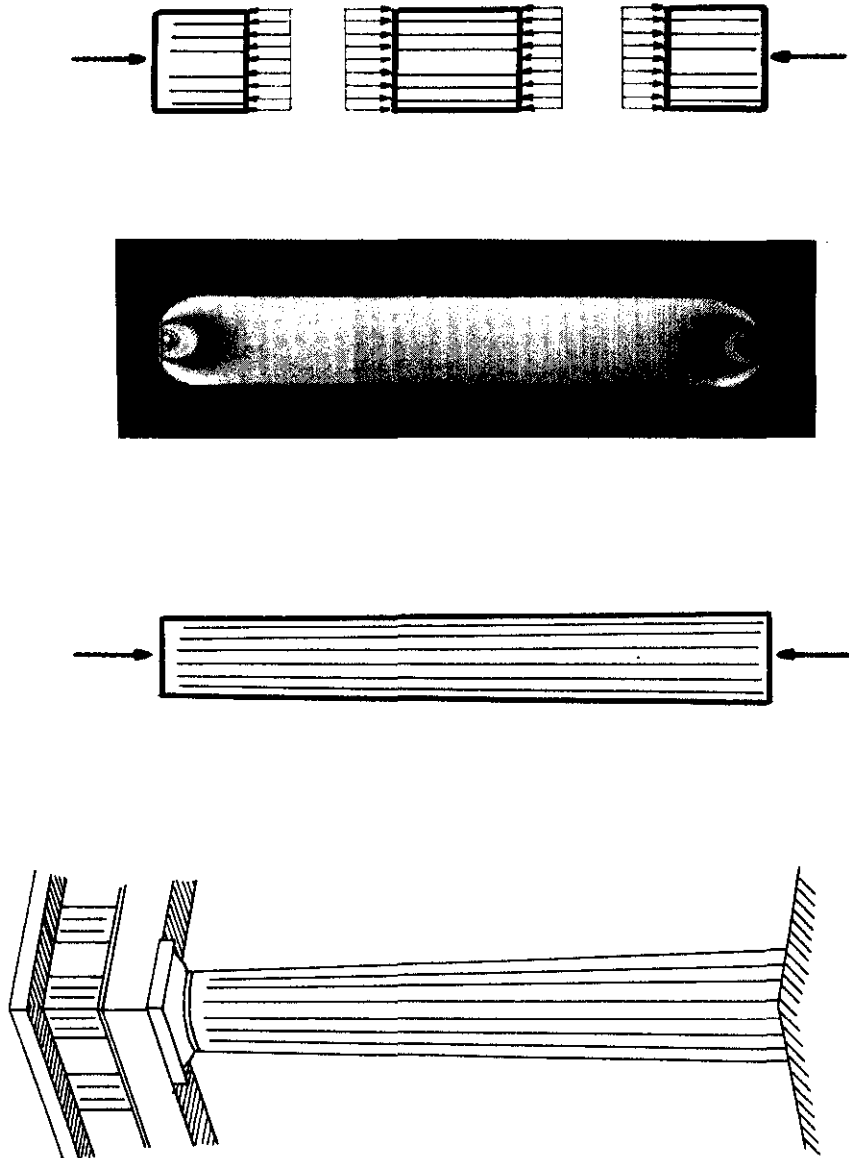


Figura 3.

LA COLUMNA

LA COLUMNA: EFECTO DEL CAPITEL

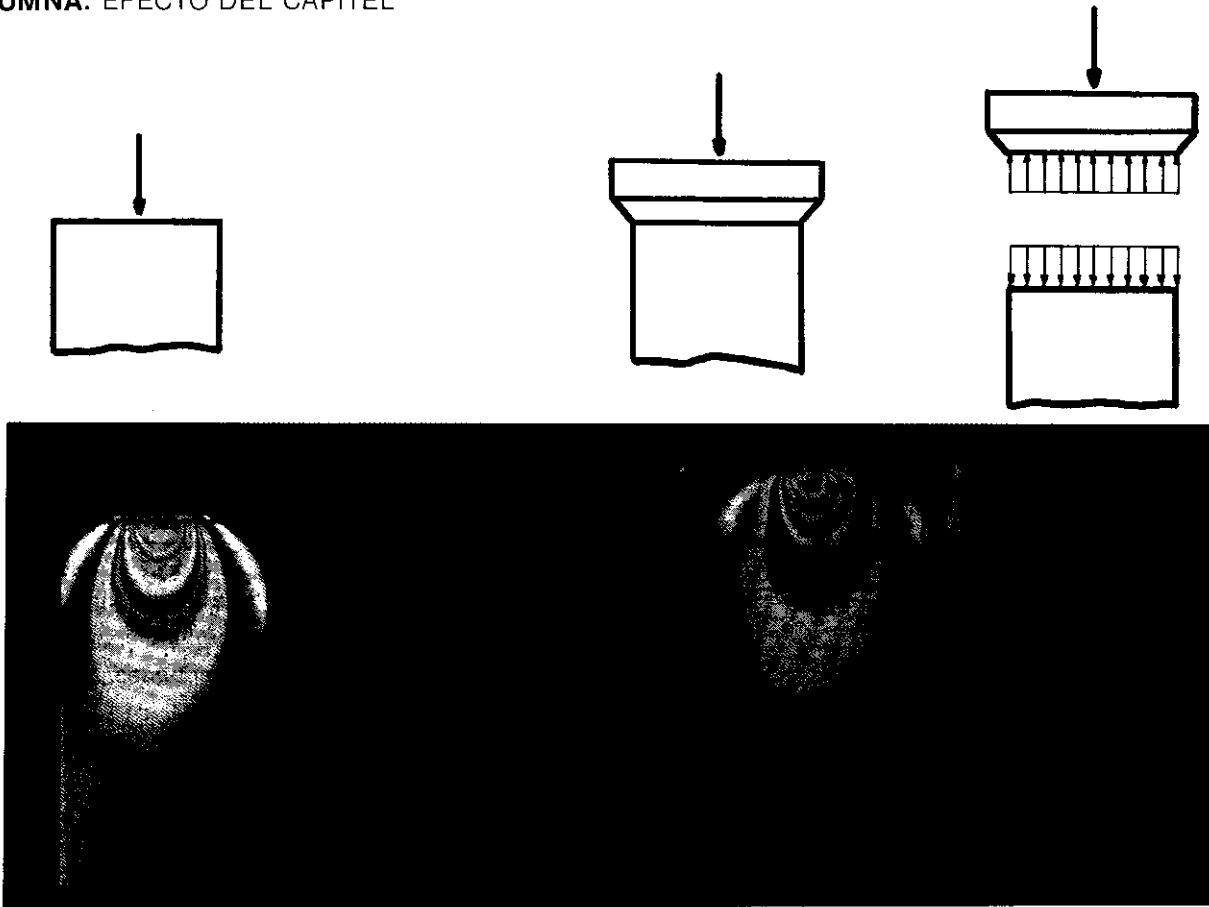


Figura 4.

# LA COLUMNA

EFFECTO DE LA FORMA DE ACTUACION DE LA CARGA

- 1. Carga puntual centrada.
- 2. Carga distribuida centrada.
- 3. Carga puntual descentrada.

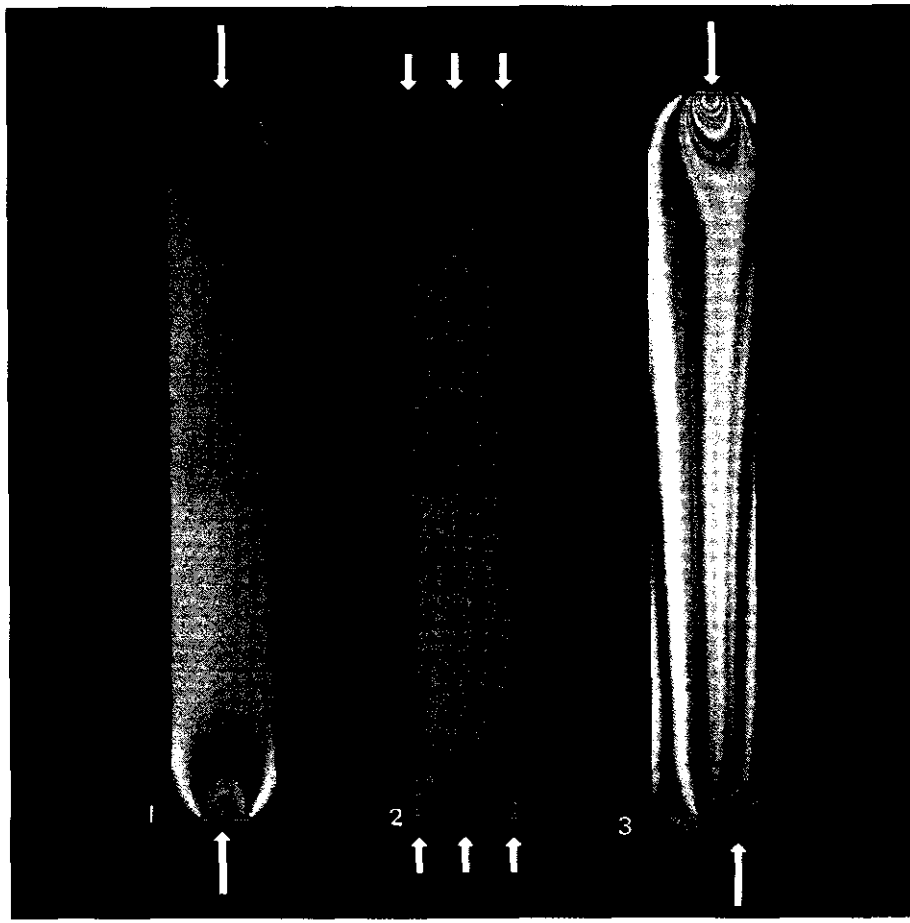


Figura 5.

### CONSTRUCCION ADINTELADA: FLEXION

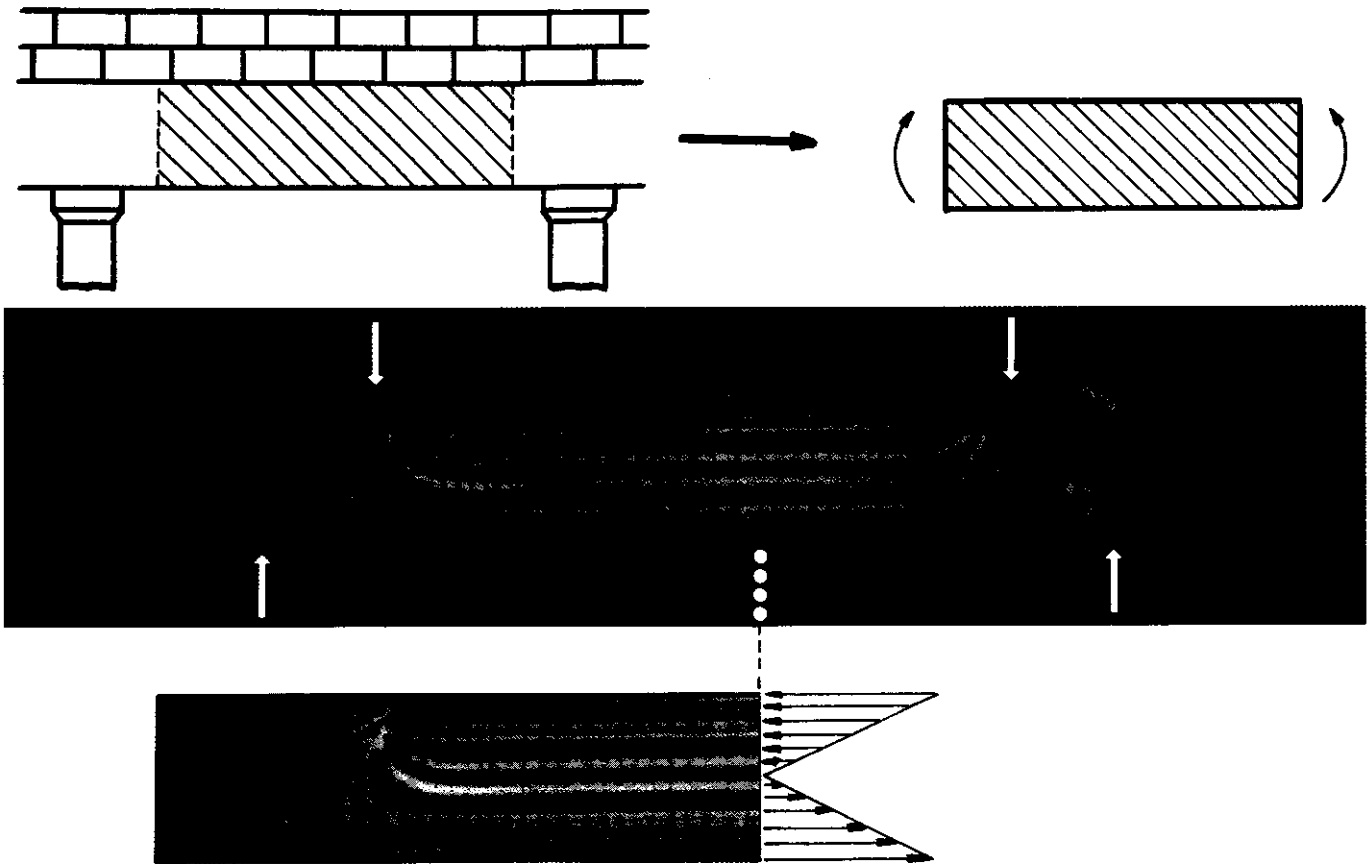


Figura 6.

**CONSTRUCCION ADINTELADA:**

EFECTO DE LA SEPARACION ENTRE COLUMNAS

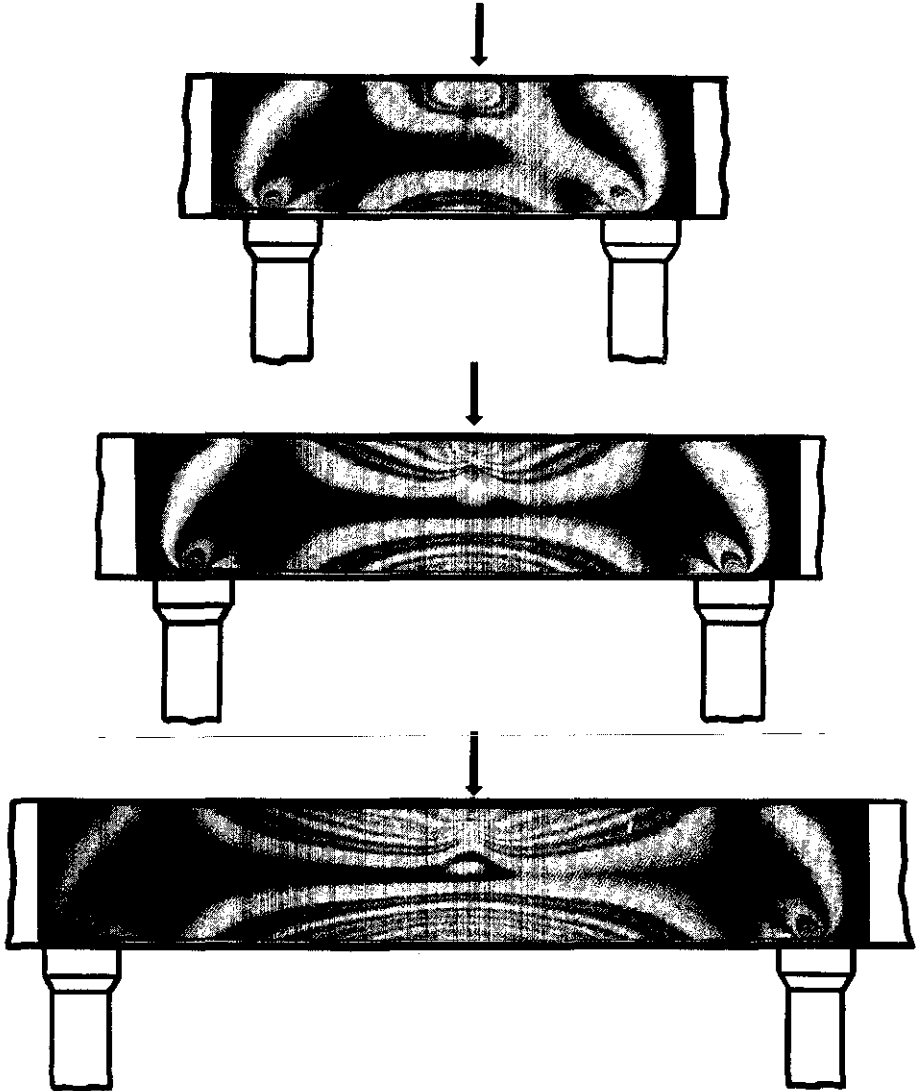


Figura 7.



**CONSTRUCCION ADINTELADA:**

**EFFECTO DEL TRIANGULO DE DESCARGA**

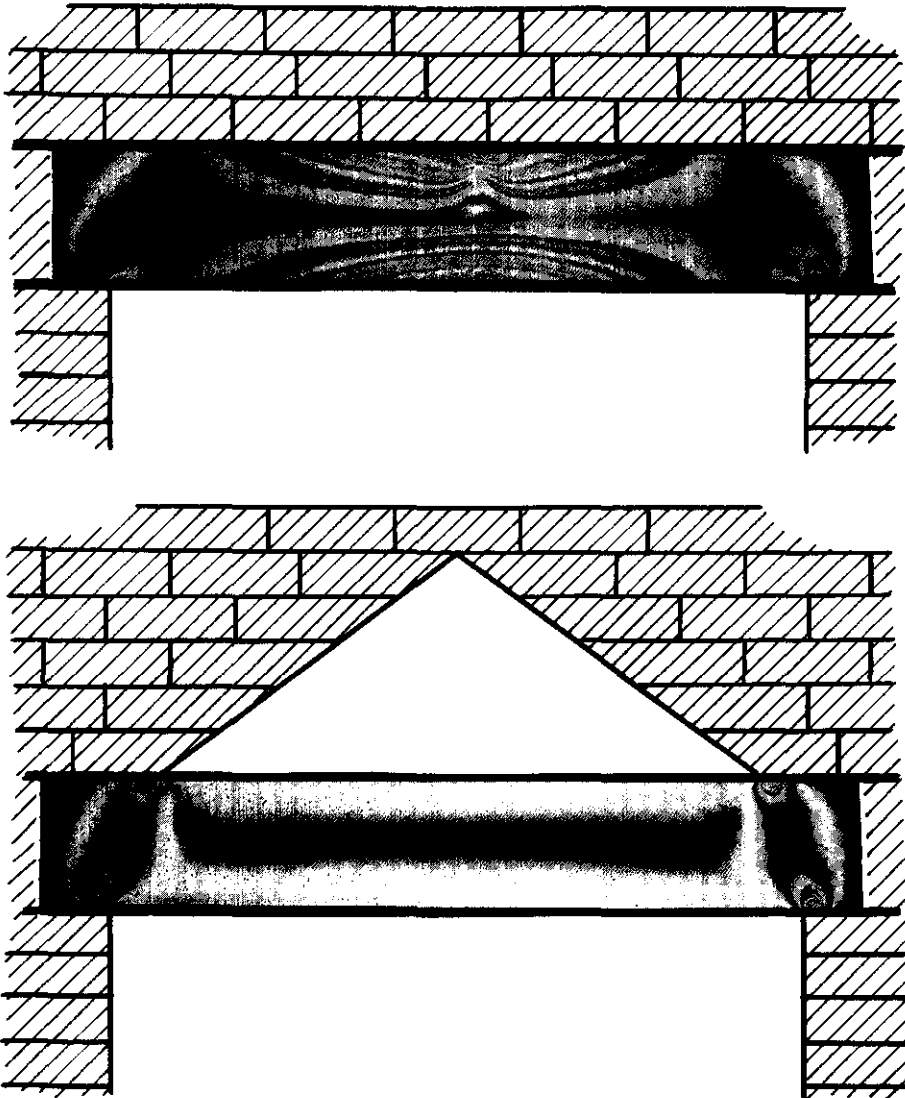


Figura 8.

**EL ARCO DE MEDIO PUNTO**

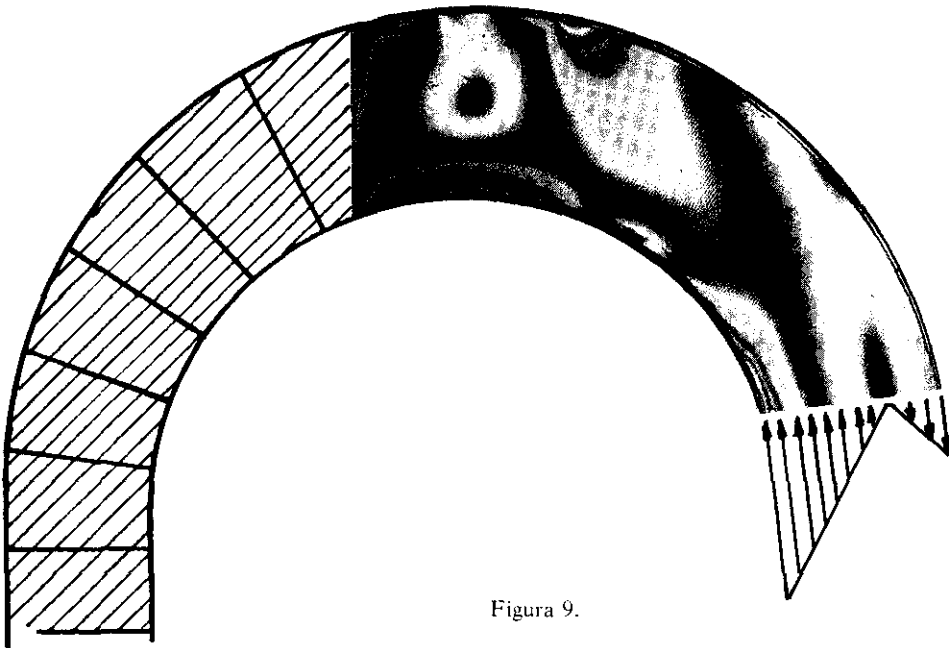
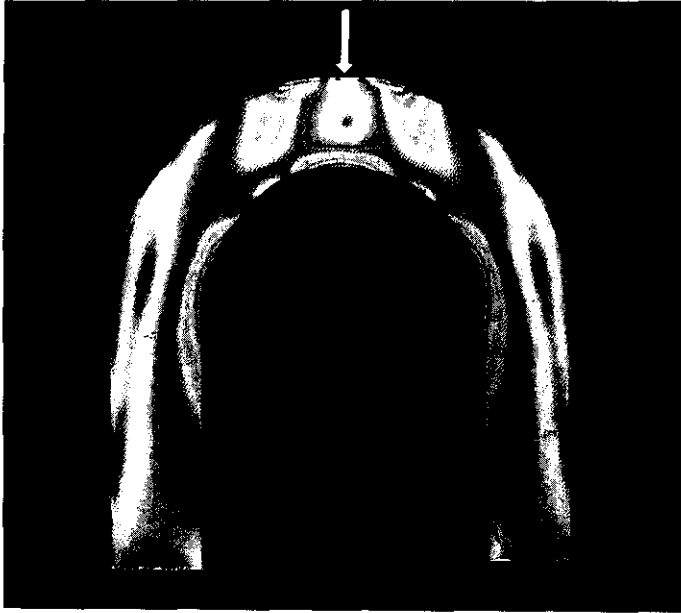


Figura 9.

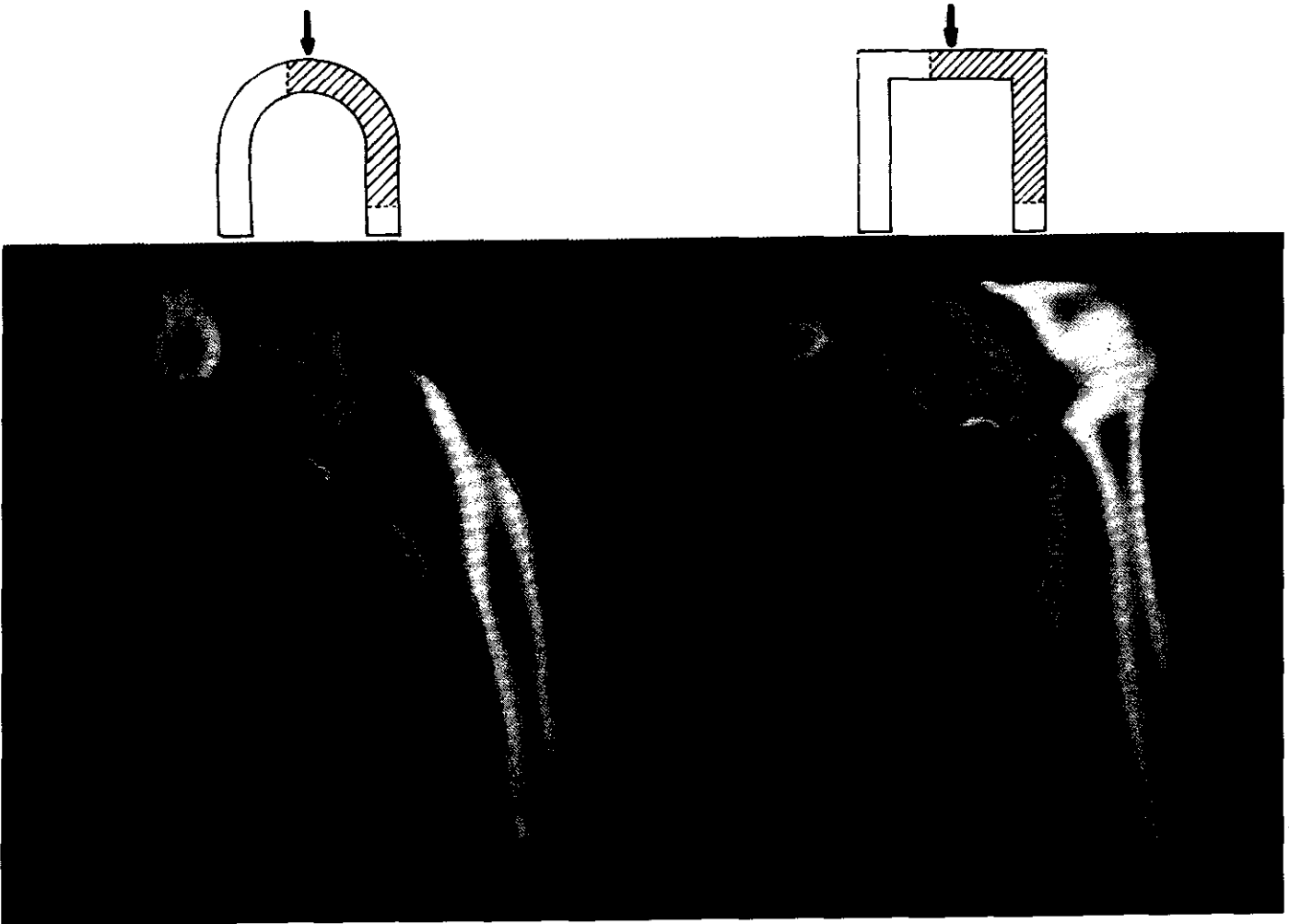


Figura 10.

EL ARCO DE MEDIO PUNTO: EFECTO DEL AUMENTO DE LUZ

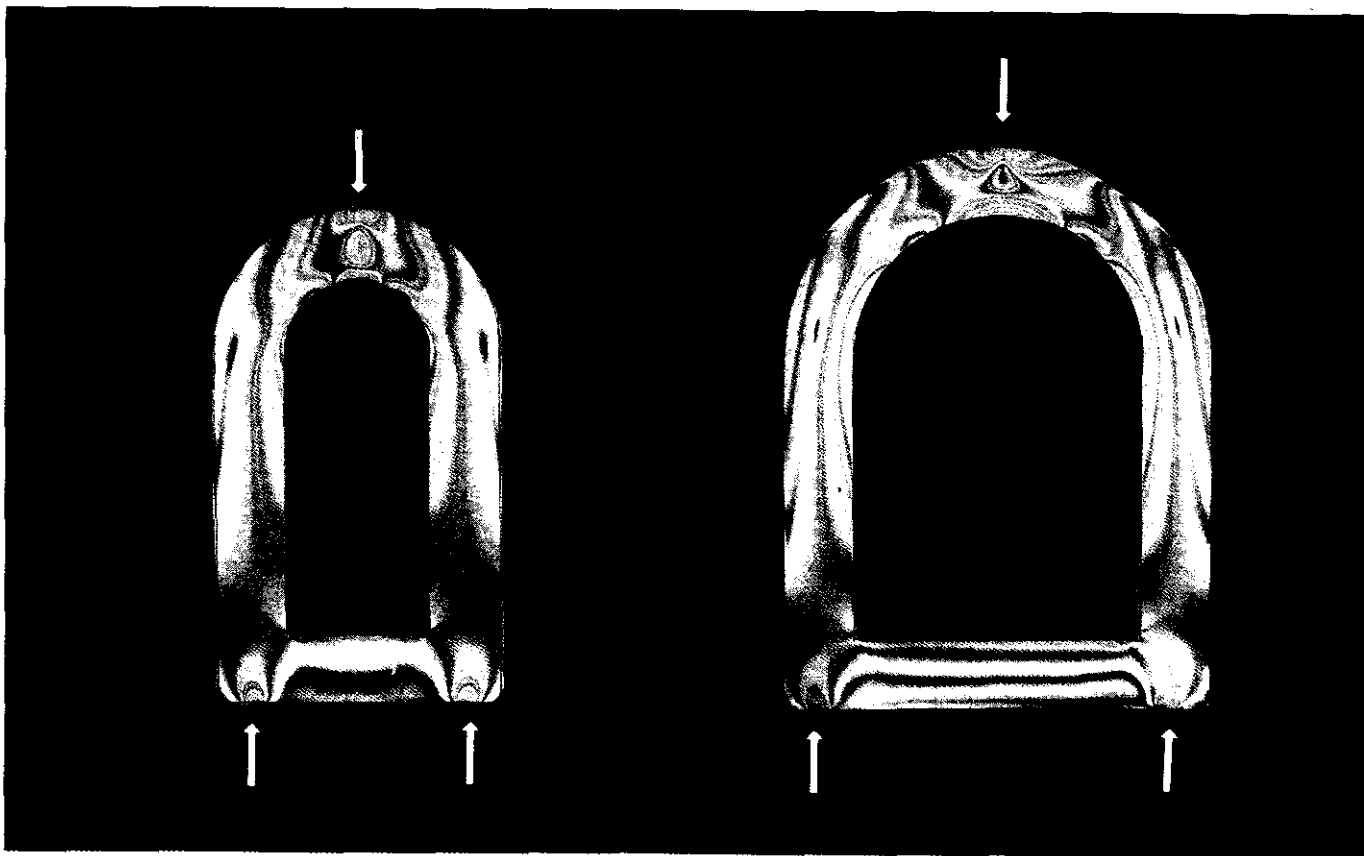


Figura 11.

**EL EMPUJE EN LOS ARCOS**

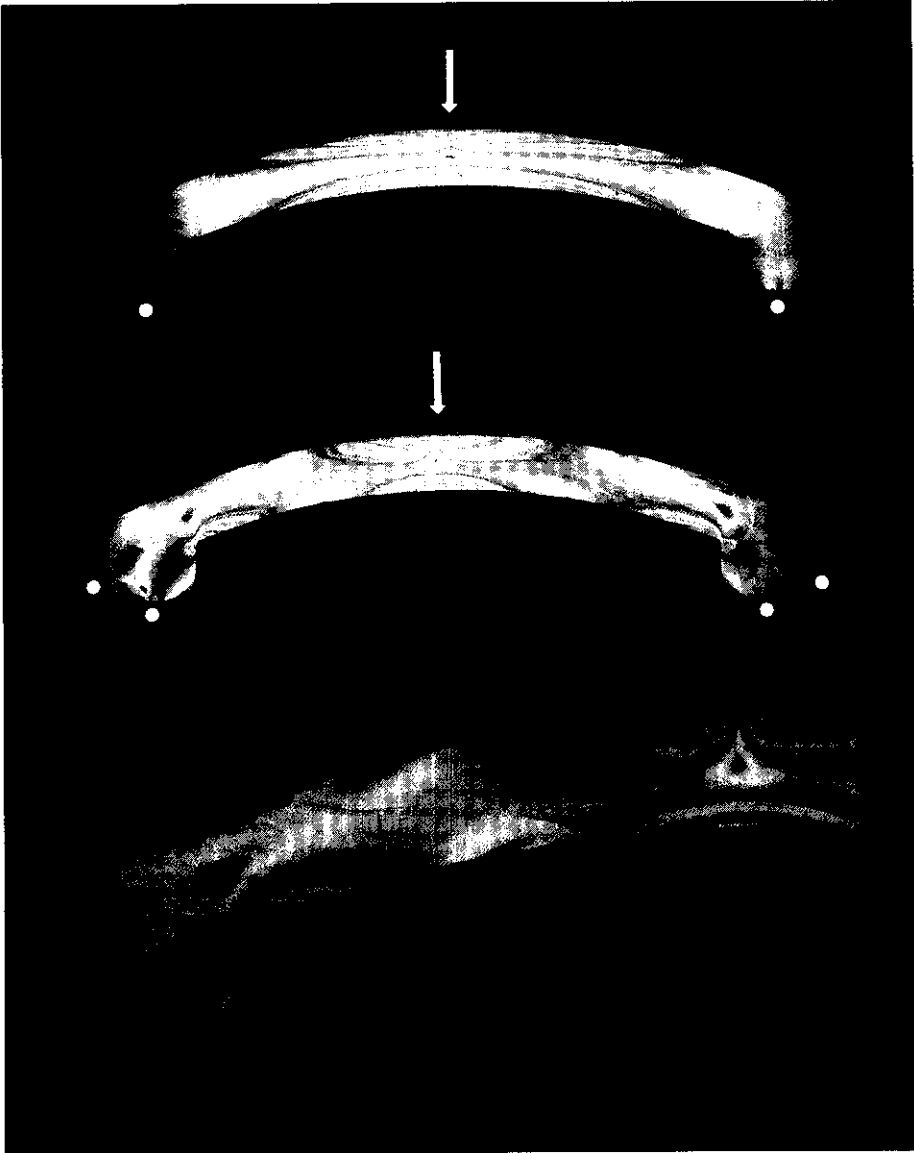
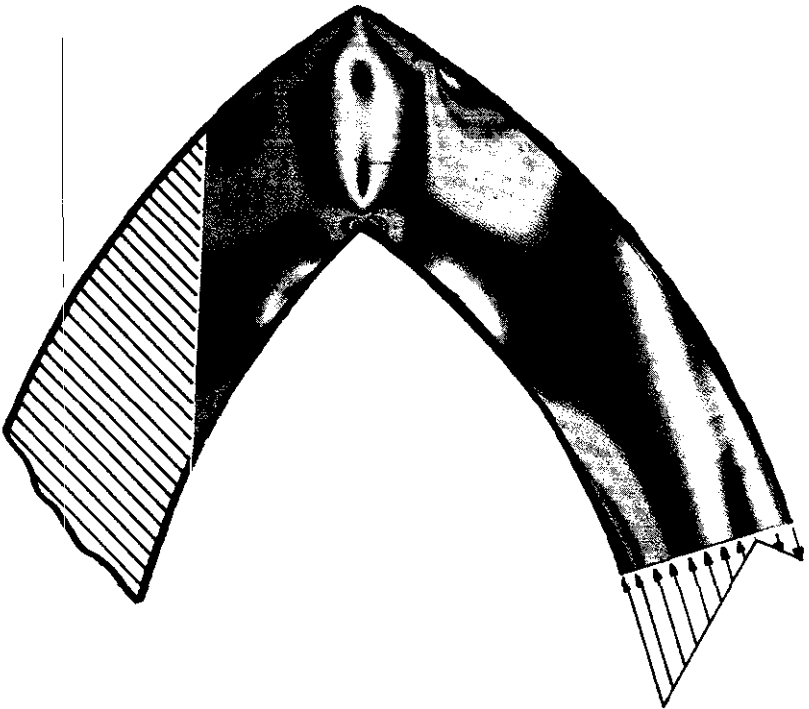


Figura 12.



EL ARCO APUNTADO

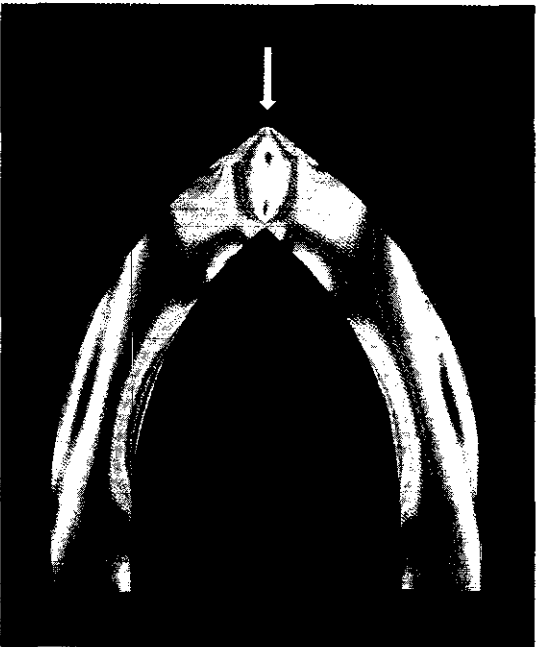


Figura 13.

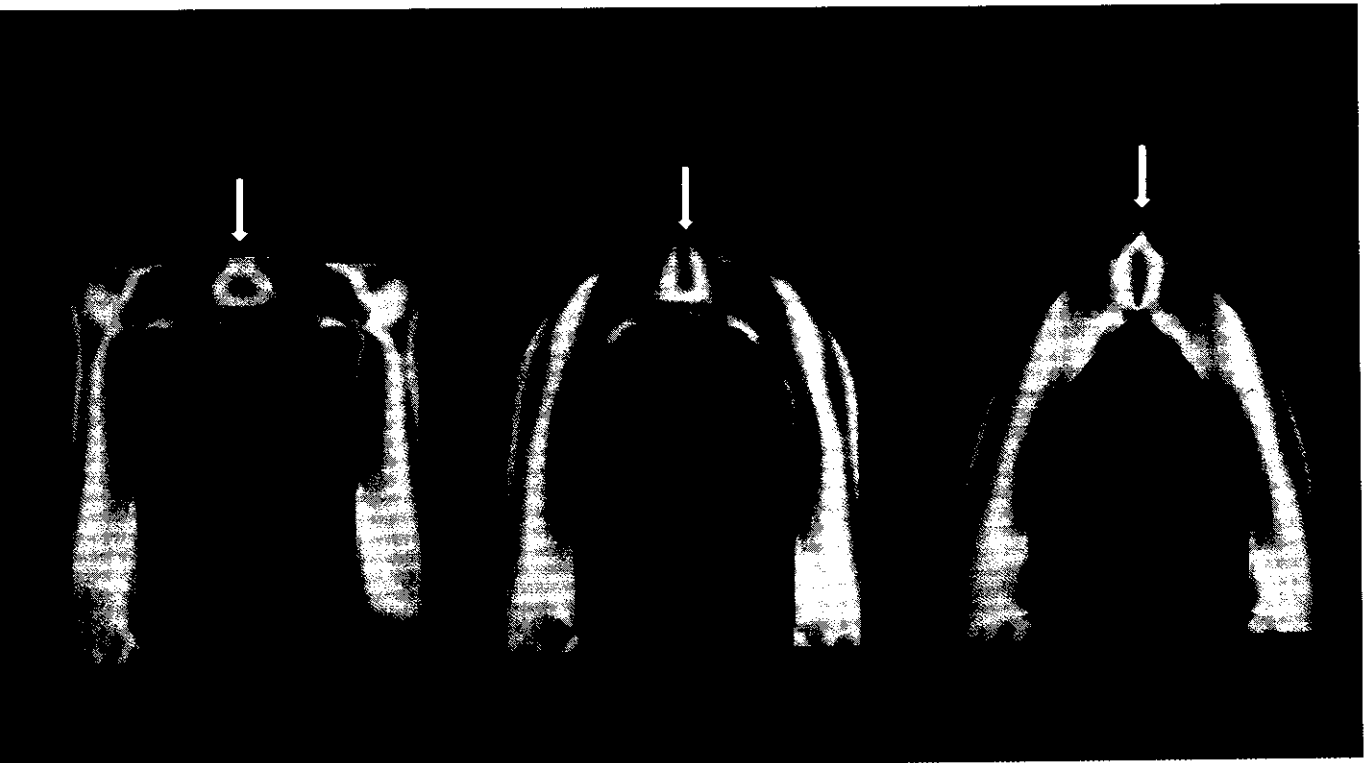


Figura 14.

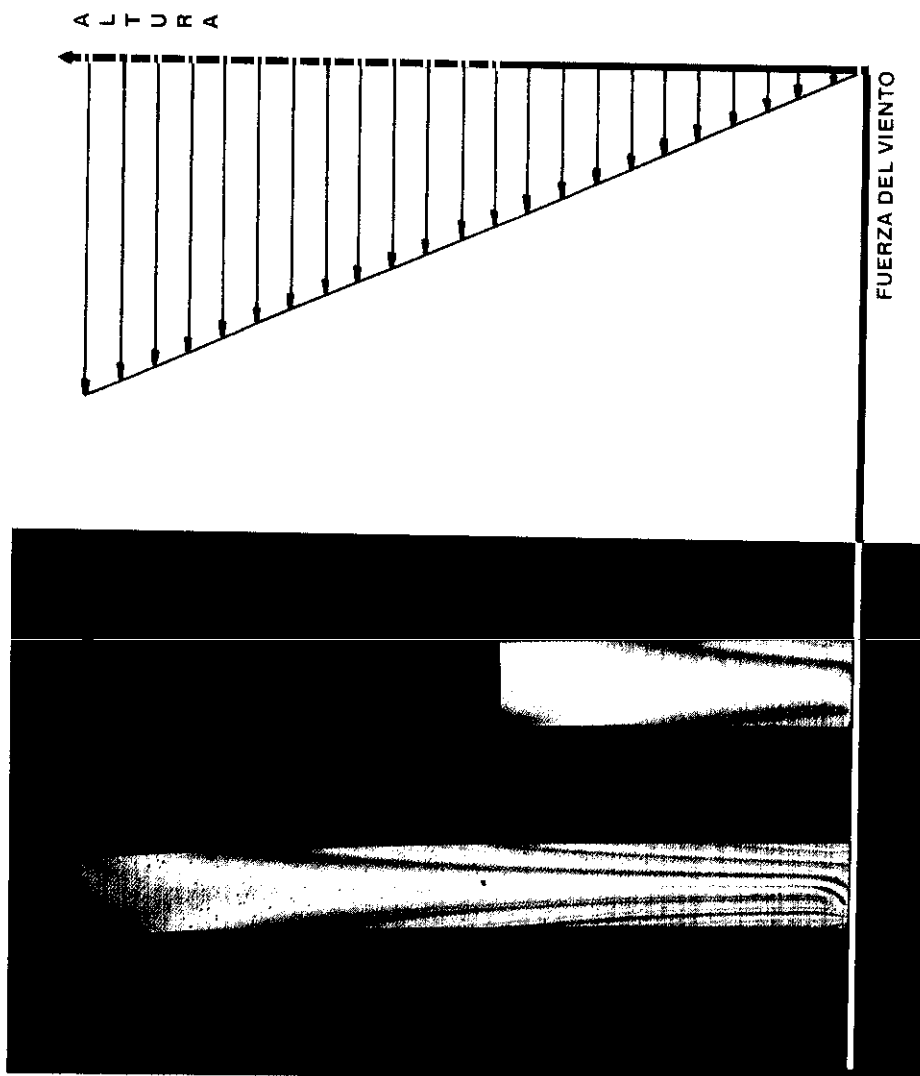


Figura 15.



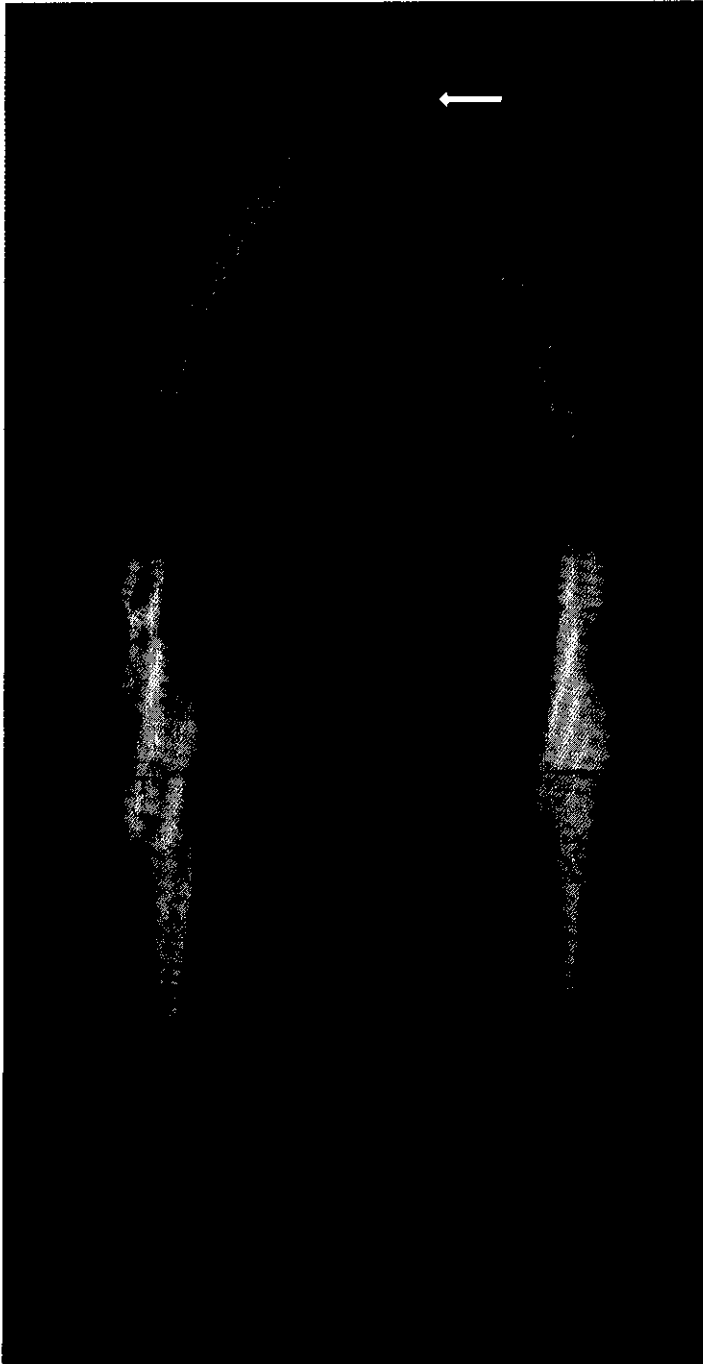


Figura 16.

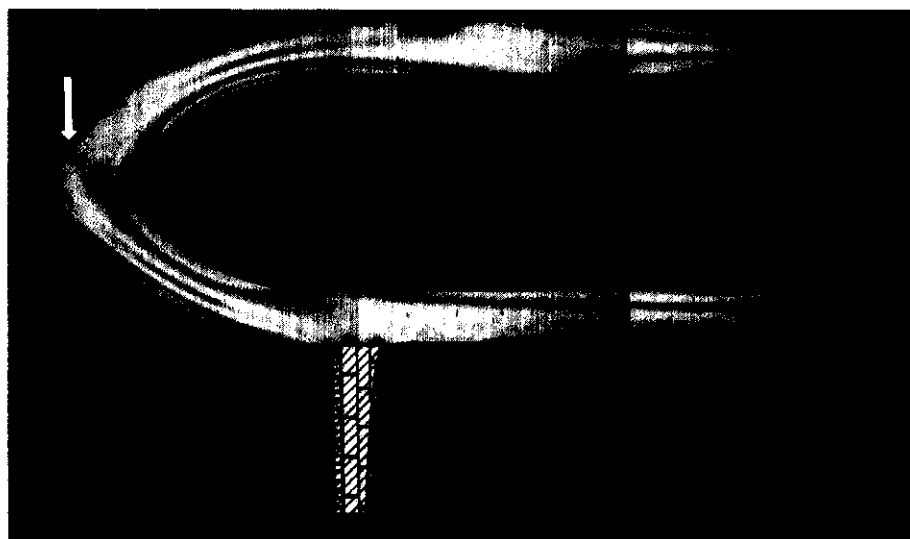
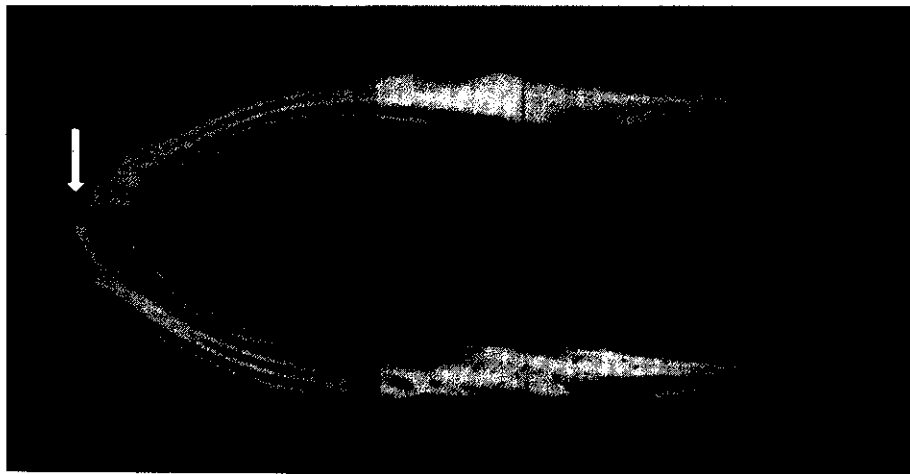


Figura 17.

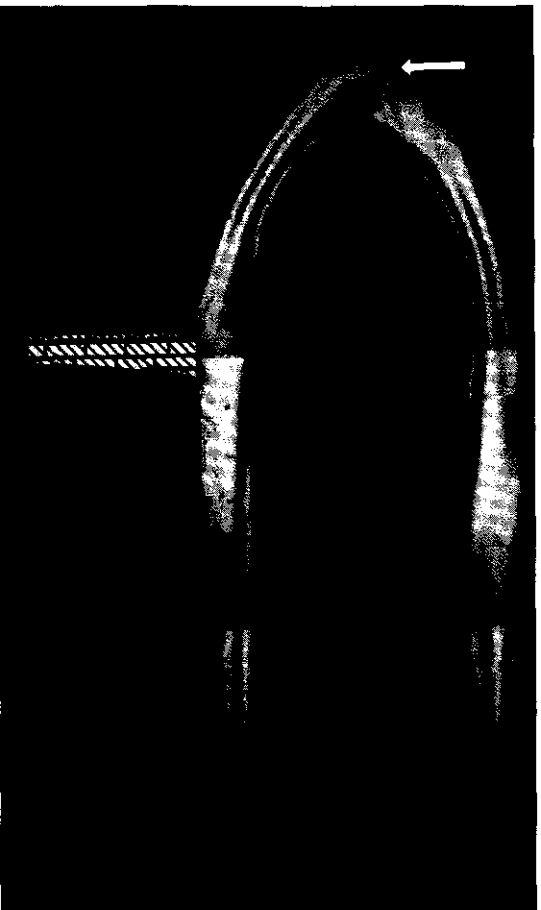
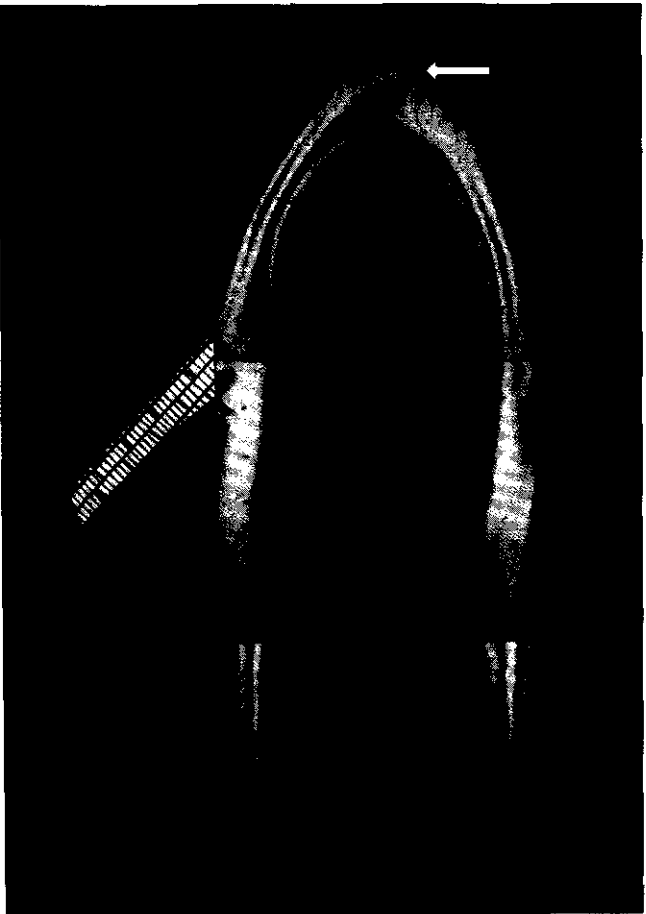


Figura 18.

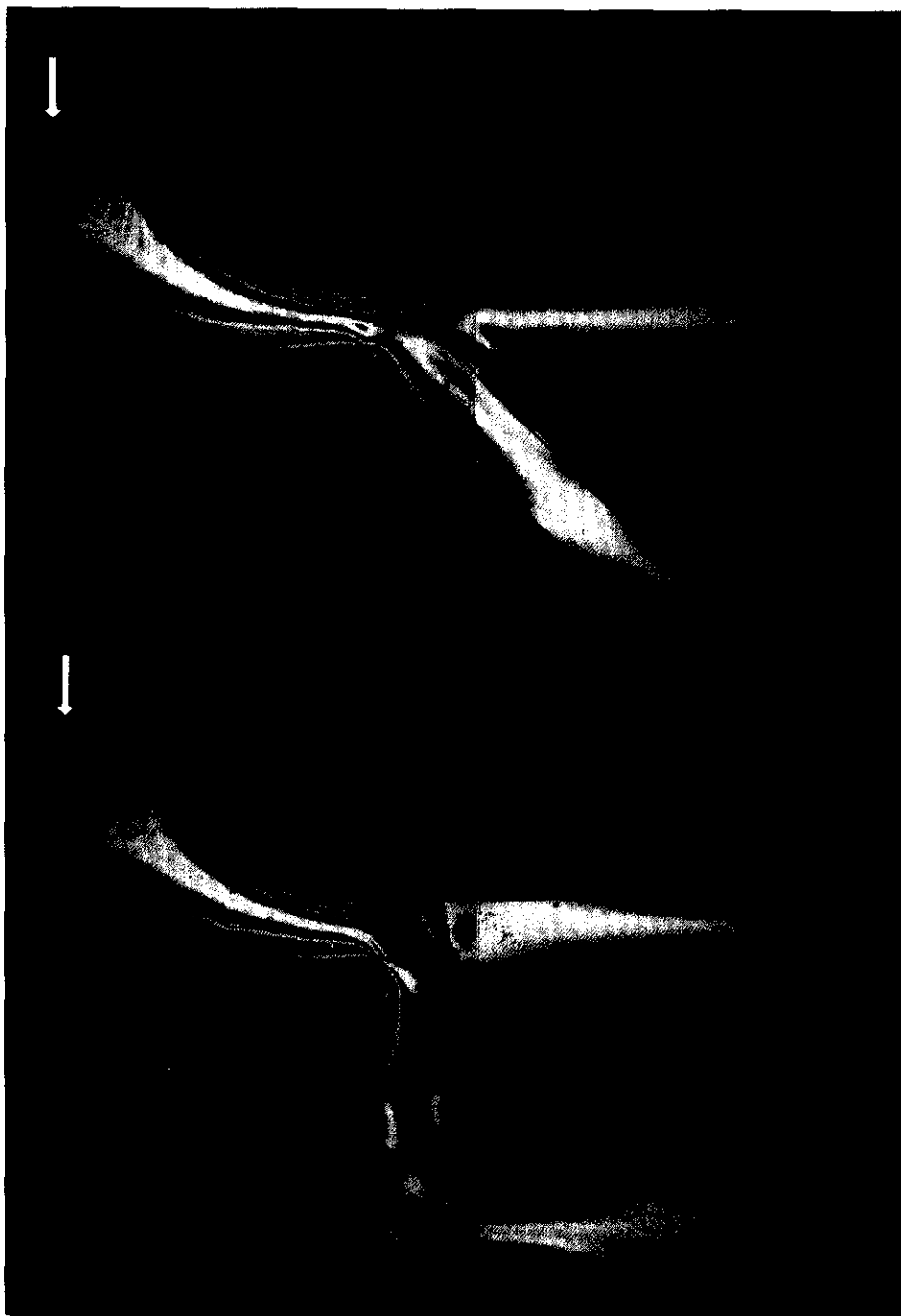


Figura 19.