

# TÈCNiques EXPERIMENTALS D'ANÀlisi DE TENSIONS DE TREBALL EN PECES I ESTRUCTURES

per: Francesc Roure Fernández

Jesús Sanz Rúbies

Professors Encarregats de Curs

Laboratori d'Elasticitat i Resistència de Materials

Joan Josep Vázquez Solsona

Professor Encarregat de Curs

Càtedra de Cinemàtica i Dinàmica de Màquines

## RESUM

En la necessitat del coneixement i previsió del comportament de peces i estructures davant la sol·licitació de forces, s'han elaborat diferents tècniques d'anàlisi de tensions; algunes teòriques, com són la Teoria de l'Elasticitat, la Resistència de Materials, o el Mètode dels Elements Finitos; i d'altres experimentals, com són l'Extensometria mecànica, òptica i elèctrica, les Galgues extensomètriques, la fotoelasticitat, els Vernissos esquerdables, els reticles de Moiré, etc .... En l'article es fa una presentació global de les tècniques experimentals d'anàlisi de tensions, deixant per escrits posteriors estudis puntuals més profunds de les més emprades actualment, i de les seves tendències pel futur immediat. Es justifica la seva raó d'ésser. S'enuncien totes, i s'expliquen els seus principis bàsics, els mètodes de treball, i les propietats més característiques. Finalment es dona una visió de conjunt comparativa dels camps d'aplicació actuals de totes les tècniques. Bastants de les figures serveixen com a exemple pràctic d'aplicacions; algunes són de difusió comú, o bé d'autors concrets, i d'altres provenen de realitzacions pròpies del Laboratori.

## SUMMARY

Different techniques have been developed for analyzing stresses in pieces and structures as a demand for a more exact knowledge and forecast of their behaviour when submitted to work. Some of those techniques are theoretic, for example the Theory of Elasticity, the Strength of Materials, or the Method of the Finite Elements; others are of a more experimental character, such as mechanical optic and electric Extensometers, Strain gages, Photoelasticity, Brittle Lacquers, Moiré, etc. A rather exhaustive presentation of the different experimental techniques used in the stress analysis is made, but a more detailed description of the methods in use, now-a-days, has been left for another occasion, as well as the trend of their possible development in the future. Their place in the modern technical situation is justified and we mention each of them, explaining their basic principles, procedure and characteristics. All the techniques in use and their applications are analysed comparatively. Many of the figures tell their own story. We have resorted to common sources, experiments in our laboratory and to some special authors.



## INTRODUCCIÓ

La difusió actual de las tècniques experimentals d'anàlisi de tensions és gran, perquè cobreixen molts d'aspectes que els mètodes teòrics no resolien satisfactòriament: les peces de forma complicada no admeten un tractament teòric senzill i assequible; els efectes de concentracions de tensions no són atacables pels mètodes clàssics de Resistència de Materials, i són decisius a l'hora del càlcul a fatiga; les hipòtesis de càrrega són, de vegades, difícils o impossibles d'establir; en les sobrecàrregues dinàmiques o d'impacte les tensions - transitòries són molt difícils de calcular teòricament; i com aquests, molts altres casos.

Si es fa un repàs de les tècniques experimentals d'anàlisi de tensions, es veu que realment no es mesura en cap cas les tensions, sinó les deformacions o els efectes produïts per les deformacions. En rigor, s'hauria doncs de parlar de tècniques d'anàlisi de deformacions. Preferim, però, mantenir el nom de "anàlisi de tensions", perquè és realment el que es pretén; si bé sobre aquest punt no hi ha acord, en la literatura especialitzada es troben les dues denominacions.

Les tècniques experimentals d'anàlisi de tensions es poden classificar segons el següent criteri:

- Mètodes extensomètrics: es mesuren les deformacions

.Directament, amplificant-les per diferents sistemes (extensòmetres mecànics, òptics, elèctrics, galgues extensomètriques, ...)

.Indirectament, estudiant altres efectes físics produïts per les deformacions (fotoelasticitat, vernissos esquerdables, reticles de Moiré, ...)

- Mètodes per analogia: s'estudien fenòmens físics diferents, que tenen distribucions anàlogues a les tensions (Analogia elèctrica, Analogia de Prandtl,.....).

### EXTENSOMETRIA DIRECTA. GALGUES EXTENSOMÈTRIQUES

Un problema que es presenta molt sovint en l'anàlisi de tensions és la mesura d'aquestes en determinats punts d'una peça o estructura, ja perquè es preveu que en ells les tensions seran altes, o bé perquè per la complexitat del problema es desconeix el que pot passar-hi.

De fet, la mesura que es pren no és de tensió sinó de deformació. L'estudi de les característiques del material, juntament amb les equacions que relacionen tensions i deformacions, permet llavors el càlcul de les tensions. Analitzant el problema en el cas més general convindrà que els sistemes de mesura a emprar compleixin de manera el més aproximada possible les següents condicions:

- 1.- Siguin de tamany reduït. Molts cops la mesura s'ha de fer en una zona molt localitzada o d'accés difícil.
- 2.- De massa menyspreable. Això és per dues raons; pot convenir fer mesures en elements molt febles, que sota un pes elevat veurien alterades les condicions de treball i, per altra part, la mesura de tensions dinàmiques exigeix unes inèrcies reduïdes.
- 3.- Fàcils de muntar en el punt a mesurar. Aquesta qüestió és prou evident per no requerir justificació.
- 4.- Altament sensibles a la deformació, ja que és el valor que pretenem mesurar.
- 5.- No sensibles a altres condicions, com la humitat, la temperatura, etc. Les mesures s'han de fer en llocs en que les condicions poden ser molt variades i els aparells



de mesura no s'han de veure afectats per les variacions d'aquestes magnituds.

- 6.- Capacitat de mesures estàtiques o dinàmiques. Això afecta d'una banda a la inèrcia del sistema de mesura i, per altra part, al seu sistema de lectura; per exemple, cal pensar que una agulla permet seguir només freqüències molt baixes.
- 7.- Serà molt avantatjós que les lectures es puguin fer lluny del punt de mesura, donat que aquest punt pot ésser inaccessible per l'operador, mentre es prenen les mesures.
- 8.- El més econòmic possible. Aquest criteri es fa molt evident si es pensa que en alguns casos convé fer mesures de cents de punts.
- 9.- En alguns casos la base de mesura ha de ser el més curta possible. Això es deu a què és molt usual l'aparició de fenòmens localitzats en una petita zona.

Es descriuen a continuació els sistemes de mesura més utilitzats actualment, indicant - les seves qualitats i defectes més destacats d'acord amb els punts descrits abans.

Els primers sistemes utilitzats foren els extensòmetres mecànics, entre ells es mantenen encara alguns tipus. El sistema es basa en l'ampliació del desplaçament entre dues puntes "clavades" en el lloc a mesurar, mitjançant un sistema de palanques. Referint aquest desplaçament a la base de l'extensòmetre, de longitud  $l$ , s'obté el valor que normalment es cerca en aquestes mesures, l'allargament unitari  $\epsilon$ ;  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ . En les figures 1 i 2 apareixen dos extensòmetres d'aquest tipus.

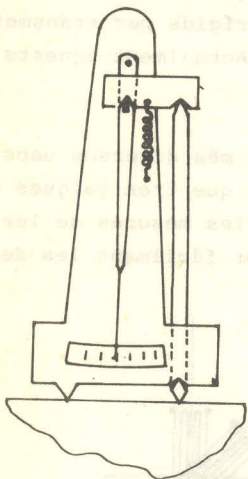


FIG. 1 EXTENSÒMETRE HUGGENBERGER

Com es pot veure aquests aparells compleixen en un grau molt petit els condicionaments per l'extensòmetre "ideal" descrits abans. Són de tamany relativament gros, d'una massa gens menyspreable, requerint una sèrie de dispositius accessoris pel muntatge, sense capacitat de fer mesures dinàmiques ni de traslladar la lectura lluny del punt de mesura. Són aparells que han de ser construïts amb molta precisió i, per tant, en sí relativament cars. La base de mesura ha de tenir una dimensió mínima; per sota, el valor  $\Delta l$  llegit es torna massa petit.

Una solució quasi perfecta pels problemes d'anàlisi de tensions la va portar la galga extensomètrica, apareguda a EE.UU. els anys 30, amb alguns precedents europeus. La galga extensomètrica consisteix en essència en un fil conductor, disposat en forma de graella, damunt d'un suport de material aïllant, d'un gruix molt petit. En la fig.4 es pot veure la disposició esquemàtica d'una galga extensomètrica.

Un dels problemes dels extensòmetres mecànics són els fregaments i possibles jocs entre peces, - que poden donar lloc a imprecisions. Per resoldre aquest problema es varen idear els extensòmetres òptics, un dels més coneguts és el Martens que apareix en la figura 3. En lloc de ser un joc de palanques el que amplifica el moviment, és un raig de llum procedent d'un focus fix, reflectat per un petit mirall que es mou amb la deformació de la peça, i projectat a una distància adient al grau d'amplificació requerit.

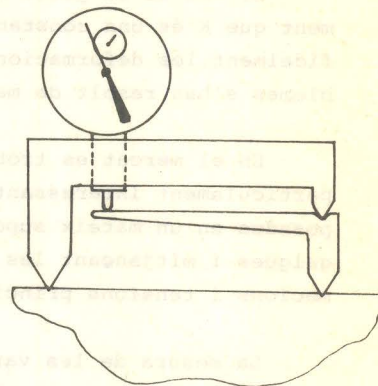


FIG. 2 EXTENSÒMETRE BERRY

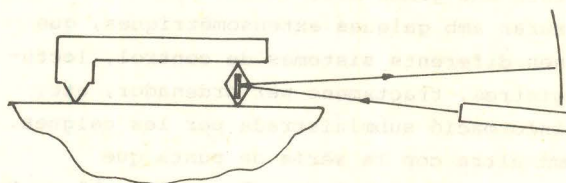


FIG. 3 EXTENSÒMETRE ÒPTIC MARTENS



El tamany usual d'aquestes galgues està comprès entre menys d'un mm. i alguns cm., segons l'ús que se li vulgui donar.

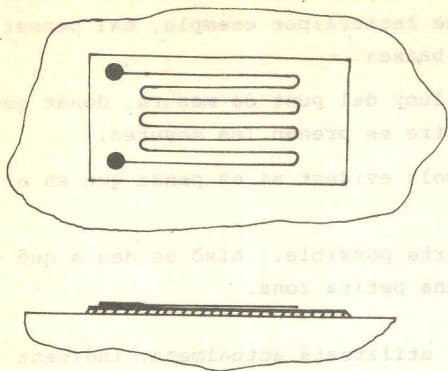


FIG. 4 GALGA EXTENSOMÈTRICA

El principi de funcionament és senzill. - Des del punt de vista elèctric una galga no és més que una resistència d'un determinat valor R. Si s'encola la galga sobre el lloc en que es vol conèixer la deformació, i en la direcció en que es vol conèixer, els fils de la galga es deformaran també, i canviarà el valor de la seva resistència en un valor  $\Delta R$ . Resulta ser, i això és el fonament de l'ús de les galgues extensomètriques, que es compleix la relació:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \epsilon$$

en que K és una constant anomenada constant de la galga. Es tradueix, doncs, el problema de mesurar deformacions en el problema de mesurar canvis de resistències, més fàcil de solucionar.

El fil de la galga ha de ser d'uns materials determinats, pels quals es compleix realment que K és una constant. El suport i l'encolat han d'ésser molt rígids per transmetre fidelment les deformacions del cos en estudi al filament sensible. Actualment aquests problemes s'han resolt de manera molt satisfactòria.

En el mercat es troben galgues amb configuracions adaptades als més diversos usos; és particularment interessant la roseta de tres direccions que no és més que tres galgues disposades en un mateix suport i en direccions conegudes. A partir de les mesures de les tres galgues i mitjançant les equacions de l'elasticitat es poden calcular fàcilment les deformacions i tensions principals. (Veure Fig. 5)

La mesura de les variacions de resistència es fa habitualment amb el pont de Wheatstone. Normalment s'amplifica el senyal de desequilibri, podent-se treballar amb mètodes de desviació o de compensació. Cadascun té els seus avantatges i inconvenients. Actualment s'ha desenvolupat tota una gamma molt variada d'instrumentació per mesurar amb galgues extensomètriques, que comprenen diferents sistemes de control, lectura, registres, tractament per ordinador, etc, de la informació subministrada per les galgues. Repassant altre cop la sèrie de punts que

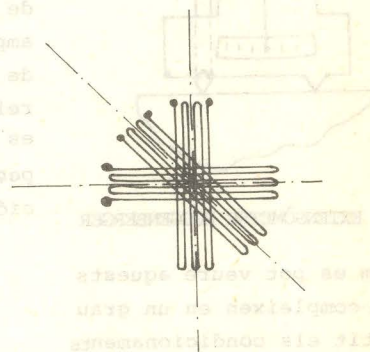


FIG. 5 ROSETA TRES DIRECCIONS

descriuen l'"extensòmetre ideal", veiem que pràcticament descriuen com és la galga extensomètrica.

- 1.- El tamany de la galga pot ésser quasi tan petit com convingui. Es fabriquen galgues de menys de 0,5 mm.
- 2.- La massa de la galga es ridícula, i, per tant, la seva inèrcia totalment menyspreable.
- 3.- Actualment, i amb les modernes coles, el procés de col·locació de les galgues requereix únicament una preparació de la superfície de la zona a encolar, per deixar-la polida i sense greix, a continuació es posa la galga exercint una certa pressió. Algunes coles requereixen processos de curat en calent; però, en els casos normals d'anàlisi de tensions no són necessaris aquests graus de precisió, i es poden utilitzar coles que en mig minut resten endurides.
- 4.- La sensibilitat de les galgues a la deformació arriba a uns nivells totalment inasso-



libles amb altres mètodes. S'han arribat a mesurar valors de  $\epsilon = 10^{-9}$  i la majoria d'a parells amplificadors corrents precisen el  $\epsilon = 10^{-6}$  en el seu sistema de lectura.

5.- No sensibles a altres condicions. En principi aquí apareix un problema, i és la sensibilitat a la temperatura. La galga no distingeix si les deformacions provenen d'un esforç o d'un canvi de temperatura. Això se solventa fàcilment amb muntatges de les galgues en el pont de Wheatstone, anomenats de compensació.

Altres condicions ambientals no afecten les galgues si estan ben protegides i recobertes amb capes de materials aïllants i resistents als diferents ambients.

6.- La galga, per si mateixa, pot mesurar perfectament fenòmens estàtics o dinàmics. Això cal tenir-ho en compte solament en pensar amb l'instrumentació a utilitzar per fer l'ampliació i la lectura.

7.- Les lectures es poden fer tan lluny de la galga com es vulgui, només cal posar un fil suficientment llarg.

8.- Actualment les galgues per anàlisi de tensions estàn a uns preus molt assequibles, en cara que les galgues col.locades no es poden recuperar. Tot i que en aquest país les galgues resulten més cares pel fet de ser estrangers tots els fabricants, i ser, per tant, un article d'importació.

9.- Com ja s'ha comentat en el primer punt, es fabriquen galgues amb graelles de mesura de menys de 0,5 mm., que resolten pràcticament la majoria dels problemes que es presenten en anàlisi de tensions.

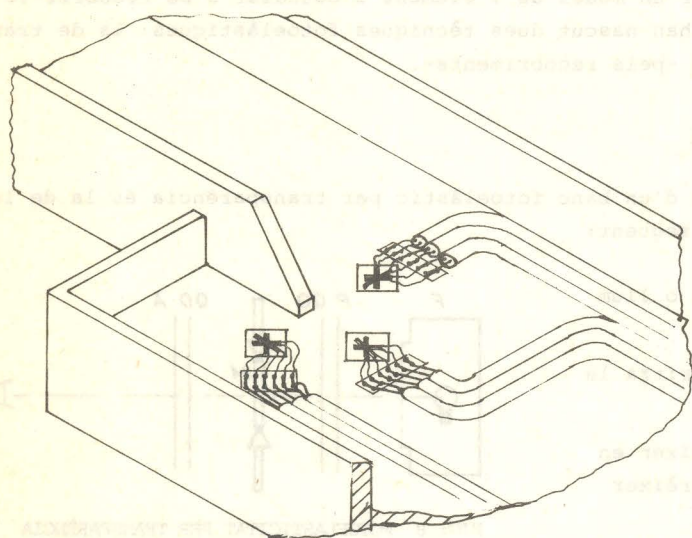


FIG. 6 EXEMPLE DE COL·LOCACIÓ DE ROSETES

Veient les qualitats de - les galgues, és fàcil d'imaginar tota una sèrie d'aplicacions en que les galgues seran, si no in-substituïbles, sí molt adequades. La mesura de tensions en elements d'un vehicle en marxa, la mesura de tensions produïdes per un impacte o explosió són casos ben clars en que les galgues extenso mètriques son gairebé insubstituïbles. En altres casos, p. ex. mesures en peces de formigó amb càrregues lentament variables, encara que es pot recórrer a uti litzar altres mètodes, s'usen en la majoria de casos les galgues. Especial atenció mereixen els - sistemes que, utilitzant galgues extensomètriques, permeten conèi xer els valors de magnituds físiques, que produeixen deforma- cions en elements que porten les dites galgues.

Veiem-ho amb un exemple; si es pretén pesar, el sistema de la figura 7 ens permetrà fer -ho de forma senzilla.

La barra amb galgues es deformarà sota l'acció del pes, i la lectura del senyal de les galgues es pot graduar directament en Kgs. Si el - sistema carregat sofreix una acceleració vertical les galgues ho registren, tenim aleshores un acce leròmetre. Es poden imaginar tota una sèrie de sistemes de mesura d'aquest tipus; de fet n'exis

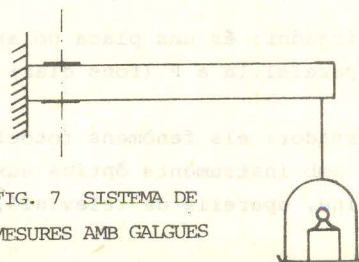


FIG. 7 SISTEMA DE MESURES AMB GALGUES



teixen molts en el mercat; se'n solen dir captadors o transductors, i arriben a uns graus de precisió molt elevats.

#### EXTENSOMETRIA INDIRECTA. FOTOELASTICITAT

La fotoelasticitat ha estat fins fa pocs anys l'únic mètode experimental de camp complet quantitatiu i amb suficient precisió, per l'estudi de distribucions de tensions. L'aparició i extensió del càlcul numèric mitjançant el mètode dels elements finits, ha ocupat una part de l'àmbit d'aplicació de la fotoelasticitat. Hi ha, però, molts de camps en que l'aplicació de la fotoelasticitat segueix essent la més escaient; tal com es veurà amb més detall en estudiar, al final, els camps d'aplicació actual de les tècniques d'anàlisi de tensions.

La fotoelasticitat és un cas feliç d'aprofitament d'un efecte indirecte de les tensions: les tensions provoquen unes deformacions, i aquestes provoquen -en determinats cossos transparents- unes variacions de l'índex de refracció que fa que la llum que travessi al cos amb una o altra orientació tingui velocitats d'avanç diferents. Estudiant les interferències que això produeix en llum polaritzada, es pot conèixer la distribució de tensions que les ha provocat.

Aquests fenòmens són "relativament" senzills d'estudiar en casos d'estats plans de tensió; però bastant més difícils, si són estats tridimensionals. En els casos en que és possible -molts, per sort, en l'enginyeria- es redueix el problema al pla; en general, tots els problemes en les superfícies de les peces, són problemes plans. Donat que la majoria de materials emprats en enginyeria no són transparents, ni tenen birrefringència accidental; per poder aplicar la fotoelasticitat cal fer un model de l'element a estudiar o bé recobrir-lo amb un material fotoelàstic. Així ens han nascut dues tècniques fotoelàstiques: la de transparència -pels models- i la de reflexió -pels recobriments-.

#### Fotoelasticitat plana per transparència

La disposició típica dels elements d'un banc fotoelàstic per transparència és la de la figura 8. Cada un dels elements és el següent:

F: Font de llum; pot ésser llum blanca o llum monocromàtica.

P: Polaritzador; és una placa que polaritza la llum (veure fig. 8)

QO: Làmines de quart d'ona; s'introdueixen en el muntatge, quan convé fer desaparèixer òpticament les isòclines.

M: Model; el model de la peça o element en estudi ha d'ésser fet en un material fotoelàstic (o sigui, que tingui birrefringència accidental); aquesta propietat la tenen bastants de materials: resines epoxi, polimetacrilat, policarbonat, poliestirés, vidre, goma de poliuretà, gelatina, etc. Les càrregues i dimensions del model han d'ésser tals que es puguin considerar les tensions creades com un estat pla de tensions; ja que els fenòmens fotoelàstics s'estudien, en aquest cas, amb aquest supòsit.

A: Analitzador; és una placa polaritzadora, idèntica al polaritzador P; es pot col·locar paral·lela a P (fons clar) o perpendicular (fons fosc).

O: Observador; els fenòmens fotoelàstics es poden observar directament, a simple vista, o bé amb instruments òptics auxiliars, tals com microscopis, màquines de fotografiar, de cine, aparells de televisió, etc....

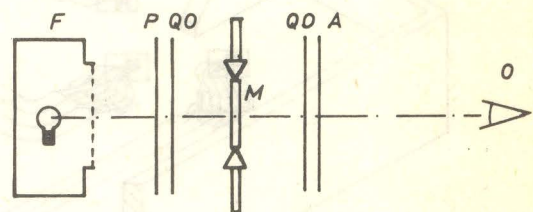


FIG: 8 FOTOELASTICITAT PER TRANSPARÈNCIA



## Fotoelasticitat per reflexió.

El principi és el mateix, únicament canvia la disposició geomètrica dels elements, que és la de la fig 9. La llum polaritzada travessa el plàstic M, que està encolat a la peça o estructura en estudi i que segueix totes les deformacions que aquesta l'hi imposa, es reflecta en la cola reflectant, travessa el plàstic en sentit contrari i s'observa a través de l'analitzador A. (figura 10)

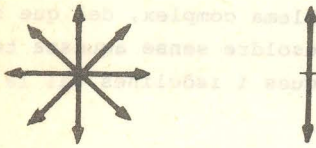


FIG. 10 LLUM NORMAL; LLUM POLARITZADA

Aquesta tècnica té diversos avantatges:

- l'estudi es fa sobre la peça directament i en condicions de treball reals; s'eviten doncs, d'entrada, tots els errors que es poguessin introduir en treballar amb model.
- l'aparell, en anar tots els elements en paral·lel, i no en línia com en la transparència, és compacte i portàtil.
- permet d'estudiar no solament superfícies totalment planes, sinó també les que tenen curvatures moderades.

Té, també, els seus inconvenients:

- la llum no pot incidir, per raons geomètriques òbvies, normalment sobre el plàstic, sinó amb una certa inclinació.
- la qualitat de la imatge, degut a reflexions directes, és inferior a la l'obtinguda per transparència.
- la sensibilitat sol ésser més baixa

## Què s'obté d'un estudi fotoelàstic pla.

En un estudi fotoelàstic pla cal distingir tres etapes: a) Observació i registre de corbes, b) Elaboració de les corbes i primer estudi, i, c) Mesura o càlcul de la "tercera dada" i estudi complet.

a) Observació i registre de corbes: Quan el model o la peça estan descarregats el camp visual proporcionat pel polariscop és, o bé tot fosc (polaritzadors creuats), o bé tot clar (polaritzadors paral·lels). Normalment es treballa amb fons fosc. Quan s'apliquen al model o peça les tensions i es provoquen les deformacions en el plàstic, apareixen dos tipus de línies o zones:

- isocromàtiques: línies d'igual color, que passen pels punts en que el mòdul de la diferència de tensions principals és constant; o sigui  $(N_1 - N_2) = ct$ . Donen, doncs, coneixent la constant de sensibilitat del plàstic emprat, el valor de  $(N_1 - N_2)$  en cada punt.
- isòclines: línies negres que donen en cada punt la inclinació ( $\theta$ ) de les direccions principals respecte d'un eix de referència escollit.

Aquestes corbes es poden dibuixar a mà en un paper o directament sobre el model o peça, fotografiar o filmar, o enregistrar, mitjançant aparell de televisió, en la memòria d'un ordinador.

b) Elaboració de les corbes i primer estudi: A partir de les isòclines es poden dibuixar les isostàtiques; línies que en cada punt són tangents a les direccions principals. Surten dues famílies d'isostàtiques ortogonals.

Així, doncs, en un primer estudi fotoelàstic pla s'obtenen les isocromàtiques i les



isòclines, i es poden construir les isostàtiques. Dit d'altra manera, en cada punt es coneix:

$$(N_1 - N_2) \text{ i } \theta$$

Com que l'estat de tensions pla en un punt ve definit pel tensor tensió en una de les dues formes

$$\begin{vmatrix} n_1 & t_3 \\ t_3 & n_2 \end{vmatrix} \quad \delta \quad \begin{vmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{vmatrix} \quad \text{i } \theta$$

en qualsevol cas calen tres dades per punt, i aquest primer estudi fotoelàstic en proporciona només dues. Cercar la "tercera dada" en fotoelasticitat és un problema complex, del que se'n parlarà tot seguit. Hi ha, però, casos i problemes que es poden resoldre sense aquesta tercera dada; i que donada la relativa "rapidesa" d'obtenir isocromàtiques i isòclines val la pena considerar.

#### Exemples d'interpretacions directes.

En tots els caires lliures, i sense aplicació de forces externes, les direccions principals són, una paral·lela al caire, i l'altra perpendicular i igual al zero. La major part dels problemes d'efectes de concentració de tensions deguts a entalles, forats i efectes de forma en general, presenten els punts més perillosos en els caires, i per tant es poden estudiar per aquest mètode. (Veure fig. 11)

Tot sovint el coneixement de la xarxa d'isostàtiques dóna suficient informació sobre la transmissió de forces en l'interior de la peça estudiada. La forma i densitat de les línies de força (les isostàtiques) dóna informació sobre la concentració o dispersió de tensions. Amb aquestes dades es pot redissenyar la peça. (Veure fig. 12).

En altres casos es pot preveure quin tipus de sol·licitació hi haurà en determinades zones; el que es fa amb la fotoelasticitat és quantificar aquestes sol·licitacions. Un cas típic és la presència combinada d'esforços normals i de flexió; amb les dades dels caires lliures i la posició de la isocromàtica d'ordre zero es poden determinar els valors de les dues sol·licitacions (Veure fig.13).

c) Mesura o càlcul de la "tercera dada", i estudi complet: la "tercera dada" necessària per definir completament l'estat de tensions

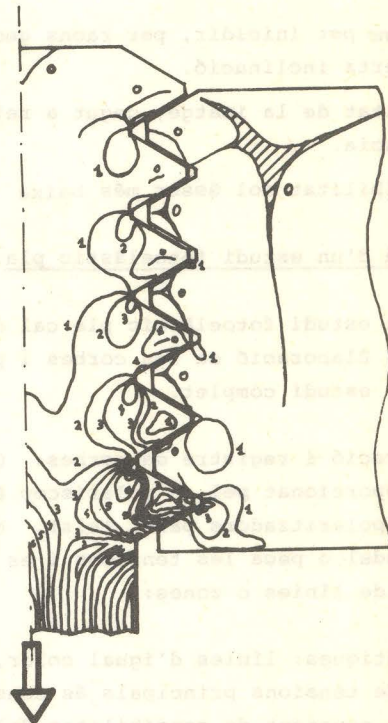


FIG. 11 ISOCROMÀTIQUES EN UN MODEL DE FILETEJAT SOTMÉS A TRACCIÓ. DIRECTAMENT ES POT QUANTIFICAR LA CÀRREGA SUPORTADA PER CADA FILET. (SEGONS CENTRE D'ESSAIS ET RECHERCHES DE DELLE - ALSTHOM)

en qualsevol punt de la peça, pot ésser:

- el valor d'una de les tensions principals ( $N_1$  ó  $N_2$ ), obtingut a partir de la integració gràfica o numèrica de les equacions d'equilibri; o mitjançant el mesu-

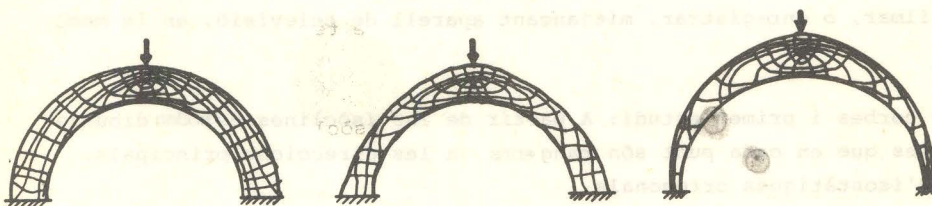


FIG. 12 ISOSTÀTIQUES. EVOLUCIÓ DEL DISSENY D'UN ARC (SEGONS BOITTEAUX I BASSARD)



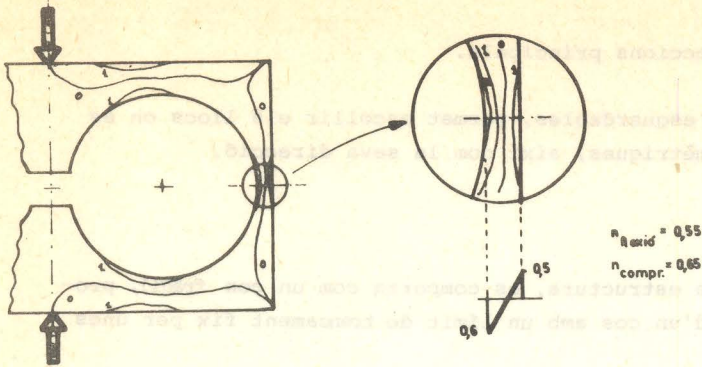


FIG: 13 ISOCROMÀTIQUES. EVALUACIÓ DIRECTE DE LA FLEXIÓ I DE LA COMPRESSIÓ.

La fotoelasticitat tridimensional.

Per aquells casos en que no és possible o vàlid reduir el problema a un estat pla de tensions, s'han ideat tres mètodes de fotoelasticitat tridimensional:

- Incloure unes làmines planes de material fotoelàstic dins d'un model no fotoelàstic; i estudiar només aquestes làmines, i com a casos plans de tensió.
- "Congelar" en el model les línies fotoelàstiques (mitjançant un procés de calentament, càrrega, i refredament molt lent sota càrrega, del model); tallar curosament el model en llesques i estudiar cada una d'elles com una làmina plana. Les variacions en la direcció perpendicular s'estudien per les diferències entre llesques consecutives. (Veure fig. 14)

- "Congelar" en el model les línies fotoelàstiques i estudiar-lo mitjançant el mètode de llum difusa refractada.

Aquest tercer és l'únic mètode pròpiament tridimensional. Els altres dos són un estudi per plans del problema tridimensional.

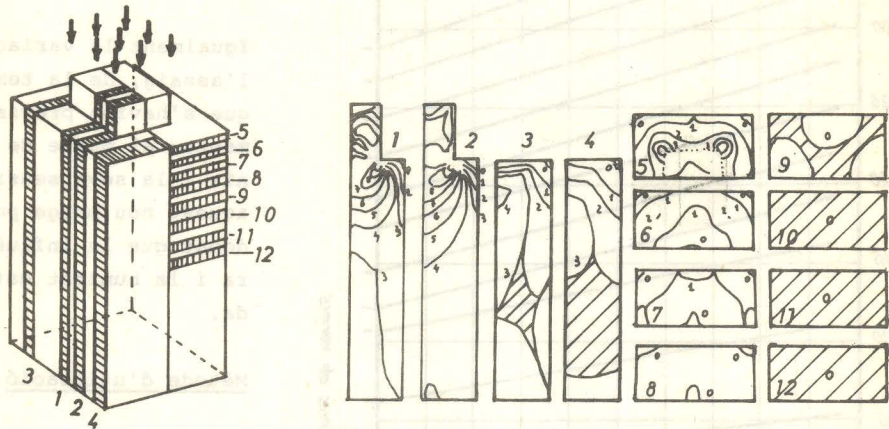


FIG: 14 ISOCROMÀTIQUES DE LES LLISQUES D'UN MODEL TRIDIMENSIONAL "CONGELAT". (SEGONS KUSKE I ROBERTSON).

VERNISOS ESQUERDABLES

Els vernissos esquerdables és un procediment molt senzill i econòmic per evaluar les tensions en estructures reals. La superfície de l'estructura es cobreix amb una capa prima d'un vernís, que té la propietat de trencar-se per un allargament determinat. Després de la imprimició amb el vernís, la peça que volem estudiar, es carrega progressivament. Quan apareixen les esquerdes en una regió vol dir que les tensions locals corresponen a un allargament conegut. A mesura que es va augmentant la càrrega, apareixen esquerdes en altres regions que estaven menys sol·licitades.

Amb aquesta tècnica s'obté una informació bastant elemental, encara que és útil, ja que permet desxifrar quines són les regions més sol·licitades. A més, les esquerdes es

rament en un interferòmetre.

- el valor de la suma de les tensions principals ( $N_1 + N_2$ ), obtingut gràficament, numèricament, per procés iteratiu, experimentalment mitjançant un extensòmetre lateral, l'analogia elèctrica o mesurament en un interferòmetre.

En qualsevol cas, s'arriba a determinar completament l'estat de tensions en un punt; essent habitual referir els resultats a seccions senceres de la peça.



dirigeixen amb bona precisió segons les direccions principals.

Un estudi preliminar amb els vernissos esquerdables, permet escollir els llocs on es podrien encolar després les galgues extensomètriques, així com la seva direcció.

#### Tipus de vernissos. Elecció d'un vernís.

El vernís dipositat i assecat sobre una estructura, es comporta com un cos fràgil, propietat que és essencial per poder disposar d'un cos amb un límit de trencament fix per unes condicions ambientals donades.

La capa de vernís lligada a l'estructura es fisurarà a causa d'una tracció superior al seu límit de trencament, ja sigui degut a deformació per tensions de treball o a deformació per dilatacions tèrmiques.

Es fa necessari, doncs, escollir un tipus de vernís determinat, en funció de les condicions de temperatura i d'humitat, tenint en compte el grau de sensibilitat desitjada.

Fixant un valor màxim de deformació de  $500 \mu/m$ . (microdeformacions), i, en funció de la temperatura i de la humitat, es pot determinar quin és el vernís adient, mitjançant un gràfic com el de la figura 15.

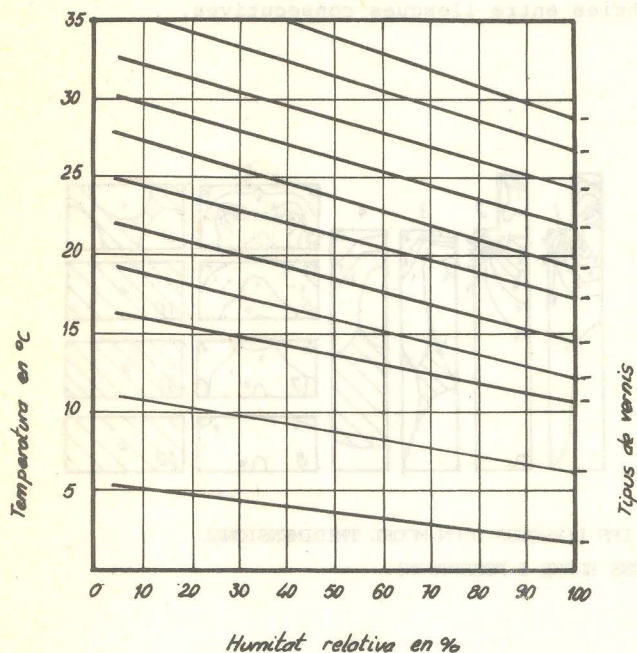


FIG. 15 DIAGRAMA DE SELECCIÓ.

vernís. El gruix de vernís recomanat està comprès entre 0,04 i 0,1 mm., podent-se comprovar segons el color de la capa dipositada, un cop sec.

Si la superfície d'assaig està a l'ombra es fa necessari una projecció prèvia d'una pintura reflectant.

#### Calibratge.

Per tal de conèixer el marge de deformacions del vernís emprat, en cada assaig és nece-

L'elecció de qualsevol altre vernís provoca una variació del marge de deformacions  $i$ , per tant, de la seva sensibilitat.

Igualment la variació en el moment de l'assaig, de la temperatura o la humitat que s'havien previst, pot reduir o augmentar el marge de deformacions del vernís i la seva sensibilitat. Malgrat tot, aquest nou marge pot ésser calculat, donat que la influència de la temperatura i la humitat està perfectament tabulada.

#### Mètode d'utilització.

La imprimació de la superfície d'una estructura en els llocs on es vol realitzar l'assaig requereix unes precaucions i una tècnica determinades.

La projecció del vernís sobre la superfície es fa amb pistola, o bé amb bomba aerosol incorporada al pot del



ssària una proveta testimoni.

Sobre aquesta proveta s'aplica el mateix vernís que sobre l'estructura a assajar, en el mateix moment, i es deixa assecar prop de l'estructura que s'estudia per tal que les condicions ambientals que influeixen en el secar siguin iguals.

En el moment de realitzar els assaigs es munta la proveta en un dispositiu en el que se li aplica una flexió progressiva i que permet conèixer amb quina deformació s'inicien les esquerdes i el límit entre la zona d'esquerdes i la del vernís intacte. Així es pot saber el valor real del marge de deformacions amb precisió.

Temps d'espera.

Un cop dipositat el vernís sobre l'estructura és necessari esperar un temps abans de sotmetre'l a tensions.

La corba de la figura 16 dóna la variació del marge de deformacions, en funció del temps d'assecat. Es pot veure que el vernís té un marge de deformacions bastant estable després d'un dia. A partir d'aquí creix lleugerament en funció del temps.

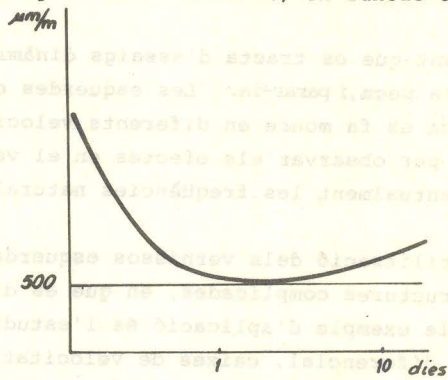


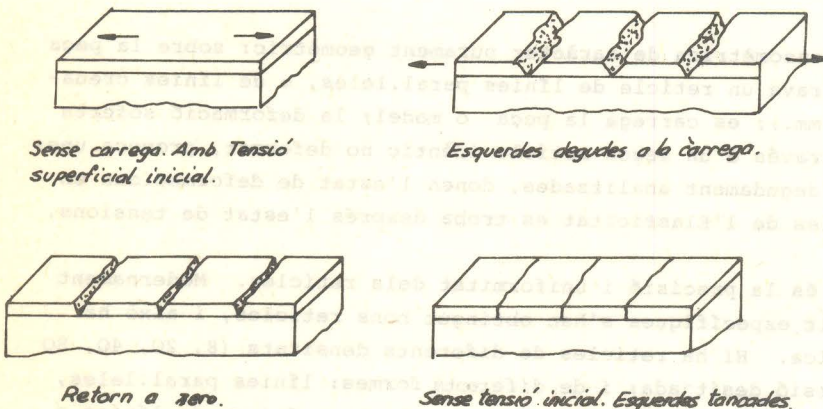
FIG. 16 MARGE D'ESQUERDES EN FUNCIÓ DEL TEMPS.

Aquesta corba és influenciada també pel gruix del vernís. En la figura 17 es pot veure que les corbes corresponents a diferents gruixos de vernís es creuen entre si, però que al cap d'un dia d'espera el valor del marge és pràcticament el mateix.

Tenint en compte que la capa de vernís dipositada sobre l'estructura a estudiar no és uniforme, es recomana un temps d'espera d'un dia, evitant així variacions del marge de deformacions per efecte de gruix del vernís.

Observació i interpretació de les esquerdes

Quan es sotmet l'estructura a deformacions superiors al marge apareixen esquerdes que es mantenen mentre la càrrega està aplicada. Quan s'elimina la càrrega les esquerdes estan tancades i es fan menys visibles. Aquest fenomen és possible, però no representa un gran problema. Els vernissos tenen l'avantatge de donar un testimoni de les tensions que han tingut lloc durant l'assaig, àdhuc si no han pogut ésser observades en aquell instant. (Figura 18).



Per tal d'assolir una bona visió de les esquerdes és necessari il·luminar la zona amb una llum que segueixi la mateixa direcció que la vista. També és necessari observar les esquerdes des de diferents punts, ja que sempre n'hi ha un que ofereix una millor visió.

Quant a la interpretació de les esquerdes, s'ha de parlar compte amb les esquerdes aleatòries

FIG. 18 VISUALITZACIÓ DE LES ESQUERDES



que poden aparèixer, introduint un gran error, ja sigui per utilitzar un marge de deformacions massa baix o perquè s'ha deixat que el vernís prengui fred, és a dir, que un cop dipositat el vernís sobre l'estructura, el conjunt es refredi tant que el vernís es trenqui àdhuc en absència de tensions de treball. En aquests dos casos les esquerdes es distribueixen a l'atzar i no existeixen direccions principals, tant es així que un vernís que hagi sofert esquerdes aleatòries, àdhuc febles, no pot comportar-se satisfactòriament.

#### Tipus d'assaigs.

Quan es tracta d'assaigs estàtics i tenint en compte que l'observació de les esquerdes ha d'ésser meticulosa, s'haurà de carregar l'estructura progressivament per graons de càrregues, sense passar a l'estat de càrregues següent abans de prendre tota la informació útil que ens proporciona el vernís.

La direcció de les esquerdes es pot remarcar amb un llapis especial. Aquestes direccions són les isostàtiques, i ens indicaran els llocs on enganxar les galgues.

En tant que es tracta d'assaigs dinàmics, les esquerdes s'observen després de posar en moviment la peça, i parar-la. Les esquerdes ens permeten conèixer les zones de més tensió. Si una màquina es fa moure en diferents velocitats, augmentant-la progressivament, i aturant-la cada cop, per observar els efectes en el vernís, es podrà veure la progressió de les esquerdes, i eventualment les freqüències naturals de vibracions.

La utilització dels vernissos esquerdables és recomenada en els casos d'assaigs de peces o estructures complicades, en que és difícil preveure els llocs de màxima sol·licitació. Un possible exemple d'aplicació és l'estudi de tensions en els càrters d'engranatges, com poden ésser diferencial, caixes de velocitats, reductors, etc. Es pot aplicar també en casos de peces en moviments, com elements de turbines, eixos i en general en tota peça de gran superfície on és difícil localitzar els llocs de màxima tensió.

#### RETICLES

Una manera de mesurar còmodament les deformacions és provocar deformacions grans. Això és el que es fa amb la tècnica dels reticles: es graven o dibuixen reticles damunt la peça a estudiar construïts en materials de mòdul d'elasticitat baix (plàstic, goma, etc). En carregar el model el reticle es deforma, i, mesurant amb microscopi, o sobre fotografia, les deformacions sofertes, es poden calcular, mitjançant les equacions de l'Elasticitat, les tensions en cada punt.

#### RETICLES DE MOIRÉ

El Moiré es una tècnica extensomètrica de caràcter purament geomètric: sobre la peça o model a estudiar s'encola o grava un reticle de línies paral·leles, o de línies creuades, molt fi (8 ÷ 80 línies per mm.); es carrega la peça o model; la deformació soferta pel reticle en ser observat a través d'un segon reticle idèntic no deformat, provoca unes franges d'interferències, que, degudament analitzades, donen l'estat de deformacions en cada punt. Aplicant les fórmules de l'Elasticitat es troba després l'estat de tensions.

Un dels punts més crítics és la precisió i uniformitat dels reticles. Modernament amb tècniques de fotogratat molt específiques s'han obtingut bons reticles, i això ha donat nou impuls a aquesta tècnica. Hi ha reticles de diferents densitats (8, 20, 40, 80 línies per mm.) segons la precisió desitjada; i de diferents formes: línies paral·leles, quadrícula, quadrícula interrompuda (per facilitar la lectura), tres feixos de línies a 120° amb simetria circular, etc....



El principi de les interferències és ben senzill: cada cop que el desplaçament relatiu entre els dos reticles és d'un espai entre línies es produeix una franja fosca (Veure fig. 19). Es a dir, per un reticle de 40 línies per mm., cada franja fosca indica un desplaçament de 1/40 mm. Si s'estudien les franges sobre l'eix X, s'obté en cada punt la component del desplaçament segons l'eix X, u; si és sobre l'eix Y, s'obté la component v, segons l'eix Y. Derivant després aquestes funcions es troben:

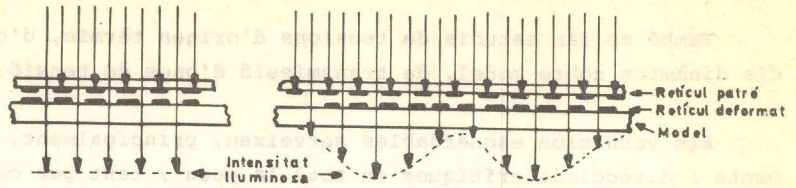


FIG. 19 PRINCIPI DEL MOIRÉ

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \epsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \gamma_{xy} = 1/2 \left( \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right)$$

Es pot treballar en transparència (models), o en reflexió (directament sobre la peça). El reticle indeformat, de referència, es pot col·locar directament sobre el deformat; o fer la composició d'imatges sobre una pantalla o màquina de fotografiar. Els aparells són senzills, però de gran precisió i robustesa.

#### ANALOGIES

##### ANALOGIA ELÈCTRICA

Alguns fenòmens físics, encara que de tipus ben diferents entre si, poden ésser expressats per les mateixes equacions matemàtiques. De fet, la ecuació de Laplace  $\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} = 0$  és aplicable als camps elèctrics i també als camps de tensions. Amb base en això, i amb un dispositiu elèctric senzill, s'arriben a determinar les corbes isopàuques, o de suma de tensions principals constant,  $N_1 + N_2 = ct$ . Aquest mètode es sol emprar com a auxiliar en estudis fotoelàstics plans.

##### ANALOGIA DE PRANDTL

La distribució de tensions tallants en una peça de secció qualsevol, sotmesa a torsió, és la mateixa que la pendent d'una membrana, de la forma de secció, subjecta pel contorn, i sotmesa a una pressió interna (sempre que les deformacions de la membrana siguin petites). Construint un model del contorn, fixant-hi una membrana, i mesurant la pendent sota pressió, es pot conèixer el valor de la tensió tallant en cada punt.

#### ESTUDI COMPARATIU DELS CAMPS D'APLICACIÓ DE CADASCUNA DE LES TÈCNiques

Les galgues extensomètriques s'apliquen en punts i direccions coneguts a priori com a crítics, ja mitjançant tècniques de camp complet (com els vernissos esquerdables o la fotoelasticitat), o bé perquè són fàcils de conèixer amb consideracions teòriques prèvies. S'aplica també per caracteritzar les sol·licitacions de tipus dinàmic variable, ja que és el mètode més adient; i també en els casos on cal controlar elements a distància i en funcionament en condicions en que no és possible l'accés o l'observació directa. Tenen especial interès els captadors de magnituds mecàniques construïts a base de galgues.

Per fenòmens estàtics o quasi-estàtics, i en peces de grans dimensions, se segueixen emprant extensòmetres mecànics de lectura directa, o amb registres de disc gravat, o de màxim i mínim. Per aquest ús, també, han aparegut, recentment, les galgues de corda vibrant.



La fotoelasticitat s'aplica a l'estudi quantitatiu de fenòmens en peça completa, especialment per efectes de concentració de tensions, de pressions de contacte, i per disseny global d'optimització de la peça.

També es fan estudis de tensions d'origen tèrmic, d'estats plàstics de tensió, i estudis dinàmics sobre model, de transmissió d'ones de tensió.

Els vernissos esquerdables serveixen, principalment, per una primera informació de punts i direccions crítiques en tota la peça; tant per casos estàtics, com dinàmics. Després se solen col·locar galgues extensomètriques en els punts més interessants.

L'analogia elèctrica és auxiliar de la fotoelasticitat plana; i l'analogia de Prandtl és molt específica, per l'estudi de tensions tallants en seccions sotmeses a torsió.

Els reticles de Moiré s'apliquen a estudis de cossos plans amb temperatures molt altes, que impediria l'ús d'altres tècniques, a tensions residuals de soldadura i a fenòmens de llarga durada (fluències i relaxacions).

Tant galgues com vernissos estudien les tensions en la superfície de la peça; i en la major part de les vegades, aquestes ja són les més grans. Si es vol saber el que passa en l'interior, cal recórrer a models tridimensionals fotoelàstics, o a la inclusió de galgues extensomètriques espacials en el model (en fer-lo) o en la peça mateixa, com en el cas del formigó, per exemple.

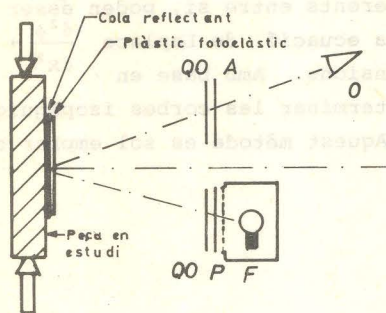


FIG. 9. FOTOELASTICITAT PER REFLEXIO.

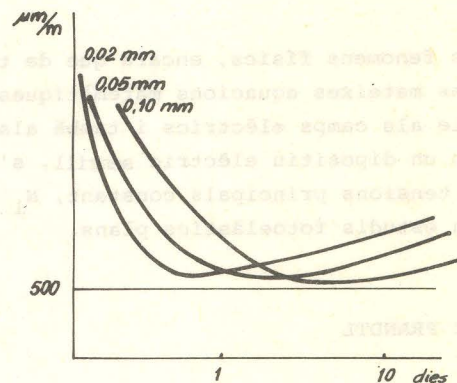


FIG. 17. Marge d'esquerdes en funció del gruix del vernís.

#### BIBLIOGRAFIA

- AVRIL, J.  
"Encyclopedie Vishay d'Analyse des Contraintes".  
Vishay - Micromesures. Paris, 1.975
- DURELLI, A.J.; PHILLIPS, E. A.; TSAO, C.H.  
"Introduction to the theoretical and experimental Analysis of Stress and Strain".  
Mc Graw - Hill. New York, 1.958.
- FORCHT, M.M.  
"Photoelasticity"  
Hohn Wiley & Sons. Canada, 1.941
- HETÉNYI, M.  
"Handbook of Experimental Stress Analysis"  
John Wiley & Sons. New York, 1.950.
- KUSKE, A.; ROBERTSON, G.  
"Photoelastic Stress Analysis"  
John Wiley & Sons. Chichester, 1.974.
- MOORE, M.B.  
"Principles of experimental stress analysis"  
Prentice - Hall Inc. New York, 1.954.
- PERRY, S.C.; LISSNER, H.R.  
"The strain gage Primer".  
Mc Graw - Hill. New York, 1.955.
- VAUCHAN, J.  
"Application of Brüel & Kjaer Equipment to Strain Measurements. Brüel & Kjaer, 1.975
- VILLENA, L.  
"Fotoelasticidad"  
Laboratorio Central de la Escuela de Ingenieros de Caminos. Madrid, 1.943
- ZELBSTSTEIN, U.  
"Technique et utilisation des Jauges de contrainte"  
DUNOD. Paris, 1.956