

EXPERTIZE – LABORATOR 7

DETERMINAREA TENSIUNILOR SI A DEFORMATIILOR PRIN FOTOELASTICIMETRIE

-
1. Fotoelasticitatea
 2. Noțiuni introductive privind fotoelasticitatea
 3. Noțiuni teoretice
 4. Aparatura și materiale utilizate
 5. Analiza franjelor foto-elastice
 6. Măsurarea direcțiilor deformației principale
 7. Determinarea amplitudinii tensiunilor și deformațiilor
-

1. Fotoelasticitatea

Analiza tensiunilor prin metoda fotoelasticității se bazează pe proprietatea unor materiale transparente de a expune tipare coloristice când sunt traversate de lumină polarizată. Aceste tipare sunt rezultatul alterării luminii polarizate de tensiunile interne în două unde ce au viteze diferite. Acest fenomen al dublei refracții este cunoscut ca birefrință. Tiparele care se dezvoltă sunt în funcție de tensiunea internă și poartă denumirea de efect fotoelastic. În acest scop se realizează un model realizat din material transparent capabil să expună un răspuns fotoelastic când corpul analizat este supus acțiunii forței și dezvoltă tensiuni interne. Metoda prezintă următoarele avantaje :

- Tensiunea poate fi determinată în modele cu forme foarte diferite;
- Tensiunea rezultată din complexul încărcărilor poate fi determinată;
- Tensiunea poate fi observată prin modelul întreg, în acest mod putându-se localiza magnitudinea tensiunii.

Din punct de vedere al conceptului modelării sunt luate în considerație două considerații principale :

1. este relatarea reproducerii geometrice a situației. Modelul poate reflecta în întregime sau parțial fidelitatea tridimensională. De asemenea, modelul poate fi realizat fie în mărime naturală fie mai mare sau mai mic.
2. a doua considerație a modelării este reprezentată de simularea proprietăților mecanice a sistemului studiat. Nu este posibil modelarea tuturor proprietăților mecanice a structurilor elementului. Prin urmare decizia trebuie luată în funcție de proprietatea cea mai pertinentă.

Tipuri de analiză fotoelastică

- bidimensională;
- tridimensională;
- cvasi-tridimensională.

Analiza fotoelastică bidimensională utilizează un model care își păstrează fidelitatea geometrică într-un singur plan. Se poate aplica atunci când nu există variații ale tensiunii în grosimea modelului.

Interpretare : - numărul crescut de linii simbolizează creșterea tensiunii
- liniile închise reprezintă concentrarea tensiunii.

Avantajele acestei metode sunt:

- ușurința realizării modelului;
- aplicarea unui număr foarte mare de încărcări pe model;

Analiza fotoelastică tridimensională

Dintre avantajele metodei sunt subliniate atât fidelitatea geometrică cât și imaginea tridimensională a tensiunii, iar dezavantajele, distrugerea modelului pentru obținerea datelor, necesitatea realizării de modele separate pentru fiecare încărcare, limitează utilizarea frecventă a metodei.

Metoda utilizează o proprietate specifică a modelelor din material plastic : când acestea sunt încărcărilor la temperaturi înalte specifice și încărcările sunt menținute în timp ce temperatura scade treptat până la 20°C (temperatura camerei) tensiunile rămân după îndepărtarea încărcărilor. Această procedură de blocare a tensiunilor poartă numele de înghețare a tensiunii, „tensiune freezing”.

Pentru a determina tensiunile tri-dimensionale modelul trebuie secționat în felii subțiri. Fiecare secțiune este analizată separat, analiza tuturor secțiunilor permițând construcția imaginii tridimensionale a tensiunii.

Analiza fotoelastică quasi- tri-dimensională

Această metodă a apărut din dorința de a minimaliza dezavantajele tehnicilor de fotoelasticitate prezentate anterior. Este folosit un model cu fidelitate geometrică arbitrară, putându-i-se aplica un complex multiplu de forțe pentru o varietate largă a protezelor amovibile plasate pe model. Pentru observarea și înregistrarea tensiunilor nu este necesară distrugerea modelului. Multe investigații raportează că tehnica fotoelastică prezice (anticipează) răspunsul biologic.

2. Noțiuni introductive privind fotoelasticitatea

Prin cercetările lui Mesnager făcute la începutul secolului XX pentru studiul unui pod pe un model de sticlă examinat în lumină polarizată, s-a introdus pentru prima dată în tehnică aplicarea unei importante metode experimentale de studiu a elasticității și rezistenței corpurilor, bazată pe fenomenul optic al birefringenței accidentale. Deși acest fenomen a fost descoperit și cercetat încă de la începutul secolului trecut de către Seebeck (1813) și Brewster (1815), fiind studiat amănunțit, stabilindu-i-se legile de bază de către Neumann (1841), Maxwell (1853) și Wertheim (1854), totuși el nu și-a găsit o aplicație tehnică importantă decât în ultimele decenii. Fotoelasticitatea a cunoscut o amplă dezvoltare, în special în ultimele trei decenii, atât din punct de vedere teoretic, cât și experimental, prin lucrările a numeroși cercetători, printre care : Kirpicev, Zațev, Coker, Filon, Frocht, Mesmer, Fopl, Baes, Kuske, Pirard și alții.

Cu ajutorul acestei metode de laborator, care a devenit o disciplină distinctă a elasticității experimentale, prin cercetarea unor modele plane confecționate din anumite materiale transparente, examinate în lumină polarizată, se pot studia în cele mai exacte și mai amănunțite condiții stările de tensiune în problemele elasticității bi- și tridimensionale. Ea permite să se determine starea reală de tensiuni din interiorul corpurilor, fără nici un fel de ipoteze simplificatoare de calcul, și se poate aplica pentru studiul unor probleme teoretice și practice din cele mai complexe, a căror rezolvare nu este posibil adeseori de realizat nici prin teoria matematică a elasticității, deci cu atât mai puțin prin calculele simplificate ale rezistenței materialelor.

Această nouă disciplină de analiză experimentală a tensiunilor interesează aproape în aceeași măsură pe teoreticienii : fizicienii, matematicienii, inginerii, iar în ultima perioadă și medicii în diferitele ramuri ale medicinei, cum ar fi chirurgia ortopedică, protetica dentară. Analiza fotoelastică reprezintă cea mai adecvată metodă de analiză a tensiunilor și deformațiilor apărute în diferite materiale inițial în statică și apoi sub acțiunea forțelor de solicitare. Sistemul de analiză este alcătuit dintr-un polariscop de reflexie, o sursă luminoasă, un calculator și o cameră de filmat digitală

Inițial tehnica presupune utilizarea unui material plastic fotosensibil ce acoperă întreaga suprafață a obiectului de studiat. Ulterior acesta este supus solicitărilor și iluminat de lumina polarizată emisă de polariscopul de reflexiv. Obiectul de analizat supus forțelor de solicitare este privit prin polariscop, iar învelișul din material fotosensibil va descrie prin intermediul franjelor luminoase zonele de tensiuni și deformații. Cu ajutorul unui compensator atașat polariscopului analiza cantitativă a tensiunilor acumulate în material poate fi ușor depistată. Distribuția tensiunii prin intermediul franjelor luminoase poate fi înregistrată prin intermediul camerei video.

Analiza fotoelastică a fost și este folosită cu succes în domeniile ce reclamă analiza tensiunii, ca de exemplu: industria aeronautică, industria constructoare de mașini, în construcții etc. În medicină, analiza fotoelastică a fost utilizată în depistarea tensiunilor și deformațiilor la nivelul femurului, iar în stomatologie s-a dorit depistarea ariilor de maximă solicitare la nivelul lucrărilor protetice fixe și mobile.

3. Noțiuni teoretice

Lumina, sau radiația luminoasă reprezintă vibrații electromagnetice similare undelor radio. O sursă incandescentă emite energie radiantă care se propagă în toate direcțiile și conține întreg spectru de vibrații pentru diferite frecvențe sau lungimi de undă. O porțiune din acest spectru, lungimile de undă cu valori cuprinse între 400 și 800 nm este utilizat în limitele percepției umane. Vibrația asociată cu lumina este perpendiculară cu direcția de propagare. Sursa luminoasă emite un tren de unde ce conține vibrații în toate planurile perpendiculare. Totuși, prin introducerea filtrului de polarizare (P) numai o componentă a acestei vibrații va fi transmisă (axa paralelă cu axa de referință a filtrului). Aceasta este lumina polarizată, sau plan polarizat deoarece vibrația este conținută într-un singur plan. Dacă un alt filtru de polarizare A este plasat în direcția sa extincția completă a fascicolului poate fi obținută când axele celor 2 filtre sunt perpendiculare una pe cealaltă. Lumina propagată în vacuum sau în aer are viteza $C = 3 \times 10^{10}$ cm/s. În corpurile transparente viteza V este inferioară, raportul C/V numindu-se indice n refracție. În corpurile omogene acest indice este constant oricare ar fi direcția de propagare a planului sau a vibrației. În cristale acest indice depinde de orientarea vibrației cu respectarea axei de incidență. Alte materiale, cum ar fi plasticul se comportă ca un material izotrop în statică dar devine optic anizotrop sub acțiunea tensiunilor. Modificarea indicelui de refracție este în funcție de tensiunea principală.

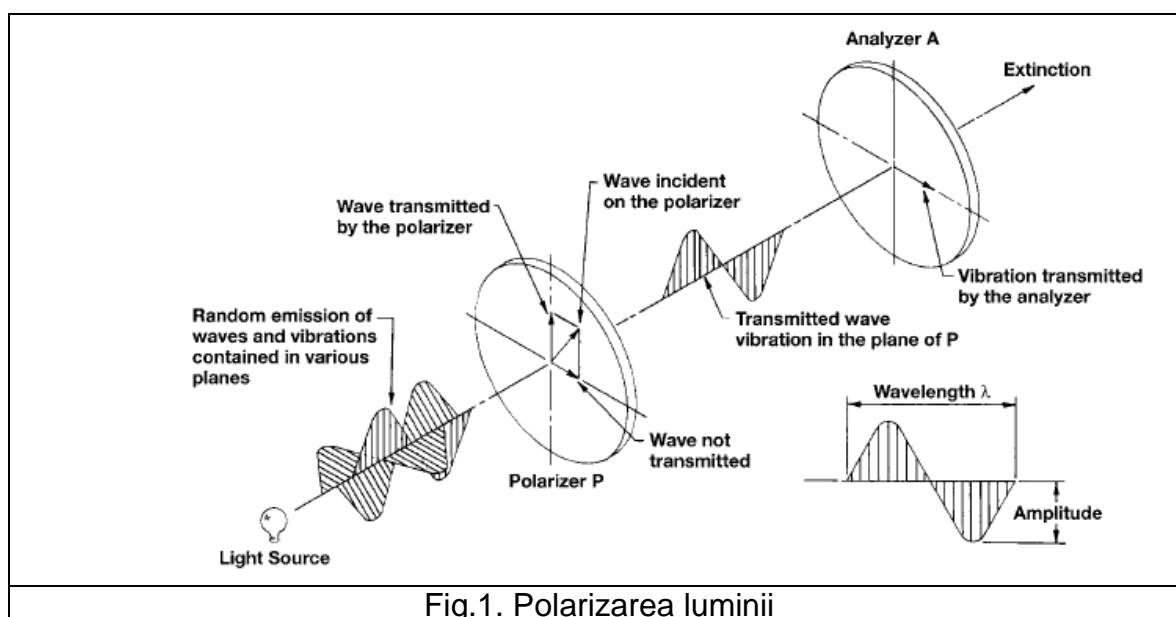


Fig.1. Polarizarea luminii

Când fascicolul polarizat propagate prin materialul plastic transparent de grosime t , unde X și Y sunt direcțiile tensiunii principale în punctul luat în considerare, vectorul luminos se divide și 2 fascicule polarizate sunt propagate în planele X și Y . Dacă intensitatea tensiunii de-a lungul planurilor X și Y este ϵ_x și ϵ_y și viteza vibrației luminoase în aceste direcții este V_x și V_y , respectiv timpul necesar traversării fiecărui plan va fi t/V , întârzierea dintre cele 2 fascicule va fi:

$$\delta = C(t/V_x - t/V_y) = t(n_x - n_y)$$

unde, n reprezintă indicele de refracție.

Legea lui Brewster stabilește că modificarea relativă a indicelui de refracție este proporțional cu diferența tensiunii principal, sau

$$(n_x - n_y) = K(\epsilon_x - \epsilon_y)$$

Constanta K este denumită coeficientul optic al deformației și caracterizează proprietatea fizică a materialului. Aceasta este o constantă adimensională utilizată în calibrarea polarizorului. Combinând cele 2 formule, se obține:

$$\delta = tK(\epsilon_x - \epsilon_y), \text{ în transmisie}$$

$$\delta = 2tK(\epsilon_x - \epsilon_y), \text{ în reflexive (lumina trece prin materialul plastic de 2 ori).}$$

Relația fundamentală utilizată în tehnica măsurării deformației utilizând PhotoTensiune (materialul plastic ce acoperă obiectul de studiat) este:

$$(\epsilon_x - \epsilon_y) = \delta / 2tK$$

Datorită întârzierii relative δ , cele 2 unde traversează diferit materialul plastic. Analizorul A va transmite numai o componentă a fiecărei unde (cea paralelă cu A) (Fig.3). Aceste unde vor interfera și rezultanta intensității luminoase va fi direct proporțională cu:

- întârzierea δ ;
- unghiul dintre analizor și direcția deformației principale ($\beta - \alpha$)

În cazul polariscopului plan, intensitatea luminii emergente este:

$$I = b^2 \sin^2 2(\beta - \alpha) \sin^2 \pi \delta / \lambda$$

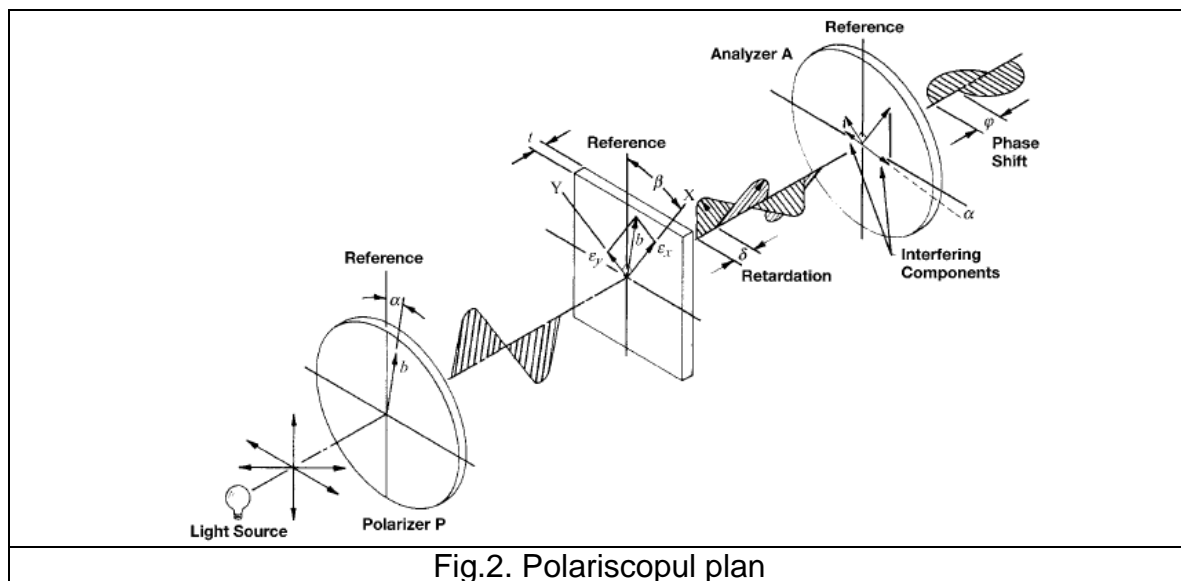


Fig.2. Polariscopul plan

Intensitatea luminoasă devine zero când $\beta - \alpha = 0$, sau când traversarea polarizorului sau a analizorului este paralelă cu direcția stresului principal. Intensitatea luminii emergente devine:

$$I = b^2 \sin^2 \pi \delta / \lambda$$

În cazul polariscopului circular, intensitatea luminoasă devine zero când

$\delta=0$, $\delta=1$, $\lambda=2\lambda$, sau, în general,

$$\delta=N\lambda,$$

Unde, $N = 1,2,3,\dots$

Acest număr N se numește ordin de franjă și exprimă mărimea întârzierii δ .

Lungimea de undă selectată este:

$$\lambda = 22.7 \times 10^{-6} \text{ in sau } 575 \text{ nm}$$

Întârzierea, sau semnalul fotoelastic, este simplu descris de N .

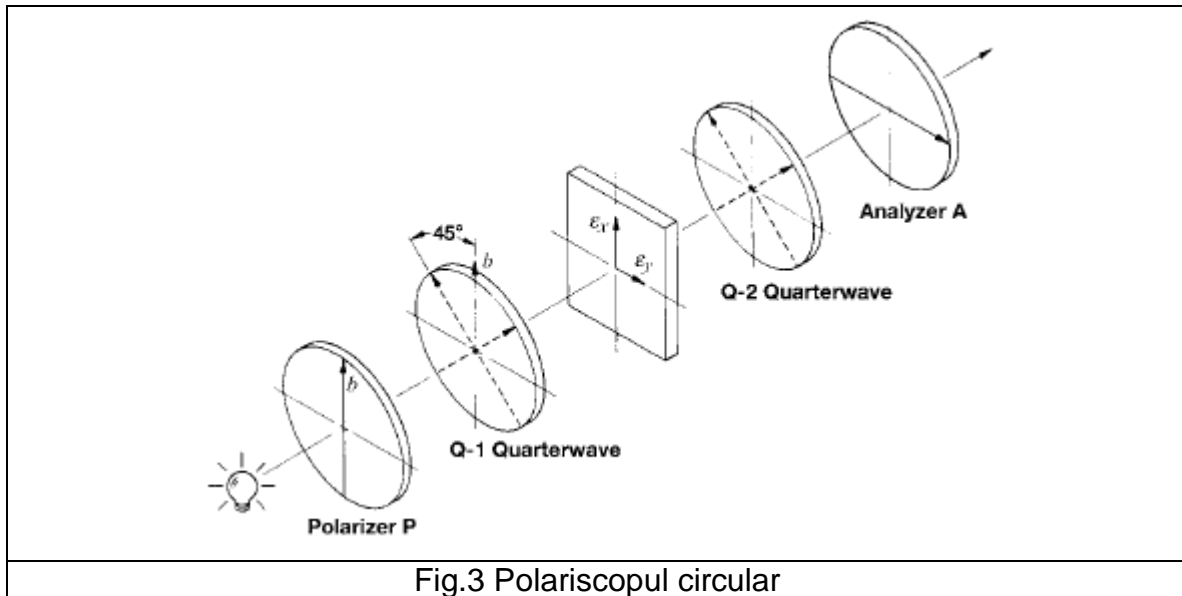


Fig.3 Polariscopul circular

4. Aparatura și materiale utilizate

4.1. Polariscopul de reflexie

În scopul analizei distribuției tensiunilor prin intermediul luminii polarizate se utilizează un polariscop de reflexie cu rol de a observa și măsura deformațiile de suprafață ce apar în materialul fotoelastic ce acoperă obiectul de studiat supus acțiunii forțelor.

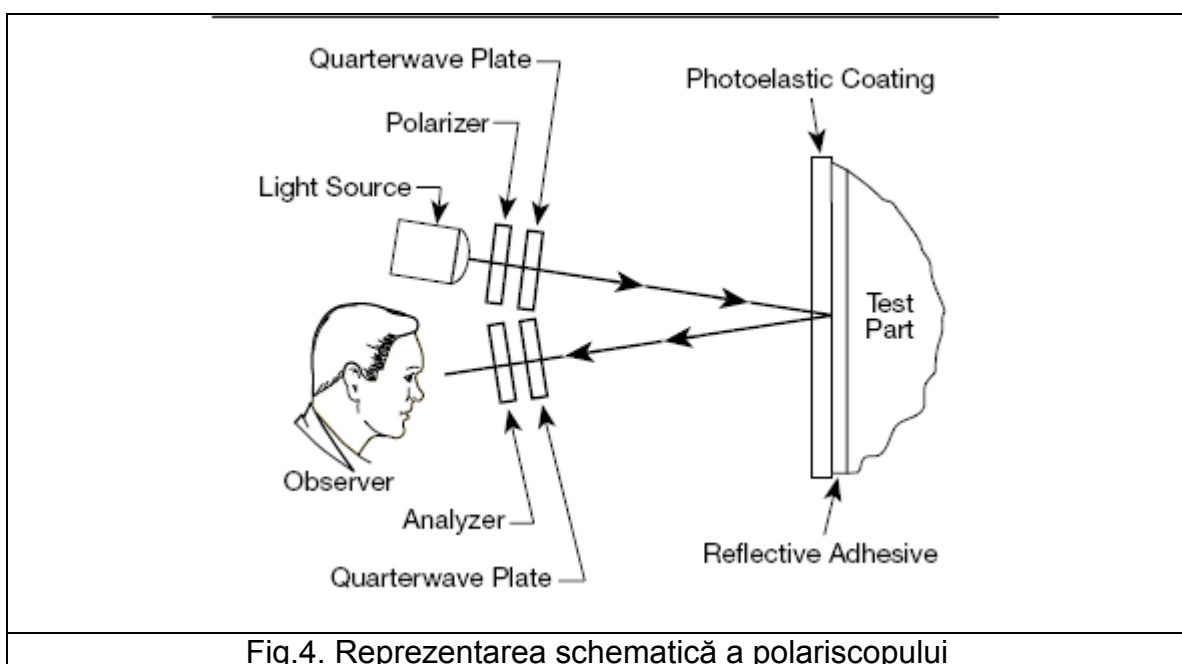


Fig.4. Reprezentarea schematică a polariscopului



Fig.5 Polariscope de reflexive LF/Z-2

4.2. Materialele de acoperire

Selecția materialelor de acoperire și aplicarea lor corectă sunt esențiale pentru analiza foto-tensiunii. O multitudine de materiale sunt disponibile în formă de plăcuță subțire, sau lichidă pentru aplicații pe materiale metalice, plastic, rășini, cauciuc și multe altele. Materialul fotosensibil se realizează în condițiile impuse de producător, urmărind cu exactitate cantitățile activator și bază, pentru a obține o rășină, care, în anumite condiții de temperatură și timp îi va permite acoperirea obiectului de studiat.



Fig.6. Materiale fotoelastice

5. Analiza franjelor fotoelastice

PhotoTensiune permite obținerea următoarelor tipuri de analiză și măsurători:

- interpretarea domeniului complet a tiparelor franjelor luminoase, permițând evaluarea generală a mărimilor și variațiilor deformațiilor și tensiunilor
- determinări cantitative:
 - o direcțiile principale de tensiuni și deformații în toate punctele de interes de pe suprafața materialului fotoelastic ce acoperă obiectul de studiat;
 - o mărimea și semnul tensiunii tangențial în repaus (fără a aplica forțe) și în toate regiunile unde starea de tensiuni este unidirecțională;
 - o în cazul stării de tensiuni biaxiale mărimea și semnul diferitelor deformări și tensiuni în punctele selectate de pe suprafața materialului fotoelastic ce acoperă obiectul de studiat.

5.1. Interpretarea domeniului complet

În afară de capacitatea de a obține cu acuratețe măsurarea deformațiilor în punctele test, PhotoTensiune prezintă și avantajul recunoașterii imediate a magnitudinii deformației nominale, gradientii deformației și întreaga distribuție a deformației incluzând identificarea zonelor supra și sub-tensionate. Acest avantaj extrem de valoros al Photo-Tensiunii descris ca și interpretarea domeniului complet este unic între metodele de analiză fotoelastică a tensiunilor. Succesul aplicației depinde numai de recunoașterea ordinului de franje coloristic și înțelegerea relației dintre ordinal franjei și magnitudinea tensiunii.

Deoarece materialul fotoelastic este intim și uniform adaptat pe suprafața obiectului de studiat, tensiunile aplicate într-o anumită zonă se transmit cu mare fidelitate în materialul transparent. Deformațiile în materialul fotoelastic produc efecte optice care apar ca franje izocromatice observate cu reflexia polariscopului.

Tiparul franjelor obținute prin polariscop conține multiple informații pentru modificarea design-ului obiectului supus acțiunii forțelor, în scopul realizării pieselor cu greutate minimă și funcționalitate adecvată.

5.2. Generarea franjelor

Prin intermediul polariscopului franjele apar ca o serie succesivă și continuă de diferite benzi colorate (izocromatice), fiecare bandă reprezentând diferite grade de birefrință corespunzătoare ce stau la baza deformației în partea testată. Astfel, culoarea fiecăreia identifică birefrința, sau ordinal de franjă (și nivelul deformației), oriunde, de-a lungul benzii. Pe baza înțelegerii secvențelor constante de apariție a benzilor coloristice, tiparul de franje fotoelastice poate fi descris ca o vizualizare topografică a hărții distribuției tensiunii de-a lungul suprafeței materialului fotoelastic.

Inițial, fără a aplica forțe obiectului de studiat acoperit cu material fotoelastic, franjele coloristice vor apărea în punctele cu deformații mari. Sub acțiunea forței de acțiune cu amplitudine crescătoare vor apărea franje noi, indicând noi zone de deformații. Franjele pot fi notate în ordinea apariției (prima, a doua, a treia...) și vor menține ordinea în întregime în timpul secvenței de încărcare. Nu sunt numai franje ordonate, dar sunt și comandate (sunt continui nu se intersectează sau fuzionează cu altele, menținându-și întotdeauna pozițiile respective în secvența de ordine).

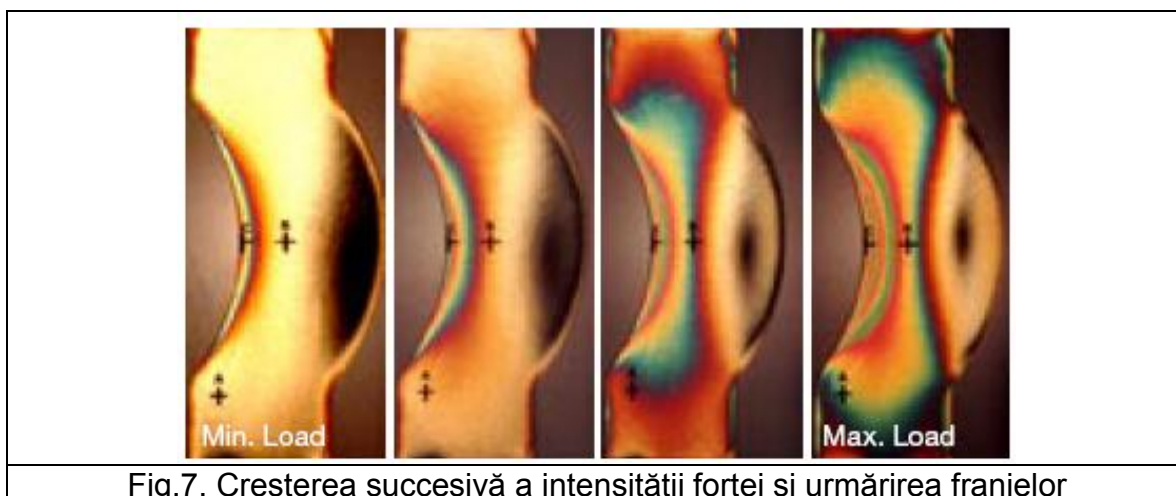



Fig.7. Creșterea succesivă a intensității forței și urmărirea franjelor

5.3. Identificarea franjelor

Lumina albă, utilizată pentru interpretarea domeniului complet a tiparelor franjelor în testarea fotoelastică, este alcătuită din toate lungimile de undă ale spectrului vizual. Astfel, întârzierea care determină extincția unei lungimi de undă (color), în general nu le exclude pe celelalte. Cu creșterea birefringenței fiecare culoare din spectru dispăre în acord cu lungimea sa de undă (începe cu violet, undă cu cea mai mică lungime), moment în care observatorul poate decela culoarea complementară. Secvența culorilor complementare este prezentată în tabelul 1, incluzând pentru fiecare culoare întârzierea relativă și ordinal numeric de franjă.

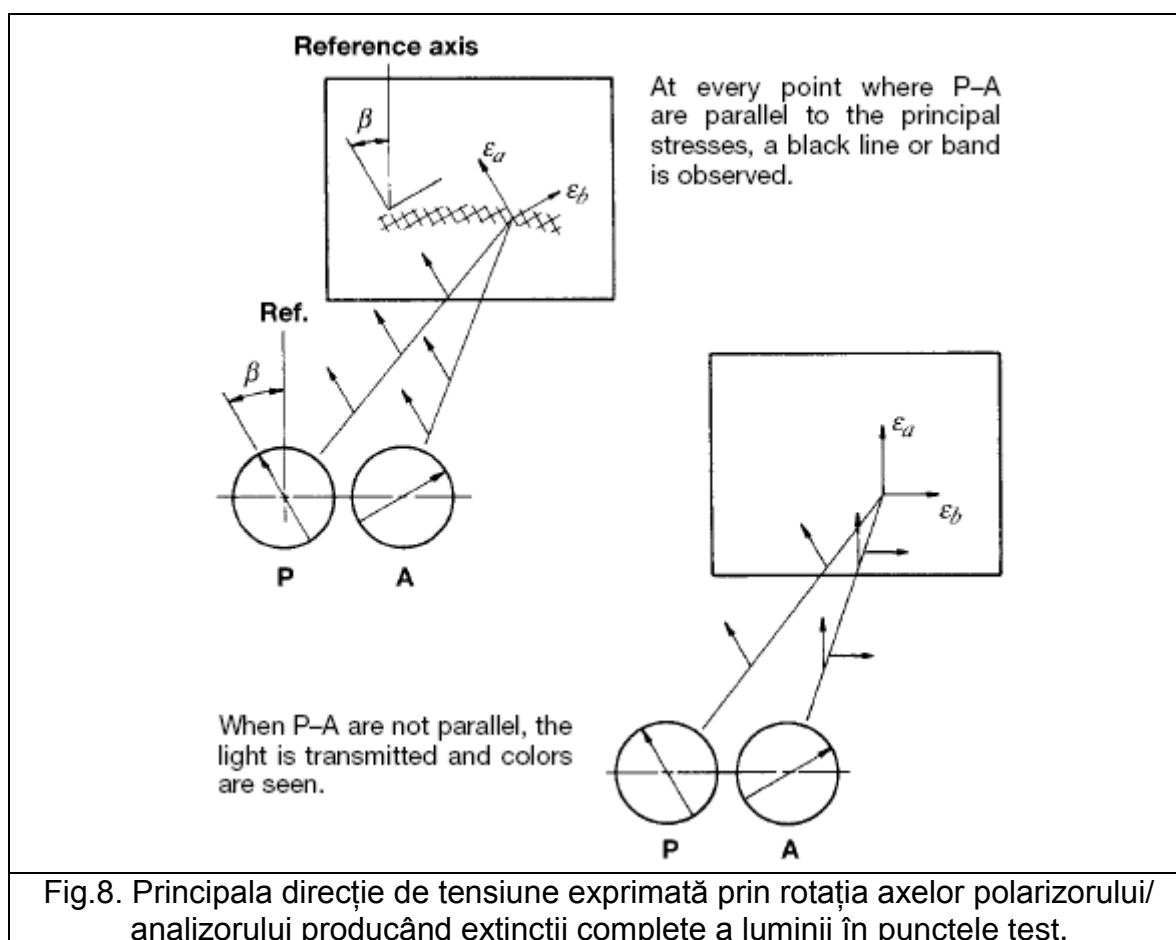
	COLOR	APPROXIMATE RELATIVE RETARDATION		FRINGE ORDER N
		nm	in $\times 10^{-6}$	
	Black	0	0	0
	Pale Yellow	345	14	0.60
	Dull Red	520	20	0.90
	Red/Blue Transition	575	22.7	1.00
	Blue-Green	700	28	1.22
	Yellow	800	32	1.39
	Rose Red	1050	42	1.82
	Red/Green Transition	1150	45.4	2.00
	Green	1350	53	2.35
	Yellow	1440	57	2.50
	Red	1520	60	2.65
	Red/Green Transition	1730	68	3.00
	Green	1800	71	3.10

Tabelul 1. Caracteristicile franjelor isocromatice

6. Măsurarea direcțiilor deformației principale

Direcțiile principale ale deformației sunt întotdeauna măsurate după un plan de referință, sau axă. Inițial se va selecta un plan de referință avantajos. De cele mai multe ori direcția de referință este imediat sugerată ca o axă de simetrie a structurii; în alte cazuri, o linie verticală sau orizontală este suficientă.

Când planul fascicolului de lumină polarizată traversează materialul fotoelastic supus parțial tensiunii, acesta este divizat în unde care se propagă cu viteze diferite de-a lungul direcției principale de deformație. După traversarea materialului fotoelastic, aceste 2 unde se vor uni, dar nu se vor recombină într-o singură vibrație paralelă cu cea inițială. Uneori, în punctele unde direcția tensiunii principal este paralel cu axa filtrului de polarizare, fascicolul nu va fi afectat și vibrația emergentă va fi paralelă cu vibrația de intrare. Filtrul analizorului A cu axa perpendiculară pe filtrul polarizorului P va reproduce extincția vibrațiilor în aceste puncte (Fig 8)



Se observă în figura 9 apariția liniei negre în momentul penetrării reflexiei polariscopului. Aceste linii se numesc linii isoclinice. În fiecare punct de pe linia isoclinică, direcțiile deformațiilor principale sunt paralele cu direcția de polarizare A sau P. Cu respectarea axei de simetrie selectată, măsurarea direcțiilor în diferitele puncte este acompaniată de rotația atât a analizorului cât și a polarizorului până când linia isoclinică neagră apare în punctele unde direcțiile au fost măsurate.



Dacă liniile isoclinice sunt subțiri, înguste, înseamnă că direcțiile ε_x și ε_y variază rapid dintr-o locație în alta. Când liniile isoclinice formează benzi alcătuite din benzi negre indicate de direcțiile ε_x și ε_y variază încet în această regiune.

În scopul identificării direcțiilor de tensiuni, lumina laser este atașată polariscopului de reflexive, proiectându-se pe materialul fotoelastic ce acoperă obiectul de studiat.

7. Determinarea amplitudinii tensiunilor și deformațiilor

Ordinul de franjă observată la nivelul materialului fotoelastic este proporțional cu diferența dintre deformația principală în interiorul materialului (și în suprafață în porțiunea testată). Această relație liniară este exprimată astfel:

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = Nf, \quad (8)$$

unde, $\varepsilon_x - \varepsilon_y$ = principala deformație

N = ordinul de franjă

F = valoarea franjei corespunzătoare materialului fotoelastic

λ = lungimea de undă (lumina albă are lungimea de undă 575 nm)

t = grosimea materialului fotoelastic

K = coeficientul optic de deformație al materialului fotoelastic

Ecuția nr. 8 poate fi scrisă și sub următoarea formă :

$$\gamma_{xy} = Nf \quad (9)$$

unde, γ_{xy} = deformația specifică maximă

Semnificația acestor ecuații constă în faptul că diferența în deformația principală, sau deformația specifică maximă în suprafață poate fi obținută prin simpla recunoaștere a ordinului de franjă.

Inginerii și designerii adeseori lucrează cu noțiunea de tensiuni (tensiune), mai frecvent decât deformații. Astfel ecuațiile 8 și 9 pot fi transformate introducând legea lui Hooke pentru starea de tensiuni biaxială în materialele isotropice, astfel:

$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$	(10)
$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)$	(11)
$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1+\nu}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^*$	(12)
$\sigma_x - \sigma_y = \frac{E}{1+\nu}Nf$	(13)

Unde, $\sigma_x - \sigma_y$ = tensiunea principală

E = modulul de elasticitate al materialului de analizat

ν = coeficientul Poisson al materialului de analizate

Deformația specifică maximă τ_{MAX} , în planul suprafeței fiecărui punct este $(\sigma_x - \sigma_y)/2$,

$\tau_{MAX} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1+\nu} \right) Nf$	(14)
--	------

MĂSURAREA în puncte

În general, punctual de interes de pe suprafață se găsește între franje, fiind astfel necesară depistarea “ordinului fracțional”, sau fracția franjei. Tehnica utilizată se numește compensare care poate fi folosită în cazul Compensatorului PhotoTensiune Plus Model 832 “BALANS ZERO”.

Compensarea “balans zero” operează introducând în modelul de lumină a polariscopului birefringente variabile calibrate de semn opus cu cel indus în materialul fotoelastic de acoperire de câmpul de forțe. Când birefringența variabilă calibrată de semn opus este ajustată cu precizie marcând magnitudinea birefringenței tensiunii Indus, birefringența în modelul de lumină va fi nulă. Acest aspect este relevant de franja de culoare neagră (Fig.10).

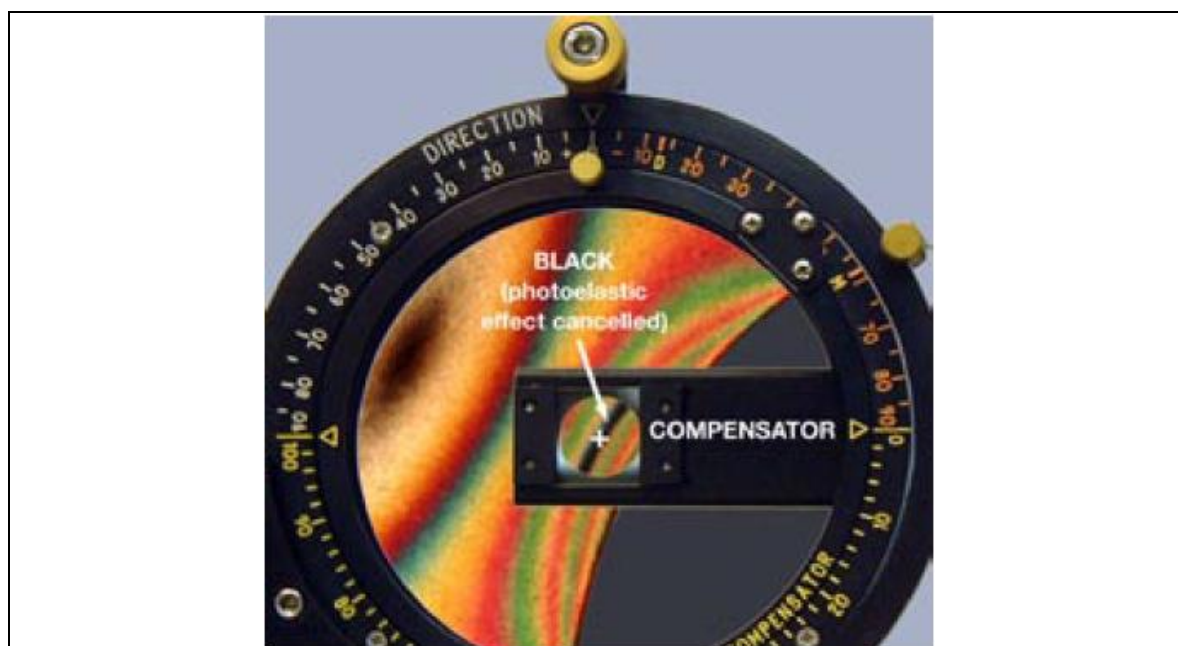


Fig.10. franja colorată inițial este redată în negru prin compensarea zero a variației compensatorului

Birefringența indusă de tensiuni (sau semnal optic) este reprezentată de panoul din partea stângă a compensatorului care se rotește invers acelor de ceasornic din centru, spre stânga.

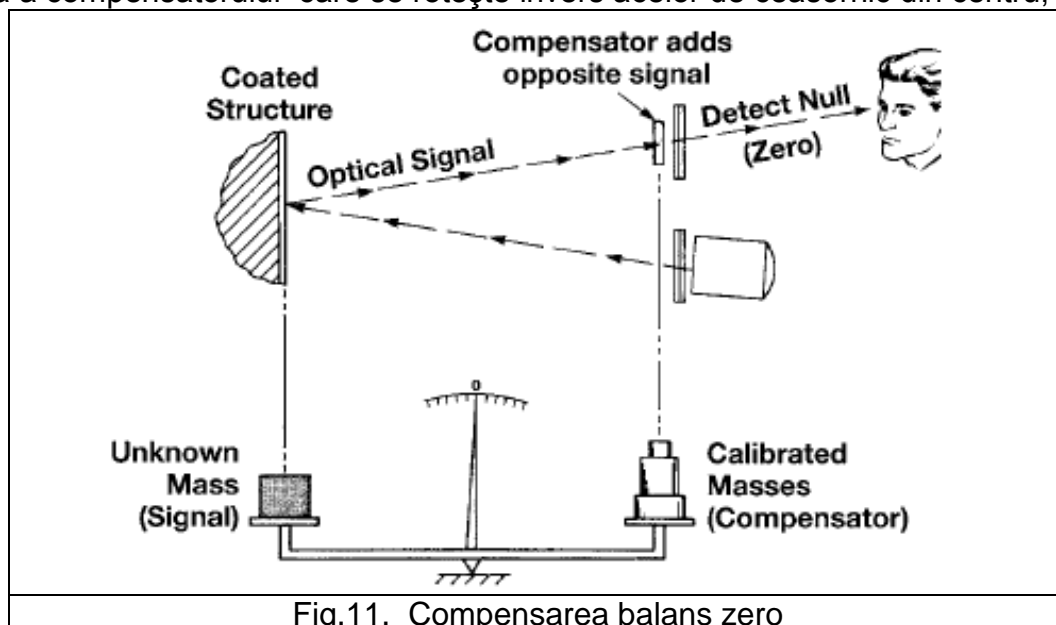


Fig.11. Compensarea balans zero

La modelul Compensatorului electronic 832 și PSCalc computerizat (Fig. 12) măsurarea și calcularea valorilor tensiunilor și deformațiilor se realizează mult mai rapid. Din punctual de

măsurare, inițial fără încărcare (R_0) citirea este indicată de compensator. Cea de a doua citire (R_{LOAD}) se efectuează după aplicarea forței încărcării cu o anumită forță de solicitare. După citirea cu balans zero (franța de culoare neagră) informațiile numerice sunt transferate electronic computerului prin intermediul programului configurat al modelului PhotoTensiune 832 PSCalc. Computerul va afișa calculul tensiunilor și deformațiilor în punctele stabilite. Înainte de înregistrare sunt introduce în calculator date referitoare la grosimea materialului fotoelastic, constantele fizice ale materialului testat, secvența aplicării forței de solicitare. (Fig.13)

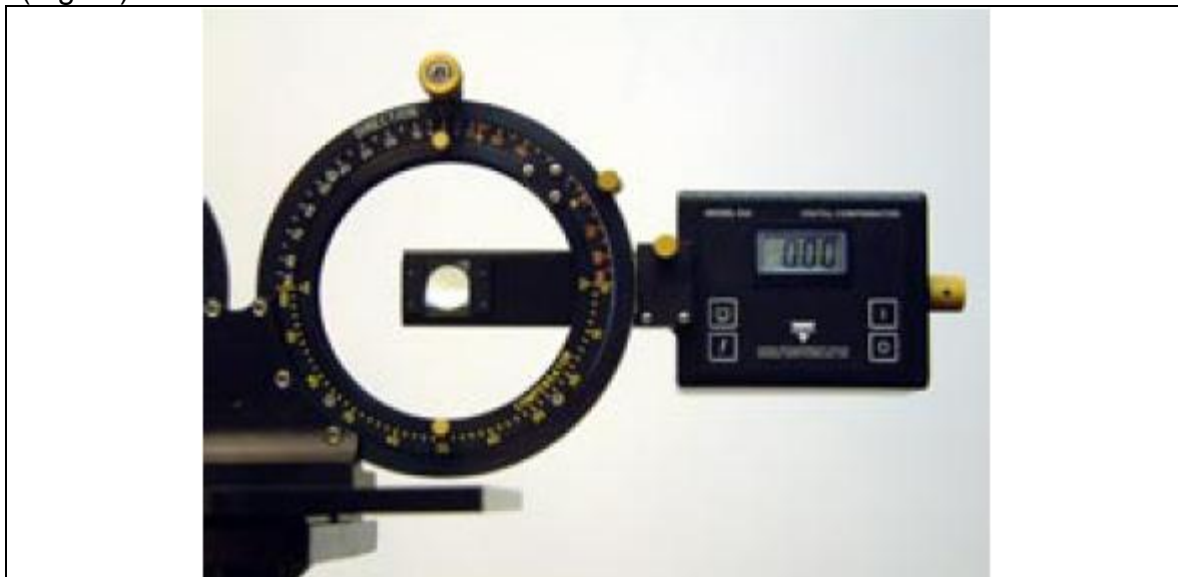


Fig.12. Compensator Modelul 832

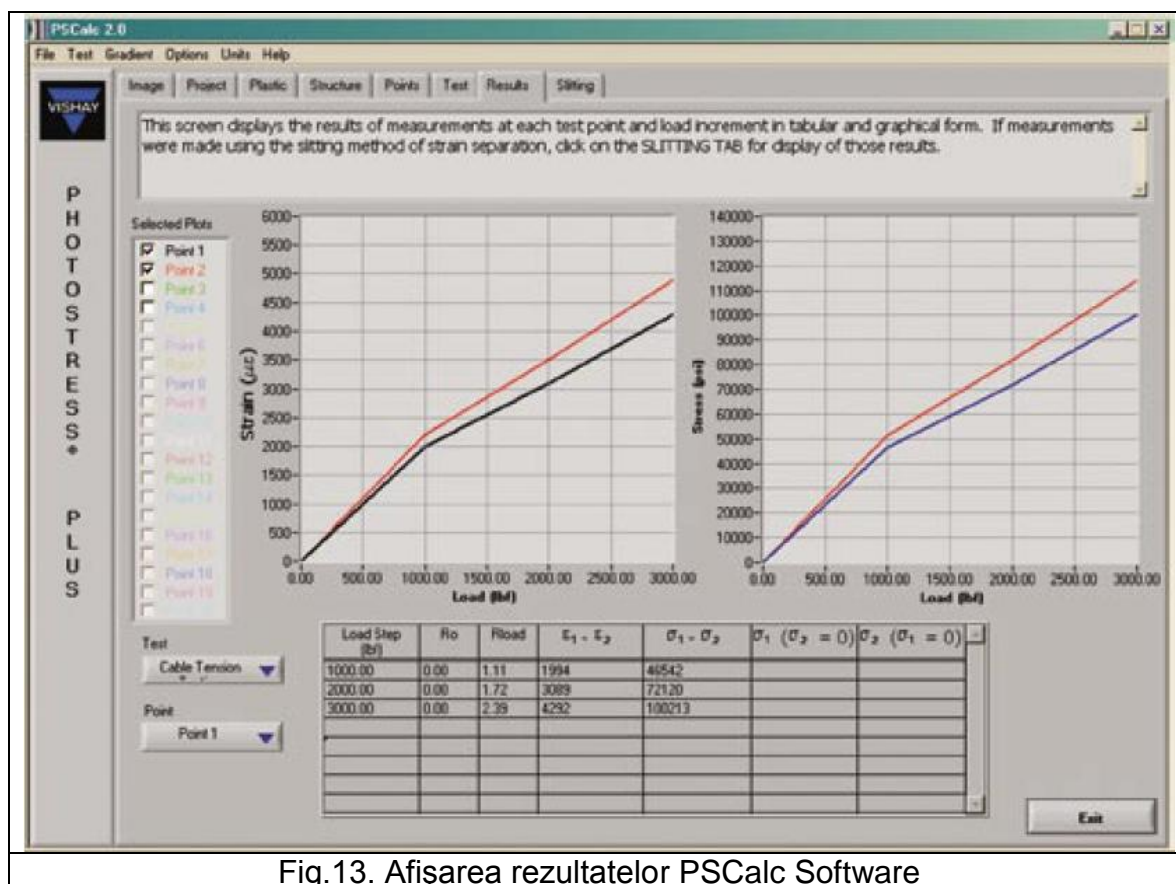


Fig.13. Afișarea rezultatelor PSCalc Software