



**EPS**

Escola Politècnica  
Superior

## Projecte/Treball Fi de Carrera

**Estudi:** Enginyeria Industrial. Pla 2002

**Títol:** Aplicacions de la fibra òptica a la monitorització d'estructures:  
Influència dels canvis de temperatura.

**Document:** Memòria

**Alumne:** Joan Cho Heang Lee Vergés

**Director/Tutor:** Miquel Llorens Sulivera

**Departament:** Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Mecànica dels medis continus i teoria de les estructures

**Convocatòria** (mes/any): Setembre 2012



## ÍNDEX MEMÒRIA

1.- INTRODUCCIÓ.....	4
1.1.- Antecedents. ....	4
1.2.- Objectius.....	7
1.3.- Abast. ....	7
2.- FONAMENTS TEÒRICS DE LA FIBRA ÒPTICA.....	8
2.1.- Introducció històrica. ....	8
2.2.- La Fibra òptica. ....	9
2.3.- Classificació de la Fibra òptica.....	11
2.4.- Procés de fabricació de la fibra òptica. ....	13
2.5.- Propagació de la llum. ....	16
2.5.1.- Principi de la reflexió. ....	16
2.5.2.- Principi de la refracció. ....	17
2.5.3.- Llei d'Snell.....	18
3.- SENSORS BASATS EN FIBRA ÒPTICA.....	19
3.1.- Sistemes interferomètrics.....	21
3.2.- Sensors SOFO. ....	25
3.3.- Sensors distribuïts.....	26
3.3.1.- Introducció.....	26
3.3.2.- Atenuació i scattering. ....	26
3.3.3.- Sensors Fiber Bragg Gratings (FBG).....	28
3.3.4.- Aplicacions industrials.....	34
4.- DISPOSITIUS. MERCAT DELS SENSORS DE FIBRA ÒPTICA. CLASSIFICACIÓ I APLICACIÓ. ....	35
4.1.- Sensors de temperatura.....	35
4.1.1.- Sensors puntuals.....	35
4.1.2.- Sensors de mesures distribuïdes. ....	38
4.2.- Sensors de Strain.....	43
4.2.1.- Sensors per mesures puntuals. ....	43
4.2.2.- Sensors de mesures distribuïdes. ....	49

5.- APLICACIONS MÉS REPRESENTATIVES DE MONITORITZACIONS EN ESTRUCTURES CIVILS.....	53
5.1.- Monitorització dels ponts bessons de Versoix ( Suïssa).....	53
5.2.- Monitorització dels ponts Lutrive ( Suïssa ).....	55
5.3.- Monitorització de la Villa Royal de Monza ( Itàlia).....	56
5.4.- Monitorització del moll San Giorgio Levante.....	58
5.5.- Monitorització de l'Esglesia Grandia.....	60
6.- FASE EXPERIMENTAL.....	63
6.1.- Introducció.....	63
6.2.- Disseny conceptual.....	63
6.2.1.- Requeriments.....	63
6.2.2.- Descripció del suport de l'assaig.....	64
6.3.- Dimensionat del suport.....	67
6.3.1.- Pre-dimensionat.....	67
6.3.2.- Dimensionat.....	71
6.3.3.- Estructura definitiva.....	79
6.4.- Instrumentació proposada.....	80
6.5.- Construcció del suport.....	84
6.6.- L'assaig.....	92
6.6.1. Distribució dels canals.....	92
7.- RESULTATS.....	93
7.1.- Conversió de dades.....	93
7.1.1.- Bandes extensomètriques.....	93
7.1.2.- Fibra òptica.....	93
7.1.3.- Banda extensomètrica + circuit linealitzador.....	95
7.2.- Resultats.....	95
7.2.1.- Diferència entre temperatura superficial i temperatura ambient.....	95
7.2.2.- Variació en les lectures obtingudes a partir de fibra òptica i extensometria.....	100
8.- RESUM DEL PRESSUPOST.....	104
9.- CONCLUSIONS I DESENVOLUPAMENTS FUTURS.....	105
9.1.- Conclusions.....	105
9.2.- Desenvolupaments futurs.....	108

10.- RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	109
11.- BIBLIOGRAFIA.....	110

# 1.- INTRODUCCIÓ.

## 1.1.- Antecedents.

Al igual que les persones, els objectes amb el transcurs del temps, també estan subjectes a l'envelliment i el deteriorament. Qualsevol estructura com pot ser un pont, un edifici, una presa o una central nuclear, està sotmesa a canvis físics i/o químics que poden afectar la seguretat d'aquesta i, de forma indirecte, la de les persones. A més, els costos relacionats amb el manteniment poden arribar a ser molt elevats, fins i tot, es pot donar el cas que superin inclús el cost d' inversió de la nova estructura.

Davant la necessitat imperiosa de reduir el mínim els costos de manteniment, prevenció i seguretat, la monitorització en el camp de les estructures civils és una activitat que ha anat adquirint cada vegada un paper més predominant en la societat. La seva funció consisteix en combinar la captura de dades de l'estructura amb l'anàlisi de la mateixa. L'anàlisi de les dades obtingudes, no només suposa tenir un bon coneixement del comportament global de l'estructura; també serveix per detectar anomalies (danys o degradació) que permetin prevenir i planificar futures actuacions.

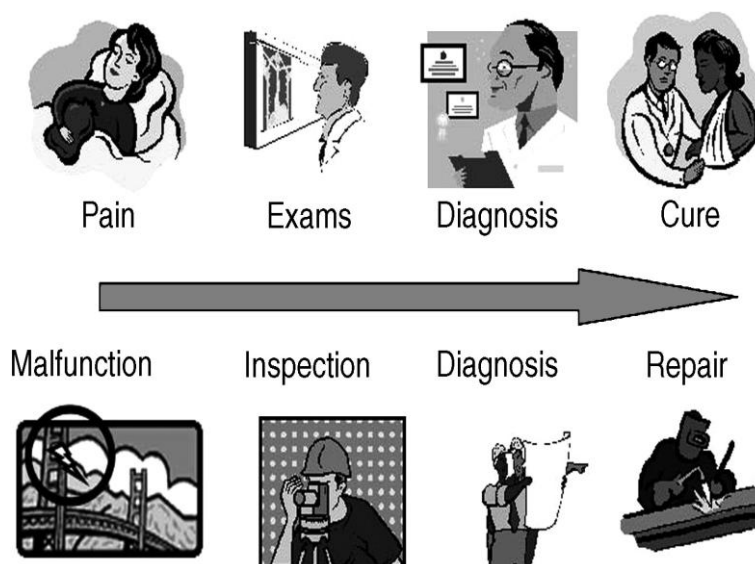


Figura 1.1: Fases de la monitorització d'una estructura

(Font: Glisic.B, Inaudi.D, 2007 )

Gràcies a un sistema de monitorització, el funcionament incorrecte de l'estructura, es detecta en temps real, i per tant, l'inspecció, el diagnòstic i la reparació tenen lloc molt abans, que en aquells casos on la patologia ha de ser detectada a través de l'inspecció visual.

Aprofundint un mica més al respecte, el procés de monitorització estructural té una importància fonamental en:

**a) Gestió estructural**

Les dades obtingudes mitjançant un sistema de monitorització, es poden utilitzar per optimitzar les tasques de reparació, rehabilitació o manteniment.

Si les estructures presenten deficiències que no poden ser identificades mitjançant inspecció visual, la monitorització augmenta la seguretat estructural, a més de que el cost de reparació és menor, ja que el temps d'intervenció també ho és.

També existeix la possibilitat de que en algunes estructures, les condicions siguin millors del que inicialment es va suposar. En tals casos, la monitorització permet augmentar els marges de seguretat sense tindre la necessitat d'intervenir. Per tant, una petita inversió inicial en l'inici del projecte, pot suposar un gran estalvi a llarg termini.

**b) Increment de la seguretat**

El mal funcionament d'una estructura pot comportar conseqüències molt serioses. La més greu de totes, és aquella en la qual l'accident implica la pèrdua de vides humanes. És per això que la monitorització d'una estructura suposa un increment important en la seguretat de la mateixa.

**c) Millora de coneixements**

A més de millorar i ampliar el coneixement que es té d'una estructura, suposa una eina important per calibrar models numèrics que ajudaran a preveure el comportament de la mateixa.

Els sistemes de monitorització es poden utilitzar durant períodes curts, llargs o bé de forma periòdica. Per algunes aplicacions, la monitorització de forma periòdica pot proporcionar resultats importants i satisfactoris, però l'informació entre dos monitoritzacions és desconeguda. L'única manera d'obtenir un registre complet de la vida d'una estructura s'aconsegueix mitjançant una monitorització continuada en el temps.

En cada aplicació concreta, es requerirà un tipus diferent d'interrogació. Això dependrà del paràmetre que es desitja monitoritzar, i la importància del mateix. Aquests paràmetres que són susceptibles a ser monitoritzats poden ser de varis tipus, encara que els més usuals són:

- Paràmetres químics: Ph, humitat, concentracions de clor.
- Temperatura
- Paràmetres ambientals: Temperatura del aire, velocitat del vent, precipitacions.

Dins el camp de l'enginyeria civil, l'instrumentació d'estructures d'edificació i obra civil ha experimentat una profunda expansió. Les aplicacions més habituals en aquest tipus d'activitat, solen estar associades a l'avaluació d'esforços en estructures existents, i/o el seguiment de l'estat tenso-deformacional de les mateixes durant el procés de construcció. Hi ha una gran varietat de dispositius de mesura que permeten efectuar aquest seguiment.

El sensors basats en la tecnologia de la fibra òptica, tenen algunes propietats que els fan molt apreciats:

- Immunitat a les interferències electromagnètiques.
- Adequats per integrar-se en materials compostos.
- Llarga durabilitat.
- Sensibilitat i elevat ample de banda.
- Possibilitat de obtenir mesures discretes al llarg del temps, podent referir-les en tot moment a l'origen.
- Bona resistència a la corrosió i a la fatiga.
- Multiplexació de la informació procedent dels sensors.



- Poc pes i volum.

Tot i les múltiples avantatges, aquesta tecnologia presenta alguns inconvenients essent l' influència de la temperatura el més important.

- Fragilitat de la fibra.
- Necessitat d'un sistema optoelectrònic d'anàlisi.
- Influència de la temperatura en la presa de mesures.
- Alt cost de l' inversió.

## **1.2.- Objectius.**

L'estudi d'aquest treball es centrarà concretament amb les mesures de deformació. Els objectius que es perseguiran són:

- Aprendre les bases teòriques d' aquesta tecnologia.
- Determinar en quin grau, la temperatura afecta a les mesures adquirides mitjançant sensors de fibra òptica.
- Establir els mecanismes adients per quantificar, corregir o minimitzar aquests efectes.
- Comparar la fiabilitat d'aquest tipus de mesura respecte a la dels sensors basats en extensometria.

## **1.3.- Abast.**

Per dur a terme els objectius marcats en aquest projecte , la metodologia de treball que es durà a terme inclou les següents passes:

- Estudiar les bases físiques de la tecnologia de la fibra òptica
- Recull d'experiències prèvies en obra civil i edificació, on s'hagi aplicat aquest tipus de sensor.
- Aproximació experimental al fenomen: disseny i construcció d'una petita estructura sobre la qual es faran simulacions adreçades a caracteritzar el comportament del sensor enfront a règims variables de temperatura. Estudi comparatiu de les tecnologies de fibra òptica i extensometria.

- Proposta de mesures concretes per corregir l'efecte de la temperatura sobre les lectures.
- Redacció i proposta de futurs desenvolupaments.

## **2.- FONAMENTS TEÒRICS DE LA FIBRA ÒPTICA.**

### **2.1.- Introducció històrica.**

La història recent de la fibra òptica neix quan l'any 1870 el físic John Tyndall descobreix que la llum es podia transportar a través de l'aigua, corbant-se per reflexió interna. Inicialment, aquest descobriment va ser utilitzat per il·luminar les corrents d'aigua de les fonts públiques.

El 1880 Alexander Graham Bell, veient que la llum es podia transmetre a través d'un raig comença a experimentar amb el fotòfon. Malauradament, al no tenir una font lluminosa adequada i un medi que permetés garantir baixes atenuacions, no va arribar a tenir cap aplicació pràctica. Entre els anys 1910 i 1934 s'estudia la propagació de la llum en barnilles de vidre.

El 1952, en Narinder Singh Kapany, basant-se amb els coneixements i estudis d'en John Tyndall, realitzà una sèrie d'experiments que conduirien a posteriori a la creació de la fibra òptica. Un dels primers usos de la fibra òptica va ser utilitzar un feix de fibres per la transmissió d'imatges, que s'utilitzà per endoscòpia mèdica. La primera fibra òptica semi-flexible endoscòpica fou patentada per Basil Hirschowitz, C. Wibur Peters, i Lawrence E. Curtiss l'any 1956. Per aquest invent, es van utilitzar unes fibres forrades amb un material que tingués un baix índex de refracció ( anteriorment, s'usaven olis i ceres).

El 1965, en Charles Kao va estimar que la atenuació de la fibra òptica podria ser provocada per les impureses del material. Paral·lelament, es va poder demostrar que les fibres òptiques són capaces de ser molt pràctiques i eficients en l'àmbit de les telecomunicacions si l'atenuació es redueix per sota de 20dB per kilòmetre.

Durant el 1970, els investigadors Maurer, Keck, Schultz i Zimar que treballaven per Corning Glass Works, fabriquen la primera fibra òptica aplicant impureses de titani i silici. Les pèrdues obtingudes foren de 17 dB/km. Durant la dècada, les tècniques de fabricació van anar millorar ostensiblement fins aconseguir pèrdues de tan sols 0,5 dB/Km.

El 1973, els vaixells de l'armada dels EE.UU posen en funcionament els primers conductors de fibra òptica per telefonia.

L'any 1977 Siemens instal·la a Berlín el primer trajecte de fibra òptica pel correu Federal Alemany. El CERN, de Ginebra, des de 1978 té en servei un cable de conductors de fibra òptica a prova de radiacions. Va ser en aquest període quan es comença a utilitzar la nova tecnologia a nivell mundial.

La investigació i el desenvolupament en els darrers anys ha provocat que l'ús de la d'aquesta tecnologia hagi guanyat cada vegada més cota de mercat. L'instrumentació través de fibra òptica, permet que la senyal òptica es propagui amb pèrdues lleugerament menors a les senyals elèctriques que es transmeten a través dels cables de coure convencionals, convertint-la en el mitjà de transmissió perfecte per grans distàncies.

## **2.2.- La Fibra òptica.**

La fibra òptica com es pot observar en la figura 2.1, és un medi físic de geometria cilíndrica, de gruix similar al d'un cabell. Aquests filaments transparents de vidre o de materials plàstics condueixen la llum a banda i banda de la fibra recorrent grans distàncies. El fenomen pel qual la llum és conduïda per l'interior del seu nucli es coneix com a reflexió total. ( veure apartat reflexió)



Figura 2.1: Imatge de múltiples filaments de fibra òptica [22]

L'estructura típica d'una fibra és la que es mostra en la figura 2.2. La part central està formada per un nucli (core) de diàmetre variable en funció del tipus de fibra, per on viatge el senyal òptica, rodejada per una capa externa de revestiment de fins a 125  $\mu\text{m}$  (cladding) que impedeix que la llum surti cap el exterior. Finalment la tercera capa (buffer coating) és una capa protectora de 250  $\mu\text{m}$  com a màxim, que serveix per protegir la fibra de l'humitat externa i d'agents externs. En determinades ocasions, en el revestiment s'afegeix una segona capa de protecció.

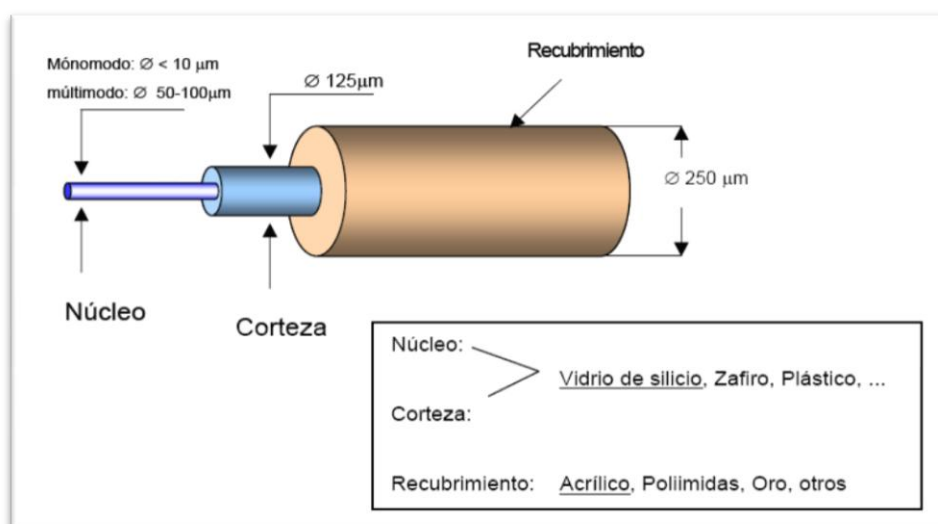


Figura 2.2: Esquema de les diferents parts d'una fibra òptica.

( Font: Frövel.M, 2006 )

La capacitat d'una fibra a l'hora de transmetre informació depèn de 3 factors:

- a) Disseny geomètric de la fibra.
- b) Propietats dels materials emprats en la fabricació.
- c) L'amplada de l'espectre de la font de llum utilitzada.

El silici pot treballar en un rang de temperatures força elevat, ja que fon a 600°C. La fibra òptica presenta un funcionament estable i uniforme des de -550°C a 125°C, sense que les seves característiques es degradin.

En la transmissió s'utilitzen senyals digitals, - 0 i 1 - generats mitjançant l'emissió o no d'una font de llum d'acord amb un codi preestablert. Primer de tot, un codificador converteix la informació en impulsos elèctrics, que a la vegada, el transmissor les converteix en senyals lluminoses emeses per un diode fotoemisor o un diode semiconductor làser. Per que els feixos de llum no escapin de la fibra de vidre, l'índex de refracció de la capa externa té que ser menor que el de la capa interna, produint-se així una reflexió total que fa tornar el raig a l'eix de la fibra. A la punta de sortida, un receptor transforma les senyals lluminoses en estímuls elèctrics.

### **2.3.- Classificació de la Fibra òptica.**

Les característiques òptiques d'una fibra òptica venen determinades per el diàmetre i el perfil de l'índex de refracció, que és en definitiva, per on passa la llum. Depenen del diàmetre del nucli es pot parlar de 2 tipus de fibres: multimode i monomode. Dins d'aquesta classificació, depenen del mode de propagació i del perfil de l'índex de refracció, es pot parlar de:

- Monomode.
- Multimode d'índex escalonat.
- Multimode d'índex gradual.

### Fibra monomode

El diàmetre del nucli mesura entre 5-10  $\mu\text{m}$ . Aquest petit tamany únicament permet el pas d'un mode o raig de llum a la vegada, propagant-se directament sense reflexió. Aquest fet provoca que l'amplada de banda sigui molt elevat, fent-la especialment útil per grans distàncies. El menor cost econòmic enfront les multimode provocarà l'ús d'aquest tipus de fibra s'incrementi cada vegada més.

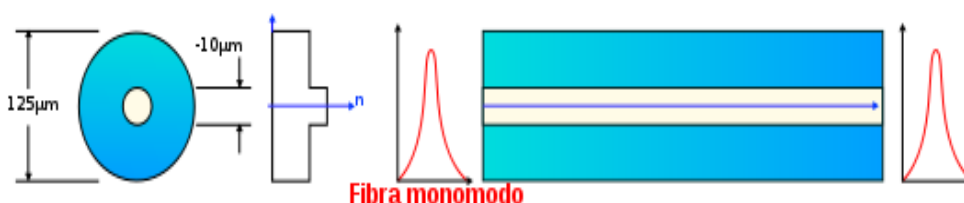


Figura 2.3: Variació de l'índex de refracció en una fibra monomode [23]

### Fibra multimode

El valor del nucli d'aquest tipus de fibra presenta diferències depenen de com sigui l'índex de refracció. En tot cas, les dimensions del nucli permeten que la llum realitzi diferents trajectes o modes de forma simultània. Els nuclis de la fibra multimode, facilita les connexió i acoblament de LEDs, píxels i altres fonts de llum econòmiques.

Les característiques de transmissió de la fibra multimode depenen exclusivament de la longitud d'ona de operació. Es presenta un interval operatiu estable entre els 10°C i els 35°C de temperatura.

### Fibra multimode d'índex escalonat

El nucli té un únic índex refractiu, uniforme al llarg de tota la fibra. Quan els modes o raigs arriben a contactar amb l'altre medi (revestiment), s'origina un canvi molt acusat en l'índex.

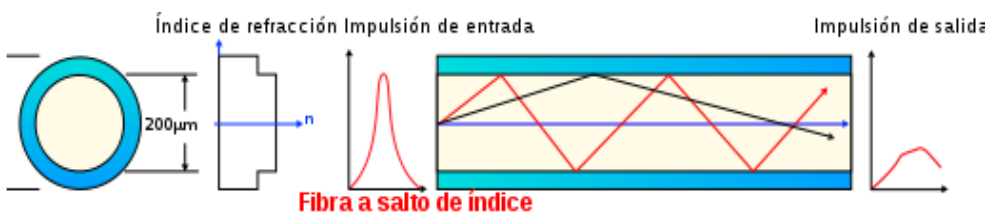


Figura 2.4: Variació de l'índex de refracció en una fibra multimode d'índex escalonat [23]

## Fibra multimode d'índex gradual

L'índex de refracció del nucli disminueix gradualment a mesura que s'incrementa la distància des del centre de la fibra. El punt de màxim índex de refracció correspon al centre del nucli.

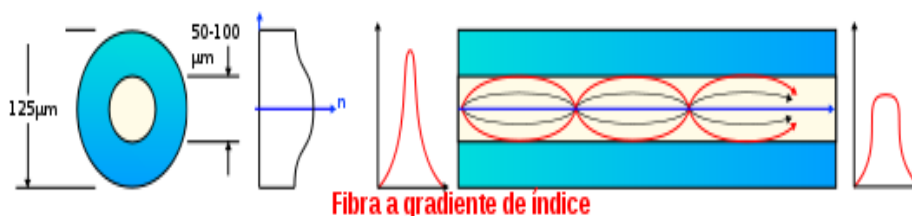


Figura 2.5: Variació de l'índex de refracció en una fibra multimode d'índex escalonat [23]

## 2.4.- Procés de fabricació de la fibra òptica.

Les aplicacions on s'utilitza la fibra òptica són innumerables. Per tal de garantir els nivells de qualitat exigits, així com unes propietats mecàniques i òptiques acceptables, la fabricació adquireix una notable importància.

La qualitat d'una fibra òptica depèn, principalment, del procés de fabricació i dels materials utilitzats. Els criteris principals per avaluar la qualitat d'un procés són: atenuació, resistència mecànica, sensibilitat a la microcurvatura i dispersió. Tanmateix, s'ha de garantir que aquests paràmetres siguin uniformes al llarg de tota la fibra per complir un alt estàndard de qualitat al llarg de tot el procés.

El primer pas consisteix en triar la matèria prima i dopants. Aquesta ha de satisfer una sèrie de característiques que són suficientment restrictives, com per acotar la tria de vidres, líquids i materials plàstics

- Han de ser d'un material tant pur com sigui possible per prevenir l'absorció i dispersió de la llum.
- El material que conforma el nucli (core) ha de tenir un índex de refracció més gran que el del material que forma el revestiment primari (cladding) per tal que la llum és pugui propagar per reflexió i no es dissipï cap a l'exterior.

Avui en dia gairebé totes les fibres es fabriquen a partir de vidres que tenen un alt contingut de silici dopat amb òxids, tals com el titani, fòsfor, germani o bor. Tanmateix, s'està experimentant amb altres vidres com els silicats de sodi, plom, calci, etc.

En la següent figura 2.6 es pot observar la variació de l'atenuació de la fibra en funció del dopant (agregar impureses en el material per modificar la seva estructura a fi d'obtenir unes propietats específiques determinades) que s'utilitza o per ajustar l'índex de refracció. Des del punt de vista del dopant, el germani és el més recomanat.

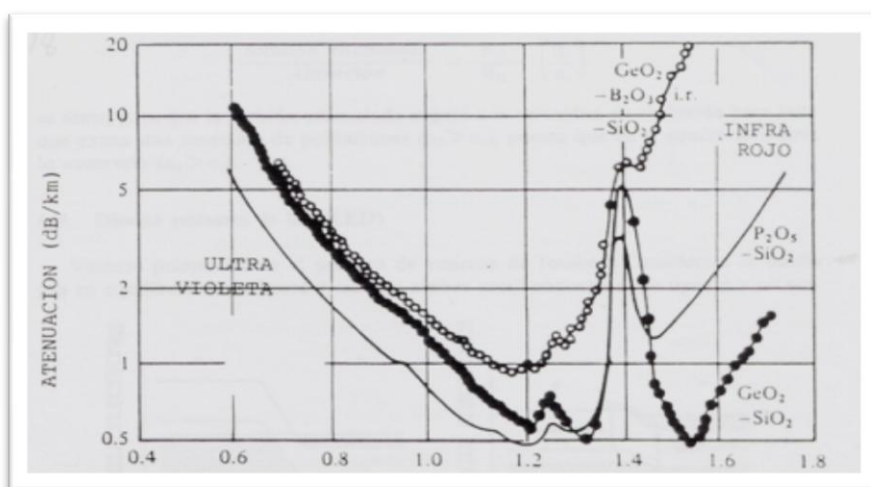


Figura 2.6: Efecte que causen els diferents dopants en l'atenuació.  
( Font: Cordoba.M, 2003 )

Una cop feta l'elecció del material amb el que es fabricarà la fibra òptica, el procediment a emprar, consta de dues fases:

#### **a) Creació de la preforma**

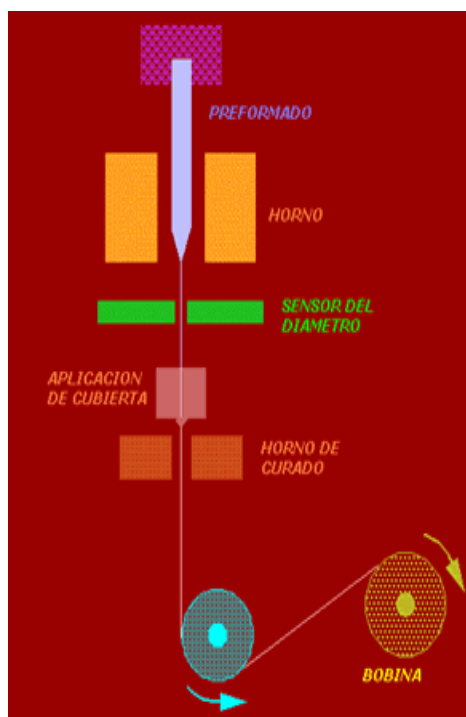
Consisteix en una ampliació a escala de les dimensions geomètriques ( raó entre diàmetres del nucli i del recubriment) i del perfil de l' índex de refracció que es vol aconseguir en el conducte de fibra òptica.



Tot seguit s'enumeren els tipus de tècniques d'us més freqüent en la creació d'una preforma.

- Tècniques convencionals on es manté el material vitri en estat fos produint-se així una estructura multicapa.
- Mètodes de deposició en fase vapor que permeten fabricar vidres silicats que no es podrien processar en fase líquida degut el seu elevat punt de fusió.

### b) Procés d'estirat



Una vegada s'obté la preforma, el següent pas consisteix en estirar aquesta preforma fins a obtenir la fibra pròpiament dita (fig 2.7). En aquesta etapa s'escalfa la punta de la preforma a 2000°C. A mesura que es va escalfant el vidre, es va estovant i per efecte de la gravetat s'allarga. A mesura que es va produint l'estirat, la fibra es refreda i tendeix a oxidar-se. Si no es protegeix la superfície, l'oxidació produeix una accelerada degradació de les condicions mecàniques i de transmissió. En el cas dels vidres, aquest fenomen es pot evitar sobreescalfant la superfície.

Figura 2.7: Procés d'estirat de la preforma

( Font: Merino.J, Garrido.B )

Abans d'aplicar el recobriments complementari, que serveix com aïllant de l'oxidació, es mesura i controla de manera sistemàtica el diàmetre. Aquest diàmetre té que ser uniforme al llarg de la fibra. A posteriori es col·locaran els recobriments complementaris i es crearan els cables al passar per unes bobines.

## 2.5.- Propagació de la llum.

La llum es propaga per l'interior de la fibra basant-se en les propietats de la refracció i reflexió. Tot seguit s'enumeren els principis elementals d'òptica:

### 2.5.1.- Principi de la reflexió.

Quant un raig de llum incideix sobre la superfície d'un altre medi, una part d'aquest raig es reflexa. La proporció de llum reflexada depèn de l'angle que forma el raig de llum incident amb la perpendicular a la superfície que separa els dos medis (figura 2.8).

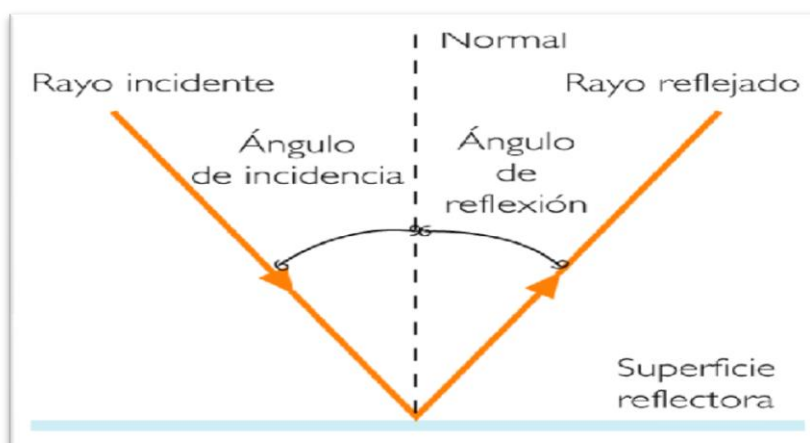


Figura 2.8 : Reflexió de la llum.  
( Font: [www.definicion.de/reflexion-de-la-luz](http://www.definicion.de/reflexion-de-la-luz) )

La reflexió de la llum es representa mitjançant 2 raigs. El incident, que és el que arriba a la superfície i el reflexat, que és el que surt rebotat després de reflexar-se. A la següent figura 2.9 es mostra un exemple d'aquest tipus de fenomen.

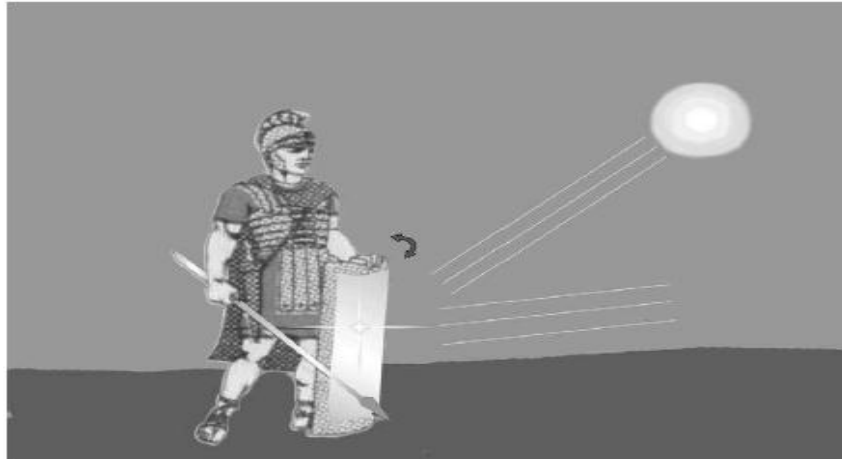


Figura 2.9 : Per mitjà de la reflexió dels raigs solars un romà utilitza el seu polit escut per comunicar-se amb els altres soldats. ( Font: Raynond M.Measures,2001)

### **2.5.2.- Principi de la refracció.**

La refracció és la curvatura que experimenta la trajectòria de la llum al penetrar un medi transparent. És el que succeeix quan posem la mà a l'aigua o quant mirem a través dels miralls de les nostres ulleres. El que s'observa és que l'aigua i els miralls distorsionen i corben la trajectòria de la llum.

La raó de tal curvatura és que la llum és frenada al entrar en un medi transparent més dens. Recordar que la velocitat de la llum en el buit és constant, però al atrevesar l'aigua o els miralls o qualsevol altre medi, te que superar milions d'àtoms provocant una disminució en la seva celeritat. Cada material es caracteritza per tenir un índex de refracció. Aquest índex, també anomenat índex refractiu, és la proporció entre la velocitat de la llum en el buit i la velocitat en el medi específic.

En la figura 2.10 es mostren diferents situacions en funció de l' angle d' inclinació que arriba el raig incident sobre el segon medi.

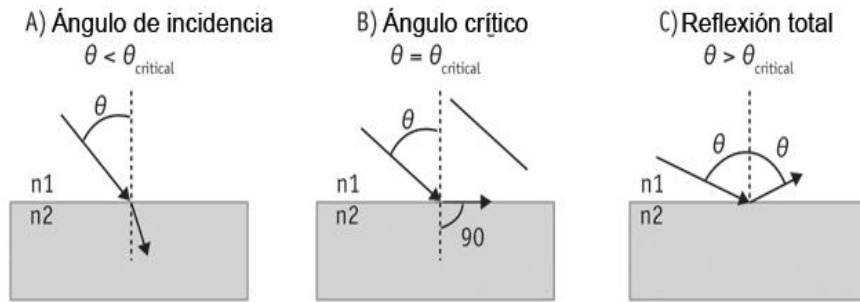


Figura 2.10: El cas A mostra una refracció ordinària. El segon cas(B), es tracta d'una refracció per un angle crític. En el cas crític, la llum és desplaçada paral·lela a l'interfície d'ambdós medis. El cas C, l'angle del raig incident supera l'angle crític, la reflexió és total.

(Font: WEB de Fibraoptica hoy )

### 2.5.3.- Llei d'Snell.

Quant un raig de llum de angle d'incidència  $\theta_1$  que es troba en un medi  $n_1$  es propaga en el medi  $n_2$ , l'angle de refracció  $\theta_2$  es pot calcular a partir de la següent expressió:

$$n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2 \quad (\text{eq. 2.01})$$

En el cas de la fibra òptica, quan la llum viatja per l'interior del nucli (core), la diferència que hi ha entre el índex de refracció del nucli i el del revestiment, fa que la llum es reflecti permanentment en aquesta zona, de forma que la llum queda retinguda a l'interior del nucli.

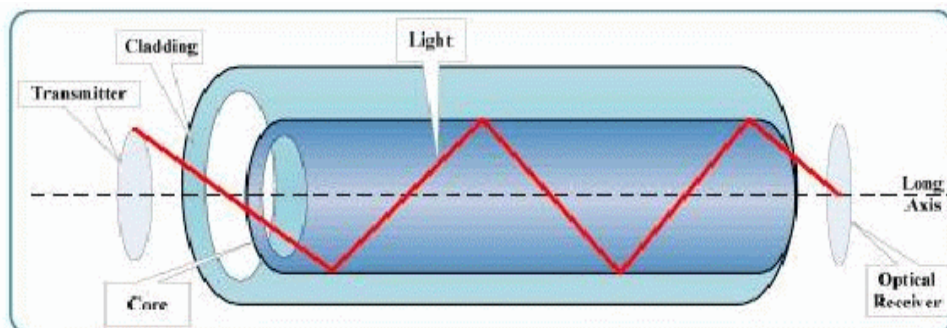


Figura 2.11: Propagació de la senyal en la fibra òptica. [24]

( Font: WEB de Astarmathsandphysics )

La llum pot viatjar distàncies molt llargues sense pèrdues significatives d'intensitat. S'observen pèrdues importants d'intensitat únicament quan la fibra està flexionada amb radis inferiors a 30 mm, o quan està sotmesa a forces transversals significatives.

### 3.- SENSORS BASATS EN FIBRA ÒPTICA.

Per avaluar la salut estructural d'una estructura civil cal tenir en compte paràmetres com: la posició, deformació, inclinació, temperatura, vibracions, humitats, etc. Els sensors més tradicionals, basats en transductors elèctrics o mecànics ja ho permeten. De totes maneres com s'ha mencionat a l'inici de la memòria, en els darrers anys, els sensors òptics han anat guanyant terreny en front les tecnologies convencionals degut a les innumerables avantatges que presenten. Existeixen una gran varietat de sensors òptics. Com es veurà al llarg d'aquest capítol, cada un d'ells presenta unes característiques que el fan adequat per a unes aplicacions o unes altres. Es posarà especial èmfasi en els sensors FBG ja que són els que s'utilitzaran en la part experimental del present treball. Generalment, aquests són els més empleats degut a la seva simplicitat de funcionament i, disposen d'unes millors prestacions enfront la resta. A més, el seu principi de funcionament permet obtenir informació dels paràmetres més importants d'una estructura: les deformacions i la temperatura.

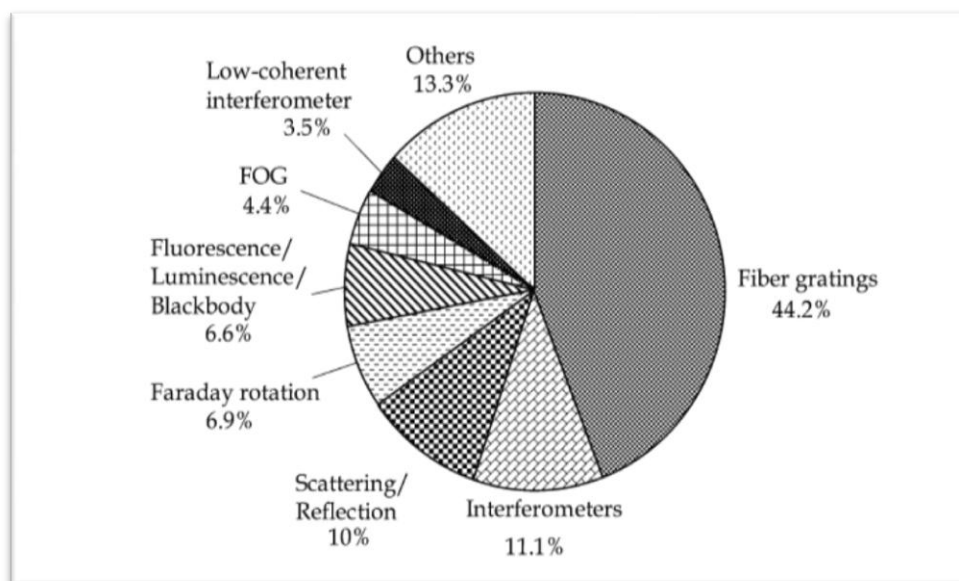


Figura 3.1: Distribució de l' utilització de sensors en aplicacions enginyerils  
(Font: Lee.B, 2003 )

En les següents il·lustracions ( figures 3.2 i 3.3 ) es mostren, per una banda, la classificació dels sensors basats en la tecnologia de fibra òptica depenent del tipus de mesura, i per l'altre una taula on es resumeixen les característiques principals d'aquestes tecnologies.

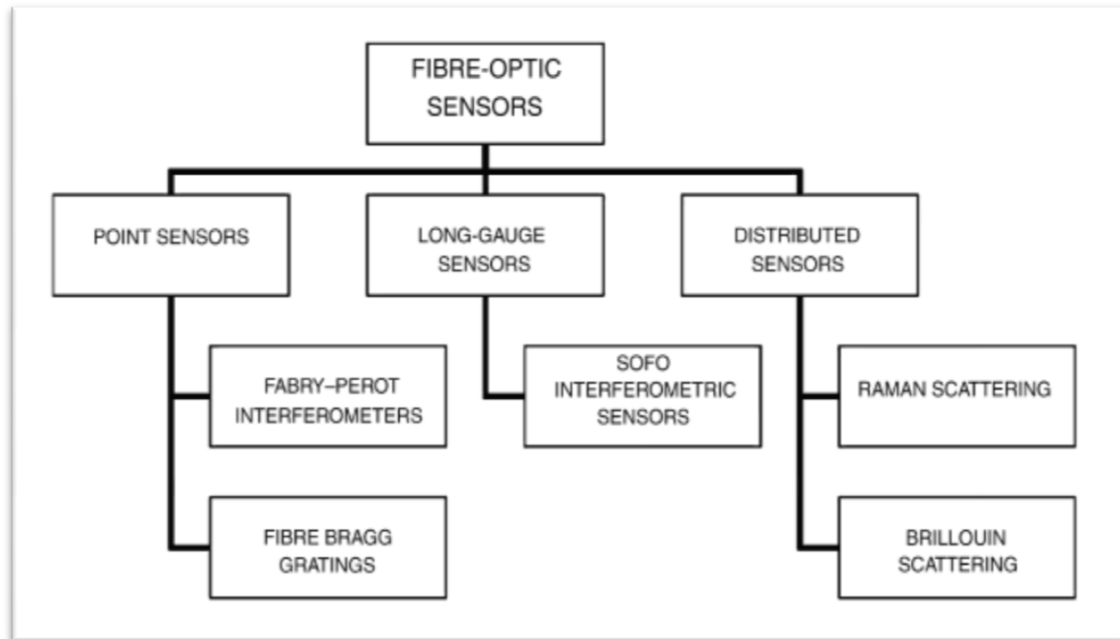


Figura 3.2: Classificació dels sensors basats en fibra òptica.  
( Font: Glisic, Inaudi, 2007 )

	SOFO interferometric	Fabry-Perot interferometric	Fibre Bragg gratings	Raman scattering	Brillouin scattering	
Sensor type	Long-gauge (integral strain)	Point	Point	Distributed	Distributed	
Main measurable parameters	Deformation Strain Tilt Force	Strain Temperature Pressure	Strain Temperature Acceleration Water level	Temperature	Strain Temperature	
Multiplexing	Parallel	Parallel	In-line and parallel	Distributed	Distributed	
Measurement points in one line	1	1	10-50	10 000	30 000	
Typical accuracy	Strain ( $\mu\epsilon$ )	1	1		20	
	Deformation ( $\mu\text{m}$ )	1	100	1		
	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )		0.1	0.1	0.1	0.2
	Tilt ( $\mu\text{rad}$ )	30				
	Pressure (% full scale)	0.25				
Range	20 m gauge			8 km	30 km, 150 km with range extenders	
Fibre type	Single mode	Multimode	Single mode	Multimode	Single mode	

Figura 3.3: Resum de les principals característiques dels diferents tipus de sensors òptics.  
 ( Font: Glisic, Inaudi, 2007 )

### 3.1.- Sistemes interferomètrics.

Aquest tipus de sensors són molt interessants per la seva elevada sensibilitat. Però també tenen els seus inconvenients. Els més importants són els problemes inherents a que el senyal que proporciona sigui periòdic i pugui estar subjecte a pertorbacions ambientals. Això implica un sistema de mesura de gran complexitat. Una altre inconvenient en tot sensor, i especialment els sensors interferomètrics, és la presència en la mesura, de diversos paràmetres dependents entre sí. Existeixen diferents tipus de sistemes interferomètrics per mesurar deformacions. Els més coneguts son els sensors Fabry-Perot, els sistemes March-Zehnder i els sistemes tipus Michelson.

Els sensors Fabry-Perot poden ser de 2 tipus: intrínsecs o extrínsecs.

Els intrínsecs (figura 3.4) estan constituïts per 2 miralls paral·lels entre si separats per unes poques micres, d'un acondicionador de senyal que s'encarrega d'emetre el feix de llum, i d'una sonda. Quan un raig de llum entra a l'interior de la fibra es reflexa tant en d'interfície mirall-aire com en l'aire-vidre.

Els sensor Fabry-Perot es basa en el principi de l' interferometria. Es mesura la diferència de recorregut entre el raig transmès i el reflexat. A efectes pràctics, aquesta diferència de fase es tradueix en una variació de intensitat. En particular, la diferència de camí és funció de la longitud de la cavitat que hi ha entre les superfícies reflectants i de la reflectància d'aquestes.

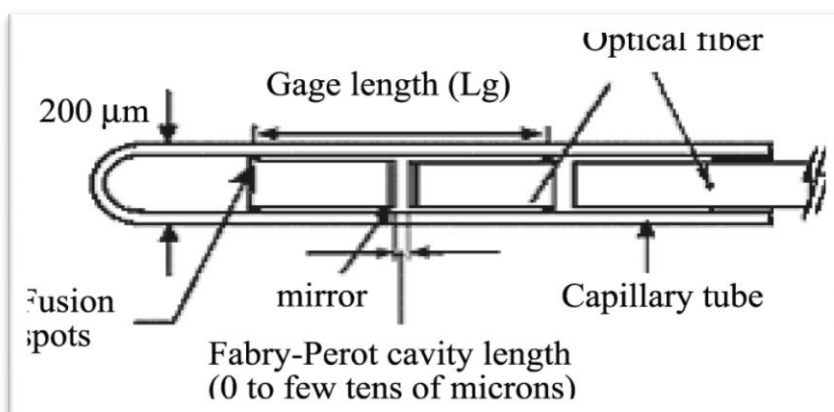


Figura 3.4: Esquema d'un interferòmetre intrínsec Fabry Perot.

La modificació de la cavitat es fa en funció de la magnitud a mesurar. Per exemple, en el cas dels sensors de temperatura els miralls estan fabricats d'un material de reflectància variable segons la temperatura. Si els sensors són de pressió, es disposa d'un diafragma que modifica la longitud de la cavitat ( zona d'aire entre els 2 miralls). En definitiva, modificar les propietats d'aquesta cavitat en funció del paràmetre a mesurar és la clau d'aquesta tecnologia.

En els extrínsecs (figura 3.5), la cavitat està formada per una zona d'aire creada entre els extrems de dos fibres òptiques alineades entre sí dins d'un tub buit. La primera fibra és una monomode, mentre que la segona és una fibra multimode, i és utilitzada com un reflector. La llum entrant és parcialment reflexada al final de la fibra



monomode, essent aquesta equivalent a la llum de referència entre els altres interferòmetres. La llum transmesa es reflexa en la cara de la fibra multimode, essent equivalent a la llum sensitiva en els demés interferòmetres.

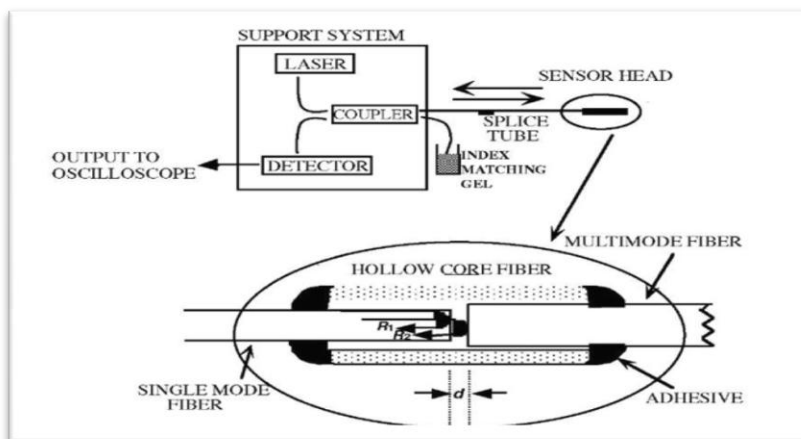


Figura 3.5: Esquema d'un interferòmetre extrínsec Fabry Perot.

(Font: WEB de what-when-how )

Les mesures amb aquest tipus de sensors permet obtenir elevades precisions submicromètriques en aplicacions tals com mesura de la temperatura, pressió, desplaçament o vibracions.

Un altre tipus de sistema interferomètric àmpliament utilitzat és el de Michelson (figura 3.6). S'usa per mesurar deformacions mitjanes en una zona molt ampla. S'utilitza amb èxit en la mesura de baines, columnes i revestiments. En la pràctica apareixen problemes relacionats amb la influència de la temperatura sobre el sensor, que és important al ser la seva longitud, la longitud total de la fibra òptica des del controlador fins al seu extrem lliure.

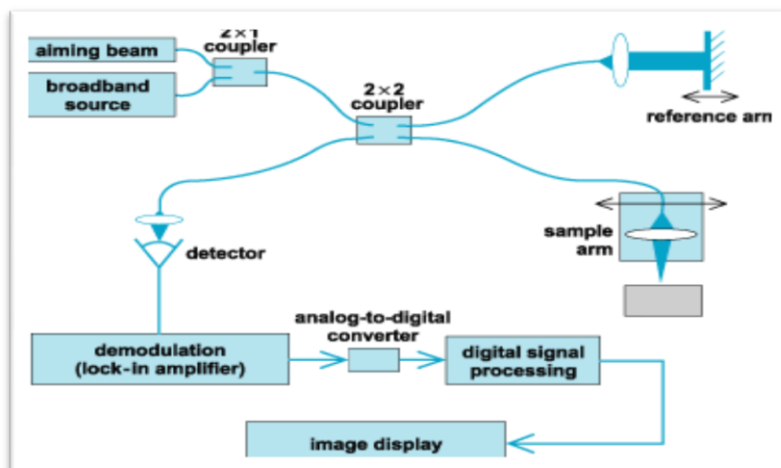


Figura 3.6: Esquema d'un interferòmetre de Michelson basat en fibra òptica

El tercer sistema és el de tipus March-Zehnder (figura 3.7). Funciona amb una font de llum làser de He-Ne, acobladors òptics direccionals (3 dB) per la divisió i recombinació del feix, i un fotodíode detector en una de les sortides amb l'electrònica associada d'amplificació i acondicionament de la senyal.

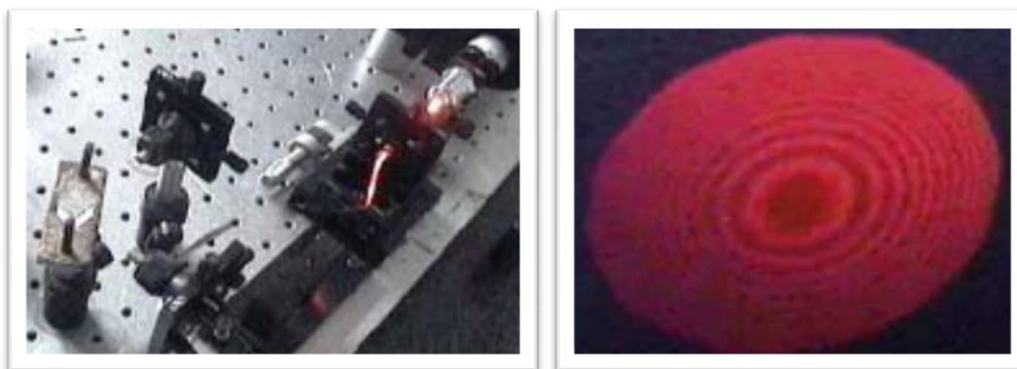


Figura 3.7: Interferòmetre March-Zehnder a) Interferòmetre March-Zehnder basat en fibra òptica b) Franjes d'interferència obtingudes per l'interferòmetre M-Z.

L'elevada sensibilitat del sensor interferomètric i la complexitat del sistema de mesura fan que per poder verificar els resultats obtinguts sigui necessari disposar d'uns mecanismes adequats al tipus de paràmetre de mesura. La temperatura també juga un paper clau tant per la monitorització de processos de fabricació del material, com per la gran influència que causa en la mesura d'altres variables.

### 3.2.- Sensors SOFO.

El sistema SOFO (acrònim del francès 'surveillance d'ouvrages par fibres optiques') és uns dels sistemes d'instrumentació més utilitzats en l'actualitat. Es basa en la interferometria de baixa coherència. És un sensor basat en la tecnologia de la fibra òptica que permet mesurar deformacions amb un nivell de resolució de micròmetres, També presenta una excel·lent estabilitat a llarg termini i una alta insensibilitat a la temperatura.

El sensor consisteix en un parell de fibres que s'instal·len en l'estructura a controlar. Una de les fibres, anomenada fibra de mesura, es troba mecànicament en contacte amb la superfície de l'estructura, per tant pateix les mateixes deformacions que aquesta. L'altre fibra, la fibra de referència, es situa en la mateixa tubera però sense mantenir el contacte amb l'estructura. A l'extrem de la fibra, hi ha uns miralls que reflecteixen la llum cap al acoblador, a on es recombinen els 2 feixos i se'ls dirigeix cap a l'analitzador.

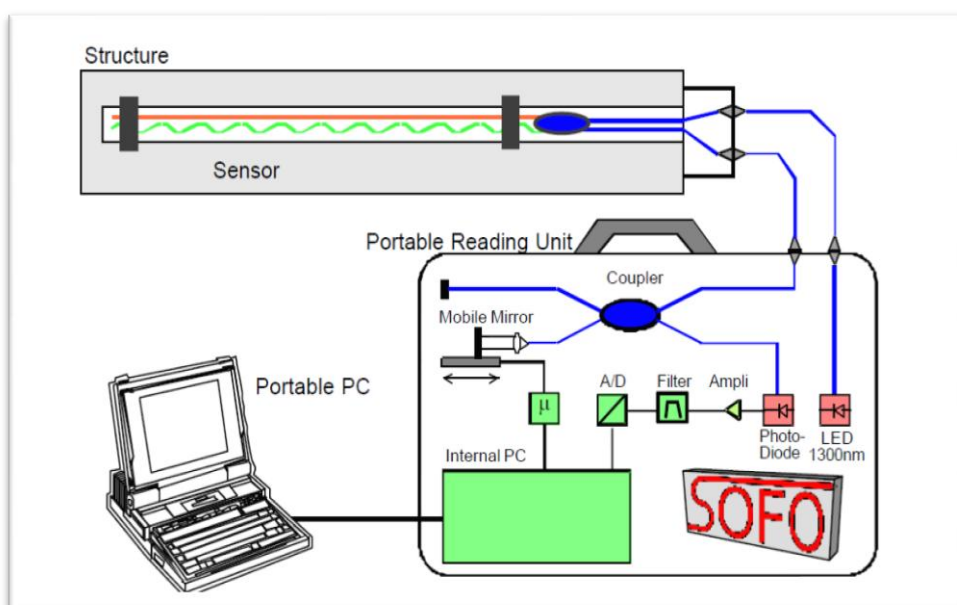


Figura 3.8: Configuració del sistema de sensors interferomètric SOFO.

(Font: Inaudi.D, Glisic.B, Vurpillot.S, Lloret.S, Kronenberg.P , 1999)

Tota la deformació que es produeix en l'estructura canvia la diferència de longituds entre les dues fibres. Per fer una mesura absoluta d'aquest desequilibri, s'utilitza el doble interferòmetre de Michelson. El primer canal consisteix en la medició i les fibres de referència, mentre que el segon conté l' unitat de lectura portàtil.

### **3.3.- Sensors distribuïts.**

#### **3.3.1.- Introducció.**

Aquest tipus de sensors han despertat un gran interès degut a la capacitat que tenen per monitoritzar temperatures i tensions en grans infraestructures, permeten substituir els innumerables sensors puntuals.

Utilitzen la llum dispersada de Rayleigh per mesurar perfils d'atenuació de llarga distància de fibra òptica. La senyal detectada (\_Rayleigh) presenta una corba exponencial amb el temps que està directament relacionada amb l'atenuació lineal de la fibra. L' informació de temps es converteix en informació de distància si la velocitat de la llum és coneguda ( similar a les tècniques de detecció de radar).

#### **3.3.2.- Atenuació i scattering.**

Quant un senyal òptic es propaga per l' interior de la fibra es produeixen irremediablement unes pèrdues. Aquestes pèrdues són exponencialment proporcionals al coeficient d'absorció ( $\alpha$ ) i a la longitud que recorre (L). Per tant, si s'introdueix un senyal òptic de potència  $P_0$  , la potència òptica que es tindrà a una distància L serà:

$$P = P_0 \times e^{-\alpha \times L}$$

(eq.3.01)

L'atenuació és un paràmetre característic de la fibra, i depèn de la longitud d'ona. Com s'observa en la figura existeixen 3 portes d'atenuació. Aquestes portes corresponen a les longituds de 850 nm, 1310 nm i 1550 nm, essent aquesta última la que s'obté la atenuació més baixa.

Existeixen diversos factors que provoquen pèrdues en la fibra: la curvatura de la fibra, l'absorció del material, scattering elàstic ( Rayleigh), scattering de Raman i scattering de Brillouin. Entre els factors cal destacar el de Rayleigh degut a que es tracta de la principal font de pèrdues en la fibra. Es tracta d'una pèrdua intrínseca del material degut a les no homogeneïtats que presenta. A la figura 3.9 s'observen els tres principals fenòmens d' scattering presents en la fibra:

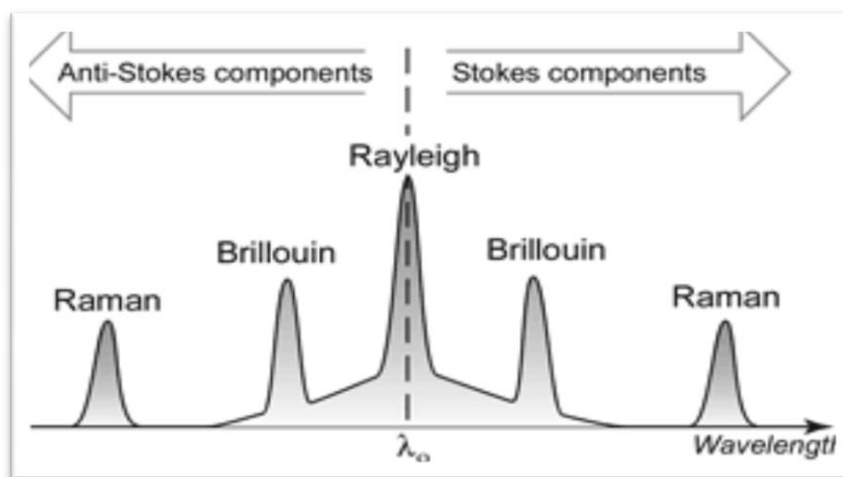


Figura 3.9 : Espectre característic del procés d' scattering en una fibra òptica.

( Font: Glisic.B, Inaudi.D 2007)

L' scattering és un procés a on la llum experimenta un canvi en la direcció degut a que els fotons colisionen amb àtoms o molècules que hi ha presents en el medi de propagació. Els processos d' scattering es poden dividir en dos grups: elàstics o inelàstics. La principal diferència radica en l' intercanvi energètic entre el camp electromagnètic i el medi dielèctric per el que es propaga. En un scattering elàstic no hi ha intercanvi d'energia, en canvi en l' scattering inelàstic hi ha un petit intercanvi.

L' scattering de Rayleigh succeeix quan la llum viatja per sòlids, líquids o gasos .És una dispersió produïda per les fluctuacions de l'entropia del medi. Les fluctuacions de densitat presents en la fibra, són la principal causa de pèrdues d'aquest procés, produint petits canvis en l'índex de refracció. Aquestes variacions són degudes a impureses i defectes estructurals de la xarxa cristal·lina de la fibra òptica.

Un cop conegut el coeficient d' scattering reflexat en un lloc concret indica l'estat de la fibra en dit punt - es poden mesurar i localitzar perturbacions externes i avaluar l'estat de la fibra. Això permet crear sensors tant de temperatura com de deformació unitària.

L' scattering de Brillouin es produeix degut a vibracions moleculars que creen una ona acústica, essent normalment molt petit el valor de la llum dispersada. Aquest fenomen produeix una atenuació en el senyal, podent arribar a ser un gran obstacle en la quantitat de potencia que pot enviar-se a través de la fibra. En tot cas, l'ona reflexada d' Stokes també es pot utilitzar en la mesura de certes propietats de la fibra tals com les deformacions unitàries o temperatura.

La dispersió de Raman és la més dèbil de totes, fet pel qual és habitual utilitzar la fibra multimode en els sensors de tipus Raman per poder acoblar més potència en el pols d'entrada. El seu principi es basa en l' interacció d'ones i els modes ressonants dels àtoms o molècules del medi. Com a conseqüència d'aquestes vibracions es generen fonons òptics ( unitats elementals e indivisibles d'energia d'una ona elàstica ) Aquestes vibracions no es propaguen a través del medi si no que tenen lloc en el seu interior i, únicament es poden transferir a les molècules veïnes mitjançant col·lisions.

### **3.3.3.- Sensors Fiber Bragg Gratings (FBG).**

Vist les avantatges d'aquest tipus concret de sensors i com que la realització de la part experimental del present document es farà amb aquests tipus de sensors, tot seguit es farà una descripció més exhaustiva dels mateixos. Primerament, es descriuen els avantatges més importants:

- Capacitat de multiplexació.
- Instal·lació embeguda integrada, adherida sobre la superfície o soldada sobre la superfície.
- Codificació de longituds d'ona.
- Producció en massa a cost raonable.
- Resistents a elevades deformacions.
- Resistents a elevades i baixes temperatures ( des de 4 graus Kelvin fins a 1000°C), dependent del recobriment de la fibra.
- Possibilitat d'aconseguir llargues distàncies entre els sensors i els dispositius d'adquisició de dades.

Els sensors de FBG ( prové del acrònim anglès Fiber Bragg Gratings) van ser desenvolupats durant els anys 80 en l' àmbit de les telecomunicacions com a filtre per el processament de senyals òptiques, però ben aviat es va veure el gran potencial que tenien a l'hora de mesurar deformacions i temperatures. Aquests sensors estan constituïts per una xarxa anomenada Bragg que consisteix en un petit segment de fibra òptica, el qual se l'introdueix una modulació o variació periòdica local del índex de refracció en el nucli de la fibra. A la següent il·lustració es visualitzar l'esquema fonamental d' aquest tipus específic de sensor òptic.

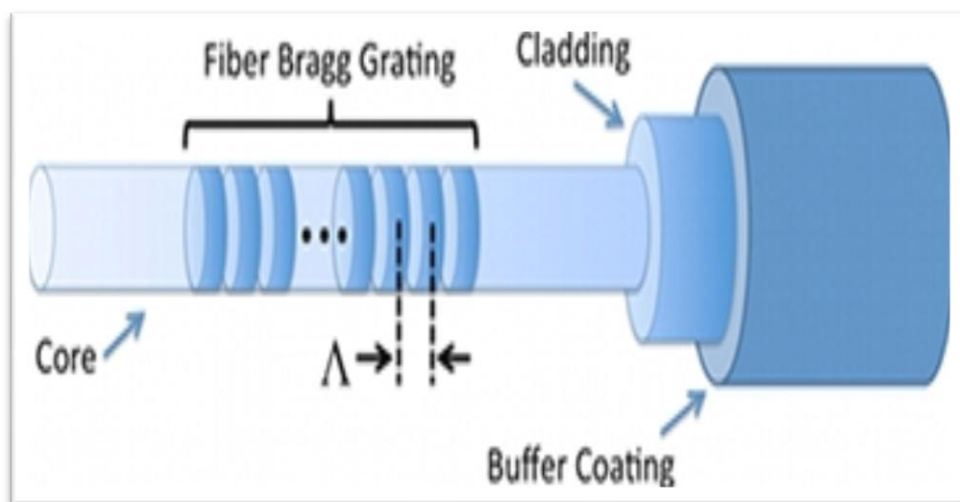


Figura 3.10: Vista d'un sensor Fiber Bragg Gratings.  
(Font: WEB de National Instruments)

Quan s'exposa el nucli de la fibra a una forta e intensa llum ultraviolada, les propietats reflectives de la llum poden ser programades de tal manera que sigui possible utilitzar la fibra per mesurar tensions i temperatures.

El gravat reflexa longituds d'ona particulars i transmet totes les demés, el que genera una aplicabilitat dual: com a filtre òptic en línia per bloquejar certes longituds d'ona, o com a reflector de longituds d'ona específiques.

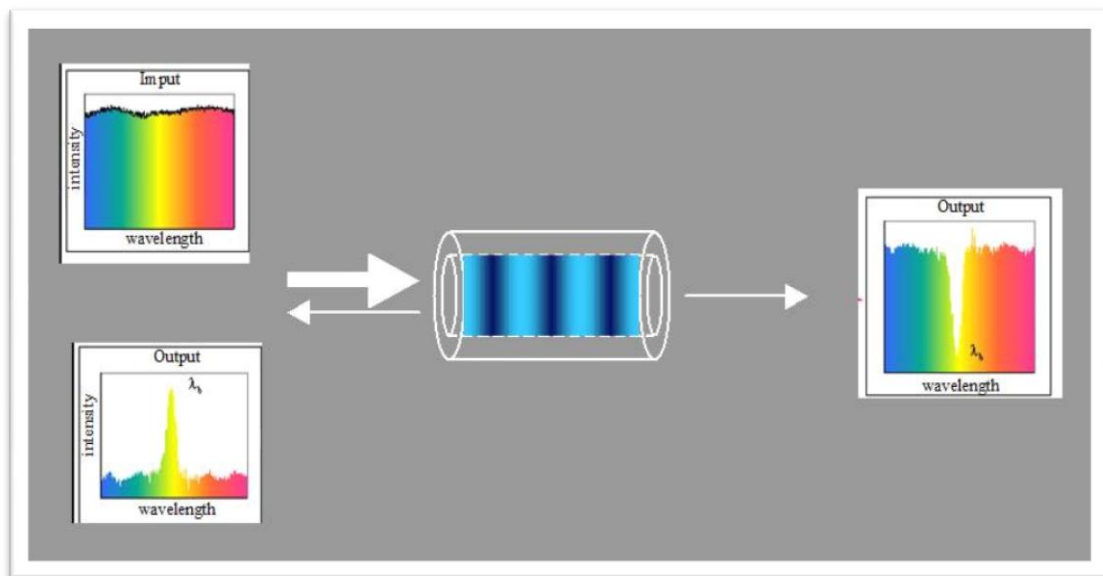


Figura 3.11 : Efecte que se li provoca a la llum al passar per la xarxa de Bragg.  
(Font: WEB de FOS&S)

En una xarxa de Bragg, la longitud d'ona de Bragg ( $\lambda_B$ ) depèn de 2 factors: el període de la pertorbació ( $\Lambda$ ) i del índex de refracció efectiu de la fibra ( $n_{eff}$ ).

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (\text{eq.3.02})$$



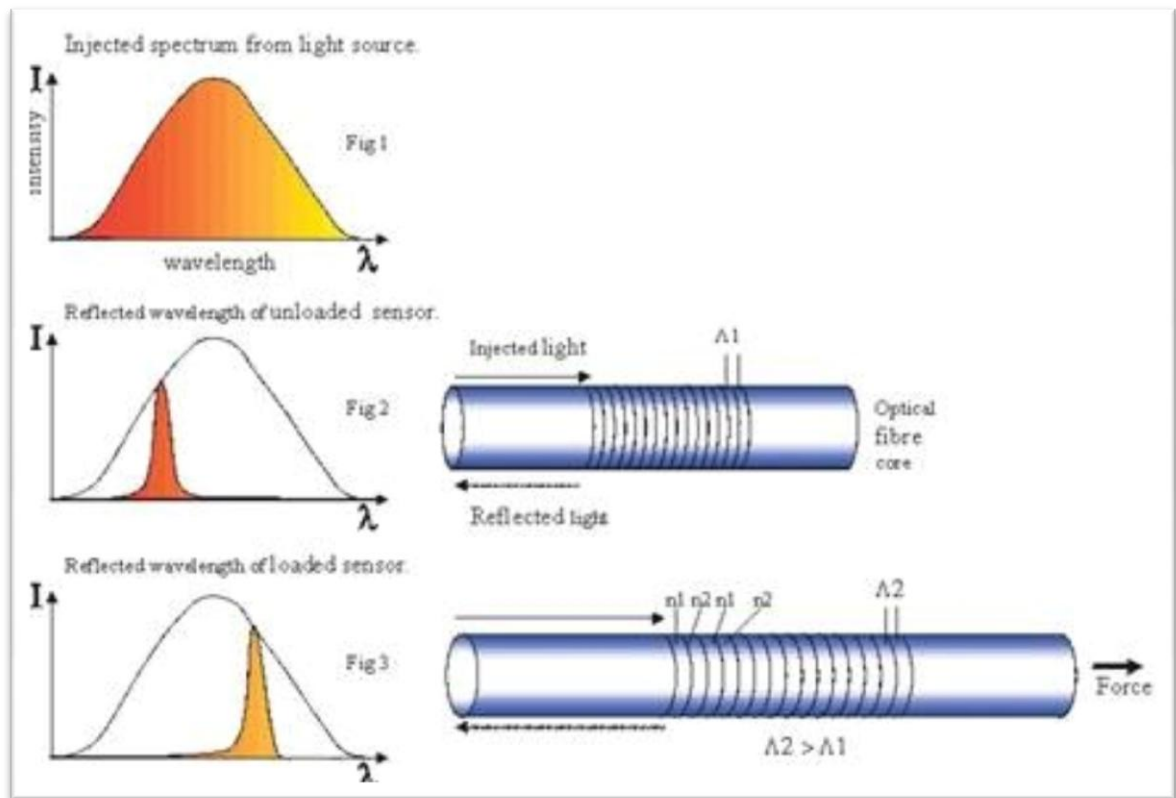


Figura 3.12 : Variació de la longitud d'ona en quant a distorció en un punt de la fibra.  
(Font: WEB de FOS&S)

Tota alteració en algun dels 2 paràmetres de l'equació, modifica l'espectre reflexat. Aquests canvis depenen a la vegada del anomenats esforços laterals ( temperatura, pressió), raó per la qual poden ser utilitzats com a filtre selectiu com a sensors puntuals de deformació, esforç, temperatura i pressió.

En la figura 3.13 s'observa que quan s'aplica una pressió lateral, el perfil circular de la fibra pateix una deformació de geometria el·líptica, provocant el fenomen conegut com a birefringència.

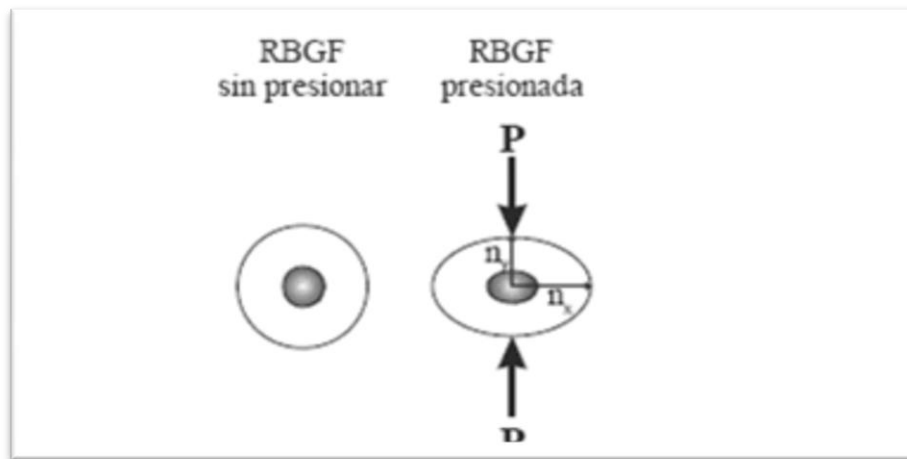


Figura 3.13: Detall del perfil sotmès a un esforç lateral.  
(Font: WEB de Des Tec)

Quan l'eix sobre el que s'hi aplica la pressió es comprimeix ( eix Y) i s'expandeix en la direcció orthogonal ( eix X). En la direcció de compressió augmenta el índex de refracció ( $n_y$ ) mentre que en la direcció d'expansió disminueix ( $n_x$ ). D'aquesta forma s'indueix a una birefringència o doble refracció. En conseqüència la xarxa presenta dos eixos orthogonals amb diferents constant de propagació.

Els sensors FBG poden tenir diferents xarxes de Bragg, (Gratings) al llarg de la longitud de la fibra. Amb un únic cable es poden obtenir dades de punts separats per llargues distancies. Aquest és un dels motius pels quals els sensors FBG són preferiblement utilitzats en aplicacions d'enginyeria civil, i han estat aplicats en grans obres on es requereix una monitorització distribuïda en múltiples punts.

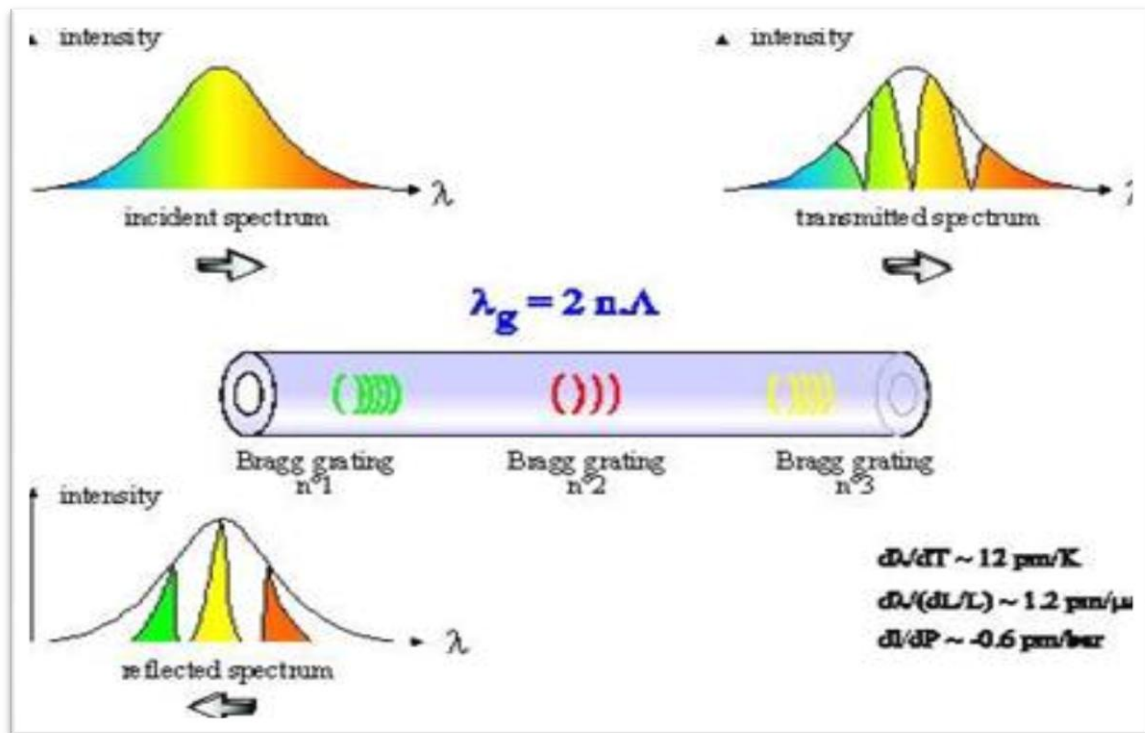


Figura 3.13: Visualització de diferents paràmetres alternats en diferents sensors.  
 (Font: WEB de FOS&S)

La longitud d'ona de la màxima reflectivitat, es pot desplaçar degut a variacions de temperatura o sota l'influència de tensions aplicades en la regió a on es troba la FBG. Aquest desplaçament ve determinat per la variació de la separació espacial de les pertorbacions en l'índex de refracció. Tenint únicament en compte els efectes termomecànics, la variació de longitud d'ona en funció de l'increment de la temperatura i de la tensió axial en la xarxa de difracció de Bragg es pot expressar mitjançant la següent equació:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + \lambda_B \xi_0 \Delta T \quad (\text{eq.3.03})$$

On:

$\Delta\lambda_B$	: Variació de la longitud d'ona	$\lambda_B$	Longitud d'ona referència
$K_\epsilon$	: Sensibilitat a la deformació	$\xi_0$	Coefficient sensibilitat tèrmica
$\epsilon$	: Deformació unitària	$\Delta T$	Gradient de temperatura

De l'equació anterior, es dedueix que la variació de longitud d'ona reflexada per la xarxa de Bragg ve determinada per deformacions i variacions tèrmiques de l'estructura. Per això, s'ha de garantir una correcta transmissió de les deformacions entre la FBG i la superfície que es pretén monitoritzar.

Un gran avantatge dels sensors Bragg és que proporcionen valors absoluts de deformació que, a més, no varien amb el temps, segons els coneixements que es tenen actualment. El que sí que pot variar són les propietats del material hoste i el camp de forces residuals el voltant del sensor. El fet que els sensors FBG mesuren valors absoluts suposa un gran avantatge respecte als sensors elèctrics, com els extensòmetres òhmics, que han de ser calibrats i balancejats al menys un cop abans de cada ús.

### **3.3.4.- Aplicacions industrials**

**Monitorització d'estructures civils:** Ponts, preses, autopistes, túnels. *Variables importants com:* deformació, desplaçament, pressió, temperatura i vibració de bigues, pilars, murs de contenció i altres elements estructurals. El requeriment més important que ha de complir és l'estabilitat a llarg termini de les dades de sortida del sistema.

**Monitorització de pous de petroli:** Ubicats tant en terra com al fons de l'oceà. *Variables importants com:* temperatura, pressió i fluid.

**Monitorització de gasoductes de transport:** una de les estructures més crítiques en el món, pel fet que la majoria es troben en llocs de difícil accés i exigeixen d'una monitorització estricta per prevenir catàstrofes ecològiques. La monitorització en temps real dels sensors FBG ajuda a disminuir el temps i les despeses de reparació degut a que permeten conèixer l'ubicació exacta del dany. *Variables importants com :* deformació i temperatura.

## **4.- DISPOSITIUS. MERCAT DELS SENSORS DE FIBRA ÒPTICA. CLASSIFICACIÓ I APLICACIÓ.**

L'objectiu principal d'aquest capítol és mostrar informació relativa als sensors basats en mesurar temperatures i tensions . Es complementa tota l' informació donada a continuació amb l' inclusió de taules comparatives i empreses que fabriquen sensors de mesura [16].

### **4.1.- Sensors de temperatura**

Dins del mercat dels sensors de fibra òptica, els sensors de temperatura són els més desenvolupats. És a on es pot trobar una major varietat de sensors, un major nombre d'empreses fabricants i tecnologia que fan possible tots aquests sensors. Podem trobar sensors de temperatura puntuals, casi distribuïts i distribuïts.

#### **4.1.1.- Sensors puntuals**

##### **.- Fiber Bragg Grating ( FBG)**

S'ha estudiat en la part descriptiva que els sensors basats en la tecnologia FBG són sense cap mena de dubtes els que millors prestacions ens garanteixen en quan a mesures de tèrmiques. Això és degut a que són de les més desenvolupades - el que permet fabricar sensors a preus competitiu -i perquè permet mesures tant puntuals com casi-distribuïdes.

A continuació es pot observar en la taula 4.1 la diversa oferta de sensors basats en aquesta tecnologia.

	<b>Rango</b>	<b>Resolució</b>	<b>Precisió</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Fabricante</b>
<i>Temp Chain TC-01</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	0.2°C	Modificable	Cuasi-distribuido Modificable	FOS&S
<i>Temp Chain TC-02</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	0.2°C	15 cm	Cuasi-distribuido Modificable Configuraciones en serie	FOS&S
<i>Temp Probe TP-01</i>	-45°C a 500°C	0.1°C	0.2°C	60 cm (modificable)	-	FOS&S
<i>Temp Probe TP-02</i>	-20°C a 80°C (aumentable)	0.05°C	0.1°C	11 cm	Configuraciones sencillas o en serie	FOS&S
<i>Probe TC-probe</i>	-20°C a 110°C (aumentable)	0.1°C	0.2°C	58 mm	Combinable con sensor de strain	FOS&S
<i>Sensor os 4100</i>	-40°C a 120°C (aumentable)	0.75°C	0.75°C	36.51 x 7.94 mm	Combinable con sensor de strain	Microm Optics
<i>Sensor os 4200</i>	-40°C a 120°C (aumentable)	1°C a 0.2°C	1°C a 0.2°C	Según el encapsulado	Diferentes encapsulados	Microm Optics
<i>Sensor os 4300</i>	-40°C a 120°C -40°C a 250°C (1er modelo)	1°C a 0.2°C	1°C a 0.2°C	Según el encapsulado	Diferentes encapsulados	Microm Optics
<i>Sensor os 4400</i>	-40°C a 100°C	1°C ó 0.6°C	1°C ó 0.6°C	Modificable	Cuasi-distribuido Modificable	Microm Optics
<i>FS6300</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	±0.5°C	Según el modelo	Sensibilidad: 10 pm/°C	FiberSensing
<i>FS6300 HIGH</i>	-50°C a 200°C	0.1°C	±0.5°C	65 mm	Sensibilidad: 10 pm/°C	FiberSensing
<i>AOS temp</i>	-30°C a 80°C (modificable)	1°C	0.5°C	Entre 30 mm y 50 mm	Completamente modificable	AOS GmbH
<i>SmartFBG</i>	-170°C a 85°C (acrilato) -170°C a 300°C (Poliamida)	0.05°C	-	Según el modelo	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartPatch</i>	0°C a 30°C (modificable)	0.05°C	-	6 mm	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartWeld</i>	-170°C a 150°C	0.05°C	-	3 mm	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>Downhole</i>	-20°C a 150°C	0.001°C	0.1°C	según modelo	Sensor de presión	SMART FIBRES

<i>Bottomhole</i>	-20°C a 150°C	0.001°C	0.1°C	61 x 54 x 18 mm	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>SmartPort</i>	-20°C a 200°C	-	0.1°C	¾ x 9 in	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>LP SmartPort</i>	-20°C a 150°C	-	0.1°C	¾OD x 9 in	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>SmartTape</i>	-20°C a 50°C	0.05°C	-	6 mm	Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartTemp</i>	-170°C a 85°C	-	-	según el modelo	Diferentes encapsulados	SMART FIBRES
<i>MUST TEMP</i>	-120°C a 80°C	±0.1°C	±0.5°C	según el modelo	3 diferentes encapsulados	smartec
<i>Temperature FBG</i>	-20°C a 85°C	0.1°C	1°C	según el modelo	2 diferentes encapsulados	Welltech instrument
<i>SPT-70</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	-	100 x Ø 6 mm	-	IFOS
<i>OETMS-100</i>	-50°C a 120°C	0.1°C o 0.05°C	±0.5°C o ±0.25°C	10 x 25 x 6 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-200</i>	-50°C a 120°C	0.1°C	±0.3°C	10 x 40 x 6.5 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-400</i>	-50°C a 400°C	0.5°C	±1.0°C	90 x Ø 3 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-700</i>	-50°C a 700°C	1.0°C	±2.0°C	90 x Ø 3 mm	-	O/E LAND
<i>OBTS-50</i>	-30°C a 50°C	< 0.05°C	±0.5°C	120 x 20 mm	Permite conexiones en serie	SCAIME

Taula 4.1 : Comparativa de sensors de temperatura.  
 (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

En el mercat hi han algunes empreses importants, que tot i no tenir un catàleg de sensors comercial, ofereixen la possibilitat de fabricar-los a mida. Per els sensors FBG aquí es mostren algunes de les que ofereixen servei:

- Blue Road Research
- Broptics
- ITF Labs
- Ixfiber
- OFS

## **.- Interferometria Fabry-Perot**

Las tècniques d'interferometria Fabry-Perot donen lloc a una ampla varietat de sensors. Dins d'aquesta tecnologia destaquen FISO i opSens. Els sensors d'opSens utilitzen interferometria de baixa coherència però el seu fonament sensor és el d'un Fabry-Perot . A la taula 4.2 es mostren les característiques tècniques d'aquests tipus de sensors.

	Rango	Resolució	Precisió	T. respuesta	Observaciones	Fabricante
<i>FOT-L</i>	-40°C a 300°C	0.1°C	±1°C	≤ 1.5 ms	-	FISO
<i>FOT-L-BA</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	≤ 0.5 ms	-	FISO
<i>FOT-M</i>	-20°C a 85°C	0.1°C	±0.3°C	< 750 ms	Aplicaciones médicas	FISO
<i>RJC- TEMP</i>	15°C a 55°C	0.02°C	±0.1°C	2 ms	-	RJC enterprises
<i>OTP-A</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	1.5 ms	-	opSens
<i>OTP-M</i>	0°C a 85°C	0.01°C	±0.15°C	< 1. s	Aplicaciones médicas	opSens
<i>OTP-P</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	-	Muy robusto	opSens
<i>OPP-W</i>	-40°C a 300°C	0.1°C	±1.5°C	-	Mide presión	opSens

Taula 4.2: Comparativa de sensors basats en interferometria.

(Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

### **4.1.2.- Sensors de mesures distribuïdes.**

#### **.- Sensors Fiber Brag Grating**

Es tracta d'una solució particular creada per l'empresa LUNA Technologies, per el que únicament existeix un sensor en el mercat. Aquest sensor permet monitoritzar temperatura i la deformació unitària de forma distribuïda



---

	<b>Rango</b>	<b>Resolució</b>	<b>Resolució espacial</b>	<b>Longitud</b>
<b>Temperatura</b>	-50°C a 300°C	±0.1°C	1.0 cm	70 m
<b>Strain</b>	± 7000 µε	±1 µε		

Taula 4.3: Característiques del sensor DSS 4300.

(Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

### **.- Scattering de Brillouin**

Aquesta tecnologia ofereix una solució òptima per la monitorització de la temperatura de forma distribuïda ja que amb ella també es possible la monitorització de deformacions. Per això es una tecnologia molt utilitzada en petroleres, entre altres.

Encara que les empreses brinden en els seus clients una bona cobertura de serveis, el fet de no disposar d'un catàleg amb les solucions de cada cas, representa un punt important a tenir en compte.

És molt comú en els sistemes distribuïts que algunes empreses ofereixin el sistema, el sensor i l'instal·lació ajustat a les necessitats del client, sense que anunciïn els seus propis sensors detalladament. Aquestes són algunes de les empreses que ofereixen sistemes de monitorització per Scattering de Brillouin. A la taula 4.4 es mostren els diferents sensors que ofereixen així com les característiques tècniques més importants.

Empreses principals:

- QOREX
- SILIXA

	Rango	Resolució	Res espacial	Longitud	Canales	Observaciones	Fabricante
<i>DSTA-R</i>	-273°C a 700°C	0.1°C	0.1 m	50 km	2	Monitoriza strain	Omnisens
<i>DTS</i>	-273°C a 700°C	0.11 a 3.5 K	<0.9 m // 1.5 m (12km)	2, 4, 8 o 12 km	1, 2, o 4	4 modelos: 2, 4, 8 y 12 km	FOS&S
<i>DTSS</i>	Limitado por la fibra	0.1°C	1 m	24 km	-	Monitoriza strain	sensornet
<i>B-DTS</i>	-270°C a 2000°C	0.005°C	Según modelo	100 km	1 o 2	-	OZoptics
<i>OZ-DTSS</i>	-270°C a 800°C	0.005°C	Según modelo	50 km o 100 km	1 o 2	Monitoriza strain	OZoptics
<i>NBX-6000</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C	NEUBREX
<i>NBX-6000(PM)</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C Mantiene la polarización	NEUBREX
<i>NBX-6010</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain y presión Precisión: ±0.6°C	NEUBREX
<i>NBX-6020</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 2 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C	NEUBREX
<i>NBX-6030</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±0.6°C	NEUBREX
<i>NBX-6040</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±0.35°C	NEUBREX
<i>FOSTA</i>	-	0.5°C	≥ 1 m	10 km (DTSS- LR) 30 km (DTSS- XR)	-	Monitoriza strain	FOSTA

Taula 4.4 : Oferta dels sensors d' scattering de Brillouin. (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

### .-Scattering Rayleigh

Els basats en l' Scattering de Rayleigh, tenen idèntiques prestacions que els Brillouin però són menys usats. Al igual que els Brillouin, les empreses ofereixen el sistema, el sensor i l' instal·lació de forma personalitzada, però sense que anunciïn els seus propis sensors detalladament. Notar el fet que únicament existeix un sol sensor d'aquest tipus en el mercat. El sensor trobat ha estat fabricat per l'empresa LUNA Technologies.

---

	<b>Rango</b>	<b>Resolució</b>	<b>Precisió</b>	<b>Resolució espacial</b>	<b>Longitud</b>
<b>Temperatura</b>	0°C a 300°C (augmentable)	±0.1°C	±0.2°C	±1.0 cm	70 m
<b>Strain</b>	2 %	±1 µε	±1 µε		

Taula 4.5: Característiques del sensor OBR 4600.

(Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

Les principals empreses que ofereixen sistemes de monitorització per Scattering de Rayleigh són:

- FOtech solutions
- QinetiQ
- QOREX
- SILIXA

#### **.- Scattering de Raman**

Aquesta és la tecnologia de sensors de fibra òptica distribuïts amb major nombre de sensors i de més importància en el mercat. Això es deu a la seva ampla utilització com a sistema de seguretat contra incendi en els túnels de carreteres i autopistes. Ofereixen una solució òptima per la monitorització de temperatura. Les empreses més importants que ofereixen sistemes de monitorització per Scattering de Raman són:

- QOREX
- Sensa
- SILIXA

A la taula 4.6 de la següent pàgina, es mostra una comparativa dels diferents sensors amb les seves característiques principals.

	Rango	Resolució	Res espacial	Res muestreo	Longitud	Canales	Observaciones	Fabricante
<i>HALO DTS</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	-	2 m	4 km	2 o 4	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-SR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	5 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-MR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	8 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-LR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	10 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-XR</i>	Limitado por la fibra	< 0.05°C	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	30 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-XR SM</i>	Limitado por la fibra	< 0.05°C	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	30 km	-	Utiliza fibra monomodo	sensornet
<i>ORIX DTS</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	-	-	5 km	-	Aplicaciones externas Aplicaciones remotas	sensornet
<i>FibroLaser II</i>	Limitado por la fibra	± 0.1°C	0.5 m	-	4 km	10 o 20	Mundialmente conocido	SIEMENS
<i>LTS 200</i>	-5°C a 40°C	-	-	1 m	2 km por canal	1 o 2	Protección de incendios	Sensa
<i>LTS 240</i>	-5°C a 40°C	-	-	1 m	4 km por canal	1 o 2	Protección de incendios	Sensa
<i>ASTRA 5K</i>	Limitado por la fibra	< 0.07°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>ASTRA 10K</i>	Limitado por la fibra	< 0.11°C	1 m	0.5 m	10 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>ASTRA 15K</i>	Limitado por la fibra	< 0.6°C	1 m	0.5 m	15 km	1 a 16	Precisión: ±2°C	sensortran
<i>GEMINI HSI</i>	Limitado por la fibra	< 0.07°C	1 m	0.25 m	10 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>GEMINI HT</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±2°C	sensortran
<i>CENTAURUS</i>	Limitado por la fibra	< 0.2°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±3°C	sensortran
<i>HydroLight</i>	0 a 300°C	0.1°C	1 m	-	5 km	-	Precisión: 0.8°C	QOREX
<i>Extreme Duty DTS</i>	0 a 700°C	0.1°C	1 m	-	5 km	4	Precisión: 5°C	QOREX

<i>DTS Acoustic</i> +	0 a 300°C	0.1°C	1 m	-	5 km (temp) 2 km (acoustic)	-	Tecn Rayleigh Eventos acústicos	QOREX
<i>DITEMP LIGHT</i>	Según la fibra	0.5°C	2 m	2 m	km (DL2) 4 km (DL4)	2 o 4	-	smartec

Taula 4.6 : Característiques dels principals sensors basats en scattering de Raman.  
 (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

Les empreses més importants que ofereixen sistemes de monitorització per Scattering de Raman són les següents:

- QOREX
- Sensa
- SILIXA

## 4.2.- Sensors de Strain.

### 4.2.1.- Sensors per mesures puntuals.

#### .- Fiber gratting bragg

La temperatura i les deformacions són les dos variables en que es basen els sensors FBG de fibra òptica. Concretament gràcies als dissenys que modifiquen la deformació és possible crear no només sensors de deformació, sinó també de pressió, desplaçament, carga e inclinació. Degut a que és la variació de la deformació que permet crear aquests sensors, s'han agrupat tots com a sensors de tipus Strain (deformació). A la següent taula 4.7, s'observa una comparativa de sensors.

	Rango	Resolució	Precisió	Dimensiones	Observaciones	Fabricante
<i>Strain Gage SG-01</i>	1% (long term) 5% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	28 mm 8 mm longitud activa	Sensor de vibración	FOS&S
<i>Strain Gage SGC-01</i>	1% (long term) 5% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	28 mm 8 mm longitud activa	Sensor vibración	FOS&S
<i>ASC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.5m - 5m (long)	Montaje en serie Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	1 m a 5 m (modificable)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-02</i>	25 mm 50 mm	< 8 $\mu\text{m}$	< 16 $\mu\text{m}$	50 cm (SC-02-50) 100 cm (SC-02-100)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-03</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.2 m a 1 m (modificable)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor MS-01</i>	200	< 0.04 $\mu\text{m}$	< 0.08 $\mu\text{m}$	70 mm a 100 mm	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor ES-01</i>	$\pm 560 \mu\epsilon$	0.25 $\mu\epsilon$	0.5 $\mu\epsilon$	134 mm	-	FOS&S
<i>BDS-01</i>	1% FD	0.85 $\mu\epsilon$ FD	1.7 $\mu\epsilon$ FD	$\leq 20$ m	$\varnothing$ pozo: 86 mm Nº galgas: $\leq 5$	FOS&S
<i>Geodetec</i>	1% (long term) 3% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	Modificable	Sensor de deformación de suelo	FOS&S
<i>Displacement D-01</i>	20/50/80 mm	1 %	1 %	-	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor ES-02</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	1 m a 5 m (modificable)	-	FOS&S
<i>os 3100</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	22 mm	Sensibilidad: 1.4 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics
<i>os 3150</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	75 mm	Sensibilidad: 1.4 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics
<i>os 3155</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	50 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ Compensa temperatura	Microm Optics
<i>os 3200</i>	$\pm 5000 \mu\epsilon$	-	-	10 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics

<i>os 3600</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	0.5%	25.4, 100 o 150 cm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ Compensa temperatura	Microm Optics
<i>MSS-1700</i>	5000 $\mu\epsilon$	-	-	145 x 30x 20 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$	FIBERPRO
<i>FS6200</i>	$\pm 4000 \mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$	$\pm 2 \mu\epsilon$	Según el modelo	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$	FiberSensing
<i>FS6200 Athermal</i>	3000 $\mu\epsilon$	0.3 $\mu\epsilon$	$\pm 2 \mu\epsilon$	Según el modelo	Sensibilidad: 3.9 ó 1.49 pm/ $\mu\epsilon$ Compensa temperatura	FiberSensing
<i>AOS strain</i>	-	-	-	-	Fabricable a medida Limite de Strain: $\pm 1\%$ (20 m $\epsilon$ )	AOSGmbH
<i>AOS vibración</i>	-	5 a 0.05 $\mu\text{m}/\text{m}$	-	1 m	Sensor de vibración Limite de Strain: 10000 * Resolución	AOSGmbH
<i>AOS Embeddable</i>	-	2.7 a 0.2 $\mu\text{m}/\text{m}$	-	150 a 200 mm	Limite de Strain: 10000 * Resolución	AOSGmbH
<i>AOS Displacement</i>	0 a 3.5 mm	0.01 %	0.3 %	130 x 50 x 40 mm	-	AOSGmbH
<i>SmartFBG</i>	$\pm 9000 \mu\epsilon$	0.4 $\mu\epsilon$	-	Según el modelo	Sensibilidad: 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartPatch</i>	$\pm 5000 \mu\epsilon$ (modificable)	0.4 $\mu\epsilon$	-	6 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartWeld</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	0.4 $\mu\epsilon$	-	3 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartBridge</i>	10 mm	$\leq 0.05\% \text{FS}$	$\leq 0.5\% \text{FS}$	150 x 90 x 35 mm	Sensor de desplazamiento	SMART FIBRES
<i>SmartBar</i>	$\pm 1500 \mu\epsilon$	0.4 $\mu\epsilon$	-	A medida	Posibilidad de compensación de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartTape</i>	$\pm 9000 \mu\epsilon$	0.4 $\mu\epsilon$	-	6 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SHM FOSTA</i>	$\pm 2000 \mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$ 0.2 $\mu\epsilon$ (Premium)	-	-	Salud de estructuras cuasi-distribuido	FOSTA

<i>MUST STRAIN</i>	$\pm 2000 \mu\epsilon$	$\pm 1 \mu\epsilon$	$\pm 2 \mu\epsilon$	Según el modelo	3 diferentes encapsulados	smartec
<i>SMARTPROFILE</i>	-0.5 % a 1 %;	$2 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	680 x 7.8 x 2.9 mm	Sensor de temperatura opcional	smartec
<i>DEFOR SENSOR</i>	-0.5 % a 0.75 %;	$2 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	680 x 7.8 x 2.9 mm	Sensor de temperatura opcional	smartec
<i>BARE FBG</i>	-1500 $\mu\epsilon$ a 3000 $\mu\epsilon$	-	-	10 mm (estándar)	Diferentes cubiertas	Welltech instrument
<i>Weldable FBG</i>	$\pm 3000 \mu\epsilon$	$1 \mu\epsilon$	-	65 x 35 mm	Sensor de temperatura opcional	Welltech instrument
<i>Embedded FBG</i>	$\pm 3000 \mu\epsilon$	$1 \mu\epsilon$	-	60 x 35 mm o 100 x 35 mm	Integrable en hormigón Sensor de temperatura opcional	Welltech instrument
<i>Displacement FBG</i>	100 mm o 250 mm	-	0.1 mm;	-	Sensor de desplazamiento	Welltech instrument
<i>DPS -200</i>	0 a 200 mm	1 pm	-	500 x $\phi$ 47 mm	Sensor de desplazamiento	IFOS
<i>SPS-50</i>	$\pm 2000 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	-	20 x 100 x 10 mm	-	IFOS
<i>OEFDS-100</i>	5 mm a 50 mm	$\leq 0.1 \%$	$\leq 1 \%$	90x 130 mm	Sensor de desplazamiento	O/E LAND
<i>OESTS</i>	$\pm 1000 \mu\epsilon$ $\pm 5000 \mu\epsilon$ (SEN-500)	$1 \mu\epsilon$	-	Según el modelo	Sensores strain O/E LAND	O/E LAND
<i>OBSG-120</i>	$\pm 5000 \mu\text{m/m}$	$< 1 \mu\text{m/m}$	$\pm 10 \mu\text{m/m}$	120 x 20 mm	Permite conexiones en serie	SCAIME

Taula 4.7: Comparativa de sensors FBG.  
 (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

Tot seguit, a la taula 4.8 es mostren sensors FBG que mesuren altres variables com pot esser la pressió, l' inclinació o la carga. Totes aquestes variables es basen en els sensors FBG Strain. No obstant això, només es desenvolupen aquí, per què el número de sensors d'aquest tipus de mercat és molt reduït.



	<b>Tipo</b>	<b>Rango</b>	<b>Resolución</b>	<b>Precisión</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Fabricante</b>
<i>Pressure Sensor P-01</i>	Presión	1-150 bar	$\leq 0.125\%$	$\leq 0.25\%$	Incluye compensación de temperatura	FOS&S
<i>SmartCell</i>	Presión	10, 20 o 100 bar modificable: 2 a 700 bar	0.01 a 0.002 %FS	$< 0.25\%$ FS a $< 0.1\%$ FS	Sensibilidad: 450 a 3000 pm/FS	SMART FIBRES
<i>Downhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Bottomhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 1000 bar	0.01 % FS	$< 0.1\%$ FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>LP SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.01 % FS	$< 0.1\%$ FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Pressure FBG</i>	Presión	0.35 a 10 Mpa	0.05 % FS	0.3 % FS	Mide nivel de agua Diferentes rangos	Welltech instrument
<i>WPS-30</i>	Presión	-50 kpa a 300 kpa	0.01 % FS	-	Mide nivel de agua	IFOS
<i>OEFPS-100</i>	Presión	1 MPb a 50 MPb	$\leq 0.01\%$ FS	$\leq 1\%$ FS	Sensor de temperatura integrable	O/E LAND
<i>Load Cell LC-01</i>	Carga	1-150 bar	$\leq 0.125\%$	$\leq 0.25\%$	Incluye compensación de temperatura	FOS&S
<i>FS6400</i>	Inclinación	6 deg o 10 deg	0.002 deg	$\pm 0.01$ deg	Sensibilidad: 450 pm/deg Incluye compensación de temperatura	FiberSensing
<i>M-A TILTMETER</i>	Inclinación	$\pm 3$ deg	0.001 deg	$\pm 0.01$ deg	Sensibilidad: 450 pm/deg Incluye compensación de temperatura	smartec
<i>Tilt FBG</i>	Inclinación	$\pm 3$ deg	-	0.3 % F.S.	-	Welltech instrument
<i>IPS-30</i>	Inclinación	$\pm 3$ deg	-	0.005 deg	Compensa temperatura	IFOS
<i>Level Meter</i>	Nivel	250 mm	0.1 mm	0.2 mm	Sirve para vasos comunicantes	smartec

Taula 4.8: Comparativa de sensors que mesuren altres variables.

(Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

Empreses que ofereixen servei sobre sensors FBG:

- BLUE ROAD RESEARCH
- Broptics
- ITF Labs
- IXFIBER
- OFS

### .- Interferometria Fabry-Perot

Las tècniques d'interferometria Fabry-Perot donen lloc a una ampla varietat de sensors. Dins d'aquesta tecnologia destaquen FISO i opSens. Els sensors d'opSens utilitzen interferometria de baixa coherència però el seu fonament sensor és el d'un Fabry-Perot .

Seguidament s'observa en la taula 4.9 la comparativa dels respectius sensors que podem trobar al mercat.

	Rango	Resolució	Sens transversa	Interferómetro	Observaciones	Fabricante
<i>FOS-N</i>	±1000 με, ±2500 με, ±5000 με	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	-	FISO
<i>SFO-W</i>	±1000 με, ±1500 με, ±2000 με	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	Soldable	FISO
<i>EFO</i>	±1000 με, ±1500 με, ±2000 με, ±3000 με	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	Integrable en hormigón	FISO
<i>OSP-A</i>	±1000 με / ±2500 με / ±5000 με	0.15 με / 0.3 με / 0.5 με		WLPI	Tamaño minúsculo	opSens

Taula 4.9 : Comparativa sensors interferometrics.  
 (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

#### 4.2.2.- Sensors de mesures distribuïdes.

##### .- Fiber Bragg Grating.

Es tracta d'una solució particular creada per l'empresa LUNA Technologies existint únicament un únic sensor en el mercat. El seu funcionament està explicat en el apartat anterior. Aquest sensor permet monitoritzar temperatures i strain de forma distribuïda

	Rango	Resolució	Resolució espacial	Longitud
Temperatura	-50°C a 300°C	±0.1°C	1.0 cm	70 m
Strain	± 7000 µε	±1 µε		

Taula 4.10: Característiques del sensor DSS. (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

##### .- Scattering de Brillouin.

Aquesta tecnologia (figura 4.1) ofereix una solució òptima, per la monitorització de strain de forma distribuïda, ja que amb ella també es possible la monitorització de la temperatura. Es per això que és una tecnologia ideal per utilitzar-se en la indústria petrolera entre altres. Una altre de les avantatges que ofereix Brillouin és la possibilitat d'utilitzar fibra monomode estàndard de telecomunicacions per realitzar la monitorització.



Figura 4.1 : Sistema de mesura basat en l' scattering de Brillouin.

(Font: Glisic.B, Inaudi.D, 2007)

Un dels avantatges que suposa per molts clients, sobretot els menys experimentats, és que gran part de les empreses garanteixen com a servei l' instal.lació d'aquest. També és habitual que realitzin l'instrumentació personalitzada del producte segons les necessitats particulars de cada client.

Però, tot i el fet que empreses ofereixen servei, no tenen un catàleg comercial amb les seves solucions. És molt comú en els sistemes distribuïts que algunes empreses ofereixin el sistema, el sensor i l' instal.lació d'acord amb les exigències del client, sense anunciar els seus sensors detalladament.

Aquestes són algunes de les empreses que ofereixen sistemes de monitorització per scattering de Brillouin ( mirar taula comparativa 4.11 )

- QOREX
- SILIXA

	Rango	Resolució	Res espacial	Longitud	Canals	Observaciones	Fabricante
DSTA-R	$\pm 3\%$	2 $\mu\text{e}$	0.1 m	50 km	2	Monitoriza temperatura	Omnisens
D-Light	$\leq 0.5\%$ a 2 %	-	0.5 m	10 km	2	Incertidumbre: 40 a 80 $\mu\text{m}$	Omnisens
DTSS	limitado por la fibra	20 $\mu\text{e}$	1 m	24 km	-	Monitoriza temperatura Res Presión: 2 psi	sensornet
OZ-DTSS	2 % a 3 %	0.1 $\mu\text{e}$	Según modelo	50 km o 100 km	1 o 2	Monitoriza temperatura	OZoptics
NBX-6000	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 10$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\text{e}$	NEUBREX
NBX-6000(PM)	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 10$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\text{e}$ Mantiene la polarización	NEUBREX
NBX-6010	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 10$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura y presión Precisión: $\pm 15 \mu\text{e}$	NEUBREX
NBX-6020	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 2$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\text{e}$	NEUBREX
NBX-6030	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 10$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 15 \mu\text{e}$	NEUBREX
NBX-6040	-30000 $\mu\text{e}$ a 40000 $\mu\text{e}$	-	$\geq 10$ cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 7.5 \mu\text{e}$	NEUBREX
FOSTA	-	10 $\mu\text{e}$	$\geq 1$ m	10 km (DTSS-LR) 30 km (DTSS-XR)	-	Monitoriza temperatura	FOSTA

Taula 4.11: Comparativa de sensors strain basats en l' scattering Brillouin  
 (Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

## **.- Scattering de Rayleigh.**

La tecnologia basada amb l' scattering de Rayleigh també ofereix molt bones garanties. En el cas concret de la monitorització de deformacions unitàries es possible realitzar un seguiment de la temperatura. Tot i que la importància que té en el mercat es inferior a la Brillouin, el seu rang d'aplicacions és força ampli.

Comunament, les empreses que s'enumeren no disposen de catàleg comercial amb les solucions. Tant és així que tan sols s'ha trobat un sensor d'aquest tipus en el mercat. A continuació es mostren les característiques principals de dit sensor fabricat per LUNA Technologies.

	Rango	Resolució	Precisió	Resolució espacial	Longitud
Temperatura	0°C a 300°C (augmentable)	±0.1°C	±0.2°C	±1.0 cm	70 m
Strain	2 %	±1 µε	±1 µε		

Taula 4.12: *Característiques del sensor OBR 4600*

(Font: Vallinas.A, Benito.D, 2011)

Empreses fabricants:

- FOtech solutions
- OinetiQ
- QOREX
- SILIXA

## 5.- APLICACIONS MÉS REPRESENTATIVES DE MONITORITZACIONS EN ESTRUCTURES CIVILS.

En l'actualitat són varies les estructures s'han monitoritzat per estudiar el seu comportament i obtenir informació en temps real. A mode d'exemple, es recullen les següents aplicacions i investigacions:

### 5.1.- Monitorització dels ponts bessons de Versoix ( Suïssa)

L'estructura inicial del pont es dissenya mitjançant dos bigues paral·leles de formigó post tensat que suporten una llosa de formigó de 30 cm de gruix, més els voladís a ambdós costats de la planta del pont. Per poder incrementar el transit de vehicles es decideix ampliar el pont. S'opta per eixamplar més les bigues i augmentar el seu voladís (figura 5.1).



Figura 5.1: Instantània realitzada durant les tasques de rehabilitació  
(Font: Inaudi.D, Glisic.B, Vurpillot.S, Lloret.S, Kronenberg.P , 1999)

Per estudiar el comportament real de la nova estructura enfront l'antiga, i poder observar l'interacció entre els formigó nou i existent, s'opta per monitoritzar la nova

estructura instal·lant més de 100 sensors de fibra òptica de tipus Bragg Grating (FBG). A la figura 5.2 s'observa la disposició dels sensors al llarg de la secció.

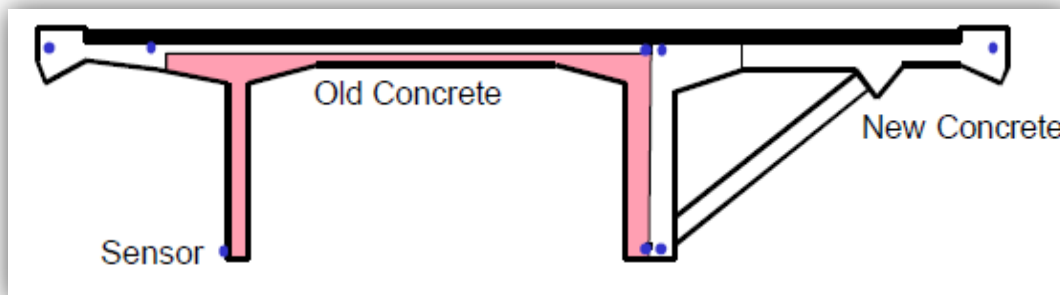


Figura 5.2 : Secció transversal del pont Versoix amb l'ubicació dels sensors.

(Font: Inaudi.D, Glisic.B, Vurpillot.S, Lloret.S, Kronenberg.P , 1999)

Un cop realitzats els corresponents assaigs, els resultats finals de l'instrumentació es van comparar amb els valors teòrics. Tal com mostra la figura 5.3, les dues solucions donaren resultats molt similars entre sí.

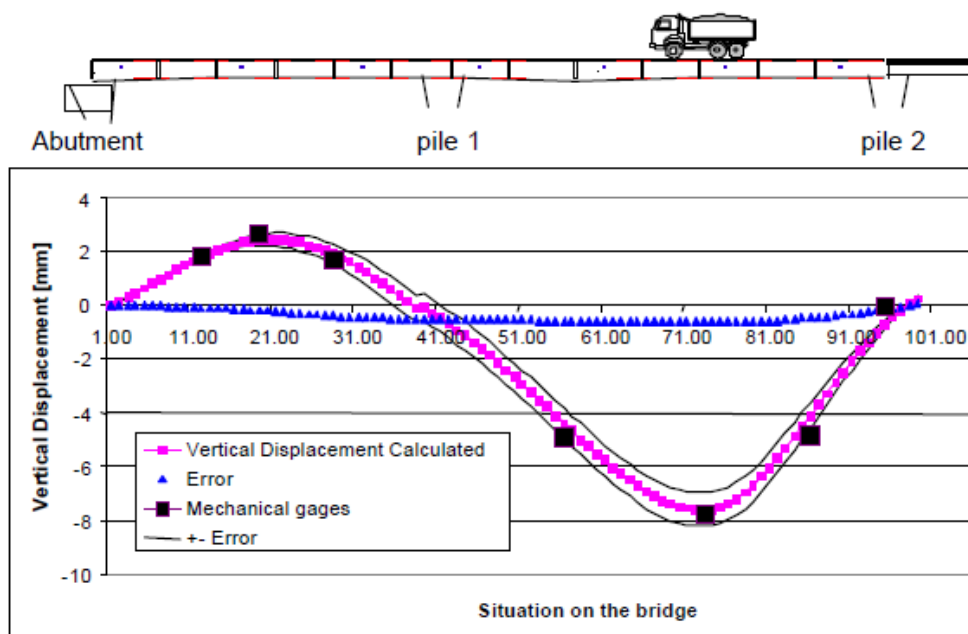


Figura 5.3 : Comparativa entre els valors teòrics i instrumentats sota una carga vertical.

(Font: Inaudi.D, Glisic.B, Vurpillot.S, Lloret.S, Kronenberg.P , 1999)



## 5.2.- Monitorització dels ponts Lutrive ( Suïssa )

Els ponts Lutrive són dos ponts paral·lels per on discorre l'autopista RN9 entre Lausana i Vevey. Van ser construïts l'any 1972 pel mètode de cantilever amb articulacions centrals. Els dos ponts tenen la mateixa secció presenten una inclinació força pronunciada. Cadascun d'ells té aproximadament 395 m de longitud en quatre trams ( figura 5.4).

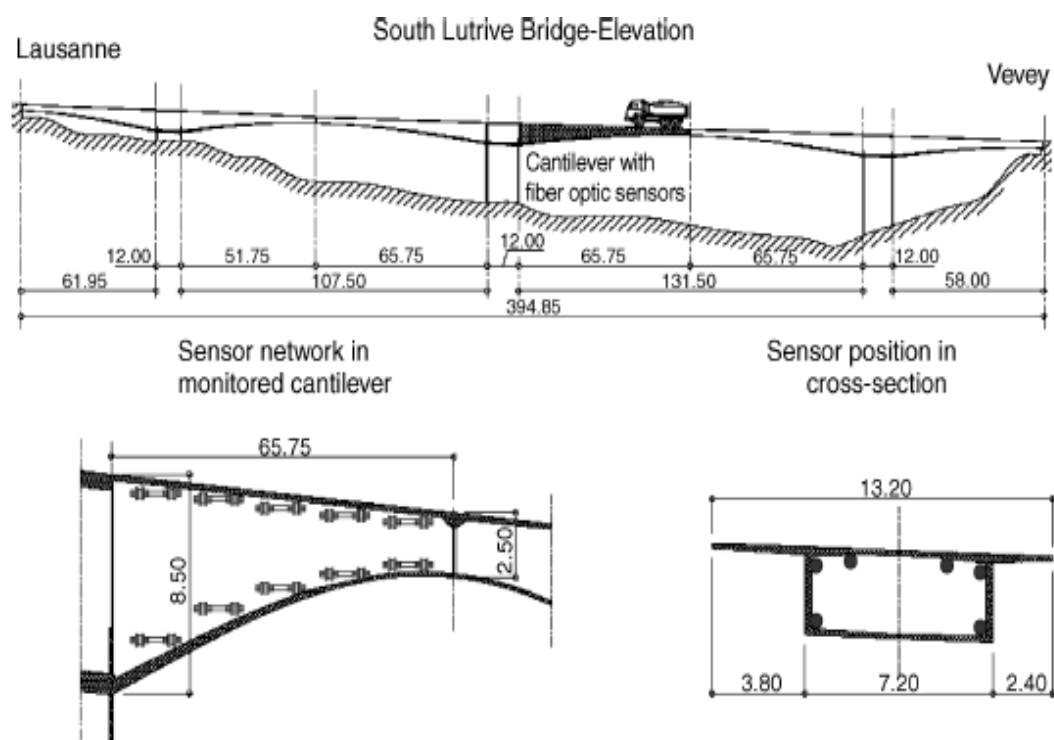


Figura 5.4 : Pont de Lutrive i xarxa de sensors de fibra òptica.

(Font: Glisic.B, Inaudi.D 2007)

La secció del pont està constituïda per un calaix d'altura variable i dos sortints. A l'interior del calaix es van instal·lar 6 sensors de 10m de llarg SOFO per avaluar la variació de curvatura experimentada en un tram del pont. D'aquesta manera, realitzant una doble integració és possible determinar els desplaçaments verticals del pont. Aquests desplaçaments es comparen amb les simulacions del pont sa i s'avalua el seu estat.

Les mesures es van realitzar durant 24 hores. Els resultats finals van donar un error màxim del 6,5% . Aquest resultats es poden considerar satisfactoris tenint en compte la complexitat de l'estructura ( inèrcia variable, curvatura de la biga...).

Es va fer el mateix càlcul amb 3 sensors i un inclinòmetre però la precisió variava lleugerament.

### **5.3.- Monitorització de la Villa Royal de Monza ( Italia)**

La Vila Royal de Monza va ser construïda entre el 1777 i 1779. Després de que el rei fos assassinat el 1900, la vila no fou utilitzada per la família Reial, i va ser pràcticament abandonada durant les últimes dècades del segle XX.

Durant la fase d' informació previa es van dur a abordar els següents treballs:

- Avaluació i seguiment del sistema d'esquerdes al llarg de les voltes de canó del passadís central, en els diferents nivells ( nord i ala sud).
- Avaluació de la degradació severa de diverses estructures de fusta, especialment en el cas de la biga de gelosia de 18 metres de longitud situada el Belvedere.

Els treballs de restauració (figura 5.5) per convertir la vila en un museu van ser complexes. A causa de les incerteses relacionades amb el comportament estructural, es va decidir monitoritzar la vila abans, durant i després dels treballs. Per dur a terme dita tasca es van utilitzar tant sensors convencionals com sensors de fibra òptica.

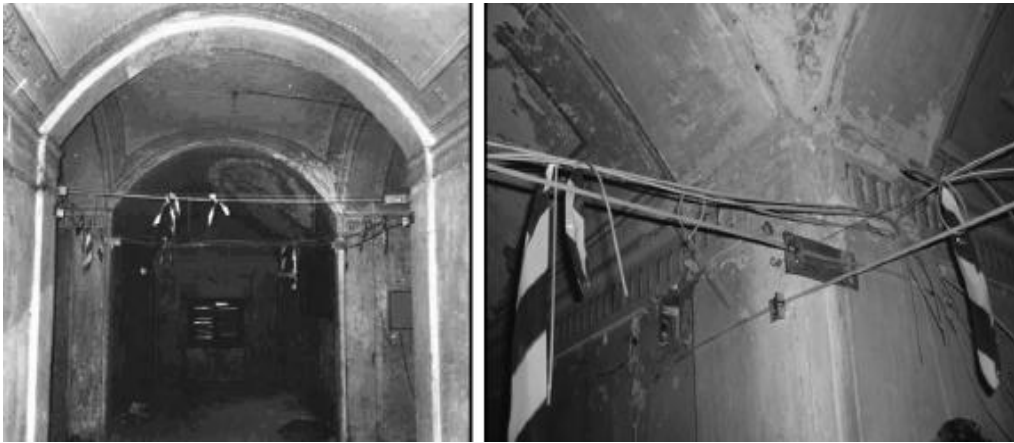


Figura 5.5: Ubicació e instal·lació dels sensors.

(Font: Glisic.B, Inaudi.D 2007)

Els sensors de fibra òptica van ser utilitzats principalment com extensòmetres instal·lats entre les parets, ortogonals al corredor. També sensors més curts de fibra van ser usats per vigilar les esquerdes. A partir de sofisticats models i d'anàlisi de dades realitzats per l' Universitat de Gènova van permetre entre altres coses, calcular l'existència d'una forta correlació entre els desplaçaments i la temperatura.

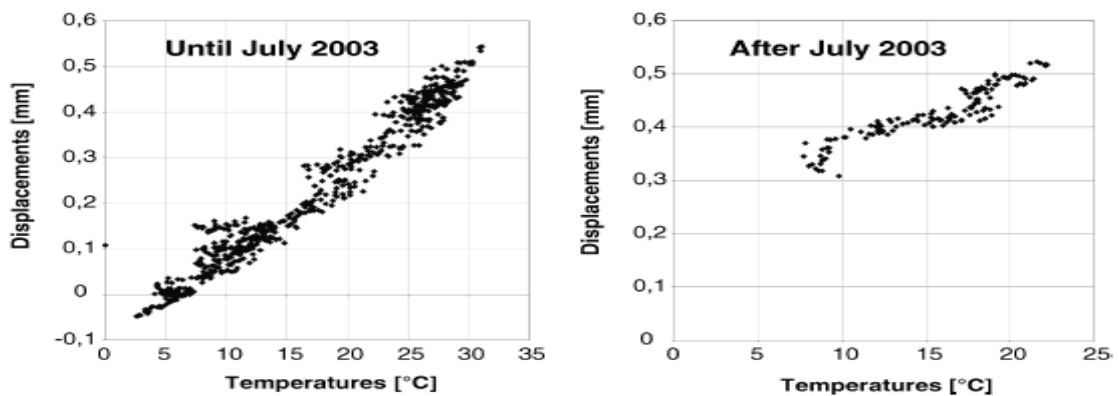


Figura 5.6: Resultats obtinguts durant la monitorització de la Vila Royal

(Font: Glisic.B, Inaudi.D 2007)

## 5.4.- Monitorització del moll San Giorgio Levante.

Aquest moll s'utilitza principalment per la càrrega i descàrrega de carbó. El moll està delimitat per unes parets verticals de formigó. Recentment , per tal d'augmentar l'espai d'atracada, s'ha afegit una nova secció posterior fent que la longitud final del moll sigui d' aproximadament 400 metres. En la següent figura 5.6 es mostra una instantània del moll. La previsió consisteix en passar dels 11 metres actuals als 14 metres, per permetre l'atracada dels grans vaixells.



Figura 5.7 : Vista del moll de San Giorgio Levante.

(Font: Inaudi.D 2000)

El muntatge posterior de la paret (figura 5.8), per evitar l' interrupció de la paret durant el dragatge, es va recolzar l'estructura amb columnes de fins a 18 metres de profunditat, i els blocs es van connectar mitjançant barres d'acer verticals. L'estabilitat també es va millorar amb tendons permanents actius....

Després de l'execució de les obres de consolidació, la paret es va equipar amb un sistema de sensors per tal d'estudiar els moviments estructurals durant un període llarg de temps. El seguiment tenia per missió detectar desviacions anormals del comportament de l'estructura que poguessin indicar un estat de dany en l'estructura.

L' instrumentació del mur del moll va ser equipat amb 72 sensors SOFO ( 67 d'ells, treballant de forma continua), instal·lats de manera que tingues 3 sensors per a cada secció de mesura.

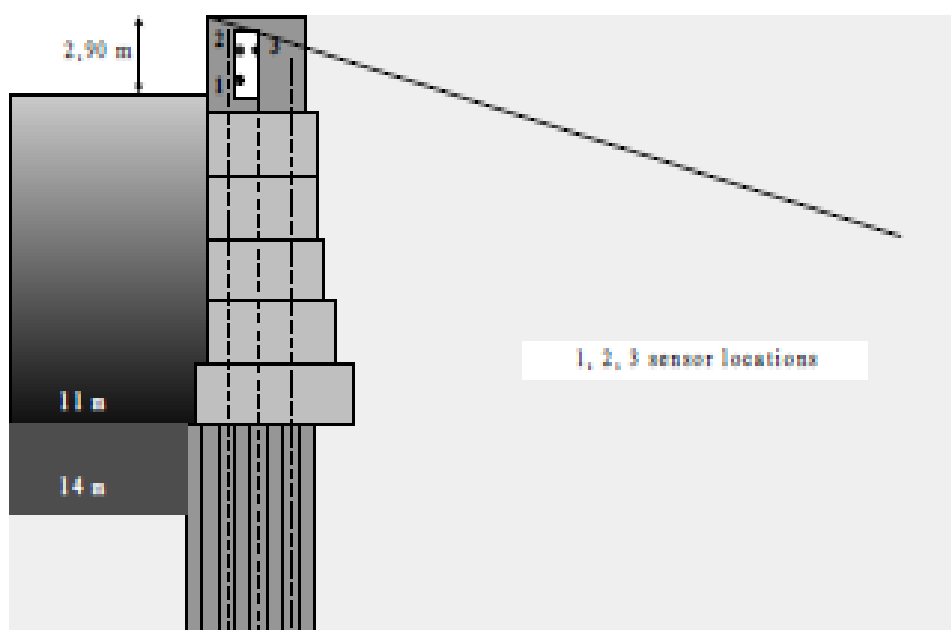


Figura 5.8 : Secció del mur e ubicació dels sensors òptics. (Font: Inaudi.D 2000)

Després d' uns mesos de recopilació de dades, es va observar que entre les fonts ambientals que causen a llarg termini el desplaçament de la paret, la temperatura jugava un rol molt important. La correlació amb la temperatura ambiental, va ser estudiada per tant, amb un major grau.

En totes les cèl·lules es va evidenciar que la resposta a les variacions de temperatura es retardava per uns pocs dies, a causa de l' inèrcia tèrmica d'aquesta estructura massiva. Les lectures del sensor es poden posar-se en correlació amb els gradients tèrmics, però diferents seccions poden respondre a la temperatura de manera diferent.

Com mostra la figura 5.9, es veu el comportament diferent dels dos tipus de cèl·lules. La diferència és visible considerant les variacions tèrmiques bisetmanal, així com en el període d'observació complet (cicle d'hivern i el començament del cicle d'estiu).

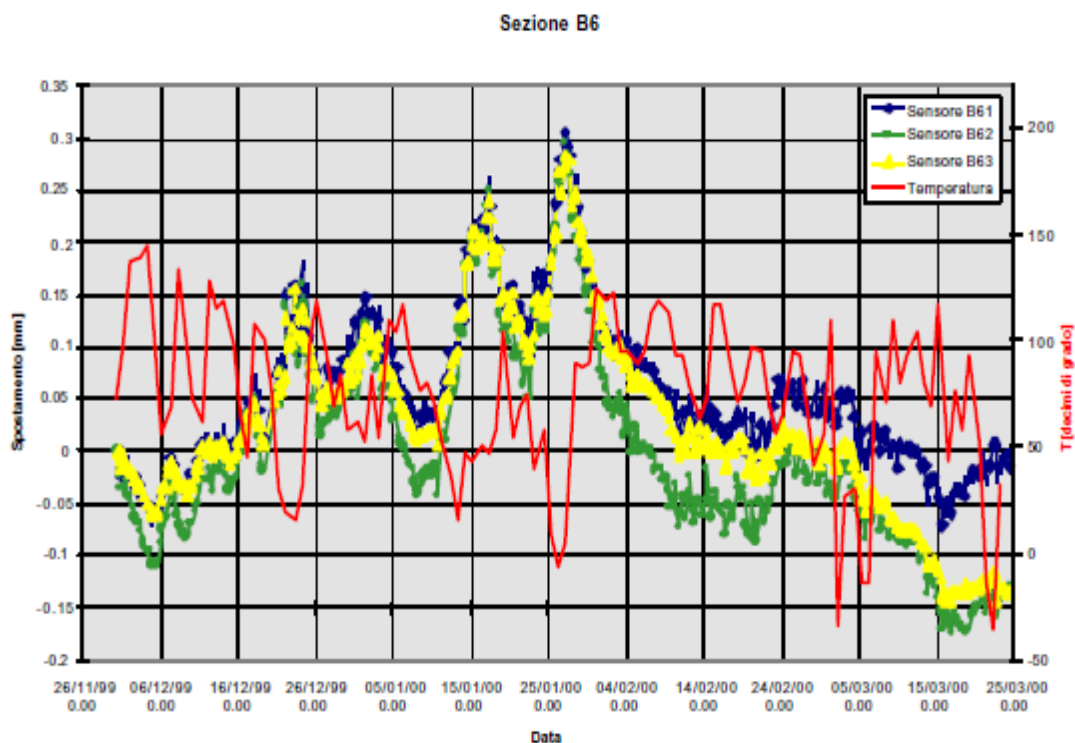


Figura 5.9 : Gràfica temps – temperatura - deformació per una secció amb fase sotmesa a variacions tèrmiques. (Font: Inaudi.D 2000)

## 5.5.- Monitorització de l'Esglesia Grandia.

Ubicada en la vessant que rodeja el Llac Lugano, el sud-est de Suïssa. Es tracta d'una petita església que presenta una important esquerda que travessa la clau de l'arc que conforma la cúpula. A més, en el costat convex exterior del mateix hi ha altres esquerdes més petites.

Es va decidir instal·lar 10 sensors òptics de tipologia SOFO d'entre 20-60 cm, de la forma indicada en la figura 5.10 per tal de conèixer l'evolució de l'obertura de la fissura i la curvatura del arc.

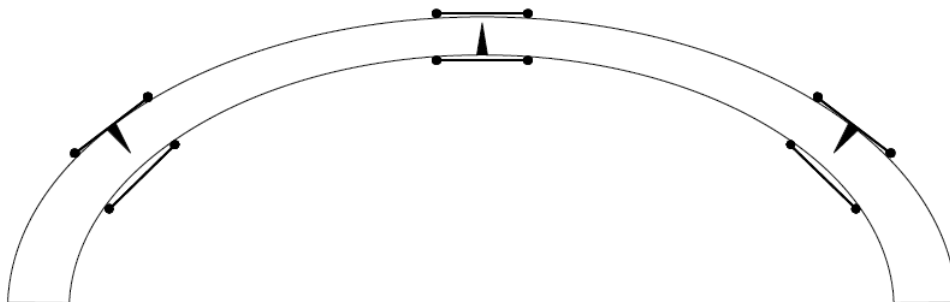


Figura 5.10: Localització de les principals esquerdes i dels sensors SOFO.

(Font: Glisic.B, Inaudi.D 2001)

Es va realitzar una monitorització continuada en el temps (figura 5.11), obtenint l'evolució de les obertures de fissura del clau i dels extrems, a més de registrar l'evolució de la temperatura ambient.

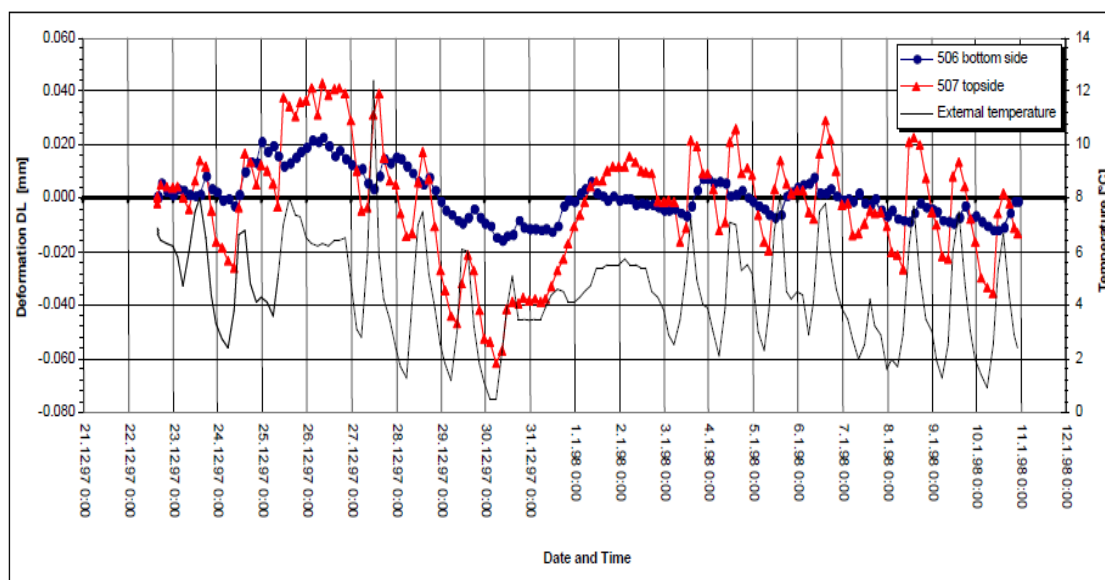


Figura 5.11: Evolució de la fissura i de la temperatura durant 3 mesos.

(Font: Glisic.B, Inaudi.D 2001)

Els resultats després d'un any de lectures, van ser que els sensors mostraven deformacions en l'obertura de fissura assolint un valor variable de 0,3 a 0,1 mm. Aquests valors d'obertura presentaven una correlació amb la temperatura ambient registrada. Els valors més elevats es donaven en els mesos d'estiu, i en cap cas comprometien l'estabilitat de l'arc.

El motiu de l'aparició d'esquerdes va ser degut a una descompressió de l'arc com a conseqüència d'unes obres de restauració. Actualment l'estabilitat i seguretat estan perfectament garantits.

### **Conclusió.**

Els exemples presentats mostren com aquest sistema pot utilitzar-se per obtenir mesures precises de deformació de forma fiable durant el temps en que es troba en funcionament. Aquesta estabilitat a llarg termini és particularment important per detectar patologies de desenvolupament lent. A més, el sistema és capaç de distingir les deformacions reals i els errors de lectura de manera precisa. En tots els casos, l'obtenció de dades precises i fiables ha contribuït a reduir l' incertesa que sovint es pot presentar al associar un cas a un judici subjectiu.



## **6.- FASE EXPERIMENTAL.**

### **6.1.- Introducció.**

A partir d'aquest capítol s'inicia la part més aplicada del present document. Per poder aproximar de forma experimental el problema de l'efecte de la temperatura en la fibra òptica, s'ha dissenyat un marc sobre el qual es pretén caracteritzar el comportament del sensor en front a règims variables de temperatura.

Per poder recrear aquestes condicions, s'han realitzat totes les simulacions a l'aire lliure en comptes de fer-ho en condicions de laboratori. Els assaigs, que es descriuran amb més detall al llarg de la memòria, s'han realitzat a la localitat de Tossa de Mar a finals del mes de Juny i principis de juliol.

### **6.2.- Disseny conceptual.**

#### **6.2.1.- Requeriments.**

Les propietats que ha de tenir el conjunt a dissenyar són les següents:

- .- Tenir suficient rigidesa com per poder aplicar tensions d'origen mecànic o tèrmic als tensors, sense causar deformacions significatives en el marc.
- .- Permetre el tesat dels tensors de manera simple i de forma manual. La forma d'aplicar la tensió serà a través de cargolat manual mitjançant una clau anglesa.
- .- Permetre la distribució i posterior ubicació dels sensors necessaris per procedir a l'assaig.
- .- Aconseguir un disseny senzill, econòmic i reutilitzable en futures aplicacions.

### **6.2.2.- Descripció del suport de l'assaig.**

El suport previst per l'assaig consisteix en un marc d'acer de 1000x600 mm (A·B), posicionat de forma horitzontal. El material constitutiu ha estat triat per les bones propietats mecàniques i tèrmiques que exhibeix, i per que és habitualment emprat en la construcció d'estructures. També s'ha tingut en compte la disponibilitat del mateix així com la facilitat per constituir elements estructurals amb ell.

El marc s'ha dotat de 6 suports que garanteixen un bon contacte del mateix amb la base suport.

Dins del marc s'han ubicat 2 tensors amb possibilitat de ser sotmesos a una certa tensió inicial. El tensor – realitzat amb una barra roscada de 16 mm diàmetre – queda interromput en la seva part central, per una platina de secció equivalent al rodó. Aquesta disposició facilita en gran mesura la possibilitat de fixar els sensors al mateix, oferint una superfície més ampla i adequada.

Aquest tensor es fixa mitjançant platina soldada en un dels seus extrems. Per l'altre, es preveu practicar una perforació al marc de tal manera que el tensor el travessi, i permeti mitjançant rosca i volandera, tesa'l, fent reacció contra el marc.

En les següents imatges ( figures 6.1, 6.2 i 6.3 ) es mostrem diferents vistes de l'estructura proposada.



Figura 6.1: Vista en planta de l'estructura.

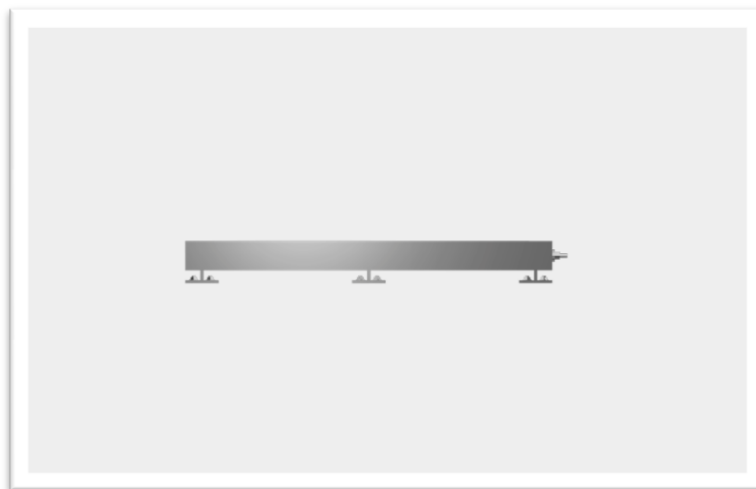


Figura 6.2: Vista en alçat de l'estructura.

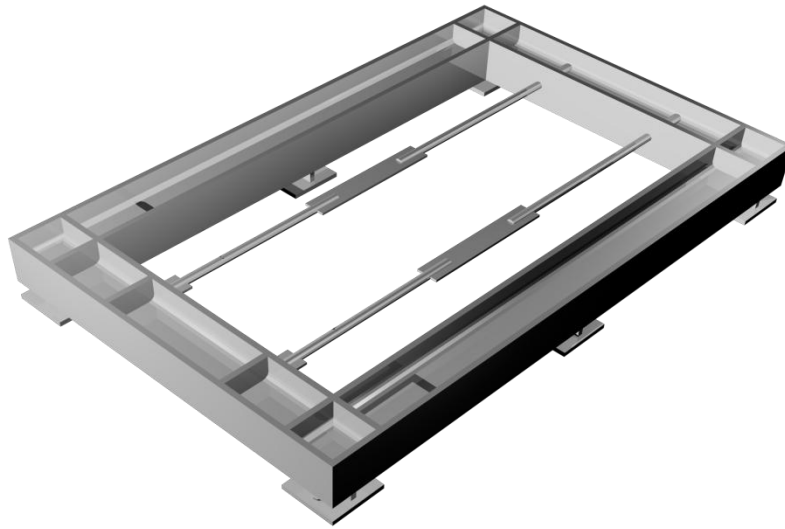


Figura 6.3 : Vista en 3D del marc metàl·lic.

A l'imatge de la figura 6.4, es simula la col·locació d'un recobriment sobre un dels sensors. L'objectiu d'aquesta protecció es generar dues situacions diferents - però comparables -, modificant l'exposició tèrmica del sensor.

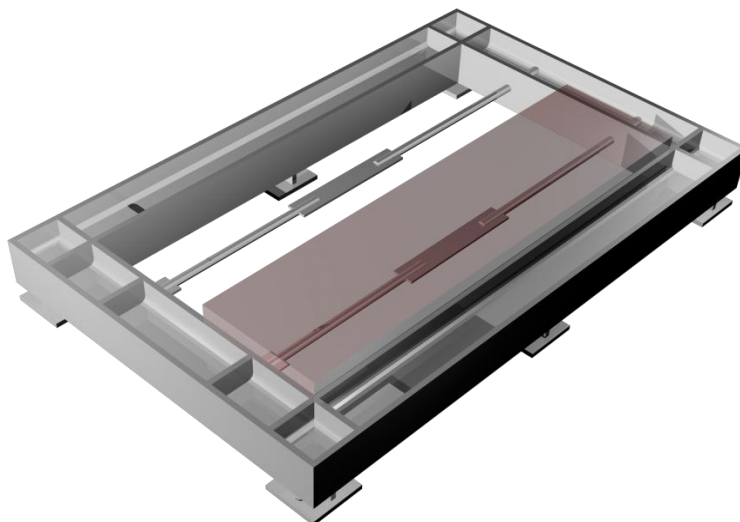


Figura 6.4: Vista 3D del marc. Simulació de la protecció tèrmica.

## 6.3.- Dimensionat del suport.

### 6.3.1.- Pre-dimensionat.

Com a dada de partida per el pre-dimensionat, s'ha fet servir com a càrrega màxima de tracció aplicable als tensors, el valor de 10 kN. Prèviament s'ha comprovat que efectivament, es pot generar aquesta força, a través de cargolar la barra roscada que forma el tensor contra el marc, mitjançant l'ajut d'una clau anglesa.

#### Caracterització del material.

Es determina fer treballar l'acer en règim elàstic lineal. Per tant a partir de les gràfiques tensió deformació obtenim els paràmetres a emprar en el càlcul.

Mòdul de Young: 210.000 MPa

Límit elàstic : 275 MPa

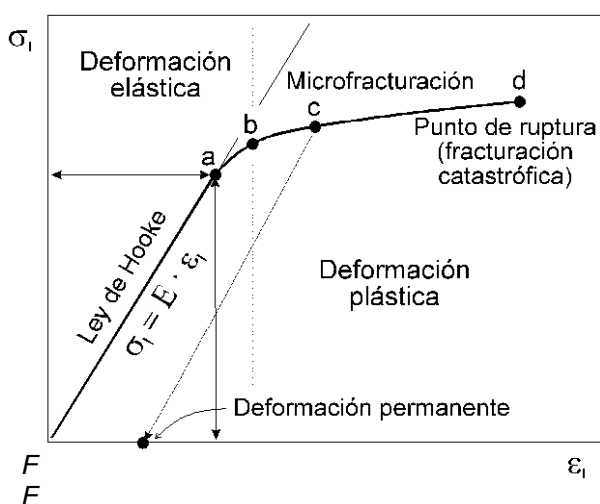


Figura 6.5: Diagrama tensió/deformació de l'acer.  
 (Font: blog Universidad tecnológica de Pereira)

#### Verificació de la càrrega a aplicar.

La mètode per verificar-ho ha estat tesar una barra instrumentada, emprant la configuració anteriorment descrita.

A.- Establim la relació entre càrrega i microdeformacions esperades:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{E \cdot A} \quad (\text{eq.6.01})$$

D (mm <sup>2</sup> )	10	16	20	22	25
A (cm <sup>2</sup> )	0,79	2,01	3,14	3,80	4,91

Taula 6.1: Àrea del rodó en funció del diàmetre.

Triem l'àrea del rodó i fixem els altres paràmetres als següents valors:

E : Mòdul de Young.  $E_{acer}$  : 210000 MPa  
 P : Càrrega aplicada.  $P_{disseny}$  :  $10 \cdot E^3$  N  
 A : Àrea.  $A_{diam,16}$  : 201 mm<sup>2</sup>

Un cop fixats els valors, determinem les microdeformacions ( $\mu d$ ) a llegir:

$$\varepsilon = \frac{P}{E \cdot A} = \left[ \frac{10000}{210000 \cdot 201} \right] \cdot 10^6 = 236,91 \approx 237 \mu d \quad (\text{eq.6.02})$$

### Efecte de la càrrega aplicada.

A.- Comprovem a continuació que la tensió generada a la barra és assumible pel material:

$$\sigma = \frac{P}{A} \leq \sigma_{adm.} \rightarrow \frac{10000N}{201mm^2} = 49.75 MPa \leq 275 MPa \quad (\text{eq.6.03})$$

Després d'ambdues comprovacions es verifica que:

- Serà possible tesar la barra a l'esforç previst.
- La barra admet la càrrega.
- El nivell de càrrega és suficient per tenir lectures precises a la fase de monitorització.

Es presenten a continuació les taules 6.2 i 6.3. Es fa un escombrat per analitzar la variació que experimenten les tensions i la deformació unitària en funció de la càrrega i de la barra utilitzades.

	TENSIO (MPa)				
Diàmetre	10	12	16	20	25
Àrea (mm)	78.54	113.10	201.07	314,16	490.87
F ( kN)					
2.00	25.464	17.683	9.947	6.366	4.074
5.00	63.661	44.208	24.867	15.915	10.186
7.50	95.492	66.313	37.300	23.873	15.279
10.00	127.323	88.417	49.734	31.831	20.372
11.00	140.056	97.259	54.707	35.014	22.409
12.50	159.155	110.521	62.167	39.788	25.465

Taula 6.2: Valors de la tensió en funció de l'àrea i de la càrrega aplicada.

	MICRODEFORMACIONS ( $\mu\text{d}$ )				
Diàmetre	10	12	16	20	25
Àrea (mm)	78.54	113.10	201.07	314,16	490.87
F (kN)					
2.00	121	84	47	30	19
5.00	303	210	118	75	48
7.50	454	315	177	113	72
10.00	606	421	236	151	97
11.00	667	463	260	167	106
12.50	758	526	296	189	121

Taula 6.3: Valor de la deformació unitària en funció de l'àrea i de la càrrega aplicada.

### Efecte de la temperatura.

Pel fet de que es vol examinar l' influència de la temperatura en les mesures efectuades sobre les estructures, caldrà estar segur de quins són els gradients de temperatura necessaris per obtenir dades significatives.

#### A.- Gradients esperats.

La norma CTE-DB-SE-AE [25], fixa les accions climàtiques a considerar en els càlculs. Tot i que l'estructura que analitzem queda fora de l'àmbit d'aplicació de la mencionada norma, farem servir aquest document com a referència per determinar quin pot ser el rang de temperatures esperades.

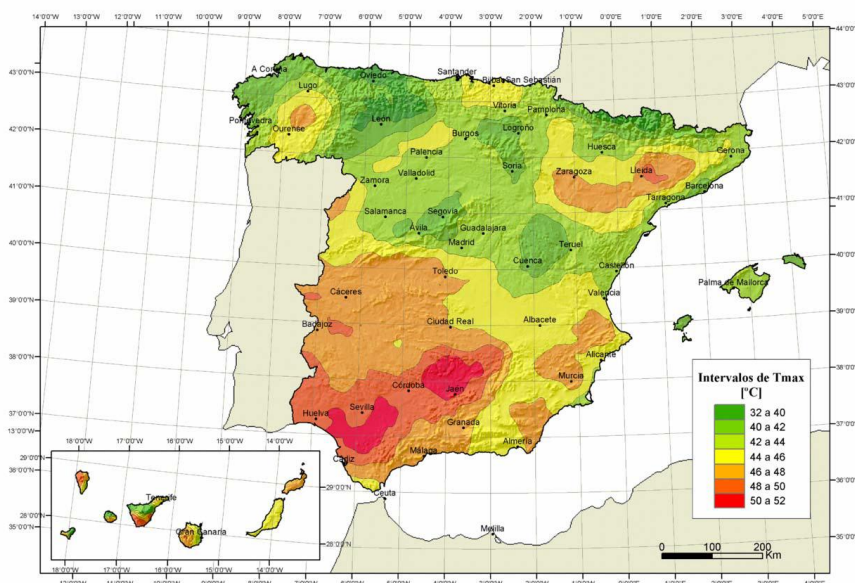


Figura 6.6: Mapa de temperatures màximes.  
 (Font: CTE-DB-SE-AE)

Altitud (m)	Zona de clima hivernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	-7	-11	-11	-6	-5	-6	6
200	-10	-13	-12	-8	-8	-8	5
400	-12	-15	-14	-10	-11	-9	3
600	-15	-16	-15	-12	-14	-11	2
800	-18	-18	-17	-14	-17	-13	0
1.000	-20	-20	-19	-16	-20	-14	-2
1.200	-23	-21	-20	-18	-23	-16	-3
1.400	-26	-23	-22	-20	-26	-17	-5
1.600	-28	-25	-23	-22	-29	-19	-7
1.800	-31	-26	-25	-24	-32	-21	-8
2.000	-33	-28	-27	-26	-35	-22	-10

Taula 6.4: Temperatures mínimes en funció de l'altitud i la zona climàtica hivernal.  
 (Font: CTE-DB-SE-AE)



Figura 6.7: Zones climàtiques hivernals.  
 (Font: CTE-DB-SE-AE)

La carrera de temperatures que agafarem de referència és:

$T_{max}$  : Temperatura màxima. : 40 – 42 °C.  
 $T_{min}$  : Temperatura mínima. : -11 °C  
 $\Delta T$  : Increment de temperatura. : 50°C

**B.-** Valors de les deformacions unitàries i les tensions.

Per fer-ho determinarem quines són les deformacions unitàries en funció dels increments de temperatura, i posteriorment, determinarem les tensions ocasionades en cas d'estar impedides, per determinar el seu efecte sobre el comportament estructural del tensor.



$$\delta = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{eq.6.04})$$

On:

$\Delta$  : Increment de longitud.

L : Longitud inicial.

$\alpha$  : Coeficient de dilatació tèrmica.  $\alpha_{\text{acer}} : 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\Delta T$  : Increment de temperatura.

Arreglem l'expressió:

$$\frac{\delta}{L} = \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{eq.6.05})$$

I si volem correlacionar-ho amb les tensions:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{eq.6.05})$$

A la taula 6.5 es mostren les relacions anteriorment descrites:

$\Delta T$ (°)	10	20	30	40	50	60	70
$\varepsilon$ (μd)	120	240	360	480	600	720	840
$\sigma$ (MPa)	25.2	50.4	75.6	100.8	126.0	151.2	176.4

Taula 6.5: microdeformacions i tensions associades en funció de l'increment de temperatura.

### 6.3.2.- Dimensionat.

#### A.- Hipòtesis.

Es fa un model amb el programa Robot, per simular el comportament del marc.

Les hipòtesis que es faran són les següents:

.- Tensió inicial dels tensors.

El tensor, per la forma en que està connectat al marc, només pot rebre esforços de tracció (en cas de compressions, la famella situada en un dels extrems perdria contacte amb el marc, donant tensions nul·les).

Es per això que es preveu donar una tensió de tracció inicial; d'aquesta manera es garanteix que en tot el procés hi haurà tensions positives en el tensor. El valor triat ha estat de 65 MPa.

L'aplicació de la tensió inicial es mesura a través de les pròpies galgues prèviament instal·lades. La mesura esperada és de 321  $\mu$ d.

Aquesta tensió s'aplica en el model numèric mitjançant increments de temperatura en els tensors. Donat que hi ha interacció entre el marc i el tensor, el valor de la temperatura es determina procedint de forma iterativa.

.- Increment de temperatura de 50°.

Tal com s'ha vist a les indicacions contingudes al **CTE-DB-SE-AE** [25], la carrera de temperatures a considerar en una estructura hauria de ser de 50°. Es simula aquesta incidència en el model.

Al fer-ho caldrà tenir en consideració que:

.- mentre que l' hipòtesi anterior, la temperatura s'aplicava en els tensors, en aquest cas, caldrà aplicar-la a la totalitat de l'estructura.

.- que la temperatura aplicada ( $\Delta T$ ) serà de signe contrari a l'aplicada en el tensors, ja que en aquell cas, a fi d'aconseguir una situació de tensions de tracció, l' increment de temperatura aplicat ha estat negatiu.

.- No s'aplicaran coeficients de seguretat, ja que ens interessen valors característics tant en les accions aplicades com en els esforços obtinguts, ja que compararem els resultats amb les mesures, i aquests lògicament no estan penalitzats per res.

## **B.- El model numèric.**

Es tracta de simular el comportament d'un marc de 1000x600 mm (A·B) on es col·loquen dos tensors que degut a la forma de construcció dels mateixos, únicament poden transferir esforços de tracció.

No s'ha particularitzat la platina central en el model pel fet de que aquesta es va dimensionar de manera que la seva secció transversal és aproximadament igual a la

del tensor al que localment substitueix (àrea del tensor =  $201 \text{ mm}^2$  ; àrea de la platina =  $200 \text{ mm}^2$ ).

El sistema es sosté sobre 6 suports que inicialment considerarem que exerceixen únicament restriccions a desplaçament vertical, deixant lliures la resta dels graus de llibertat.

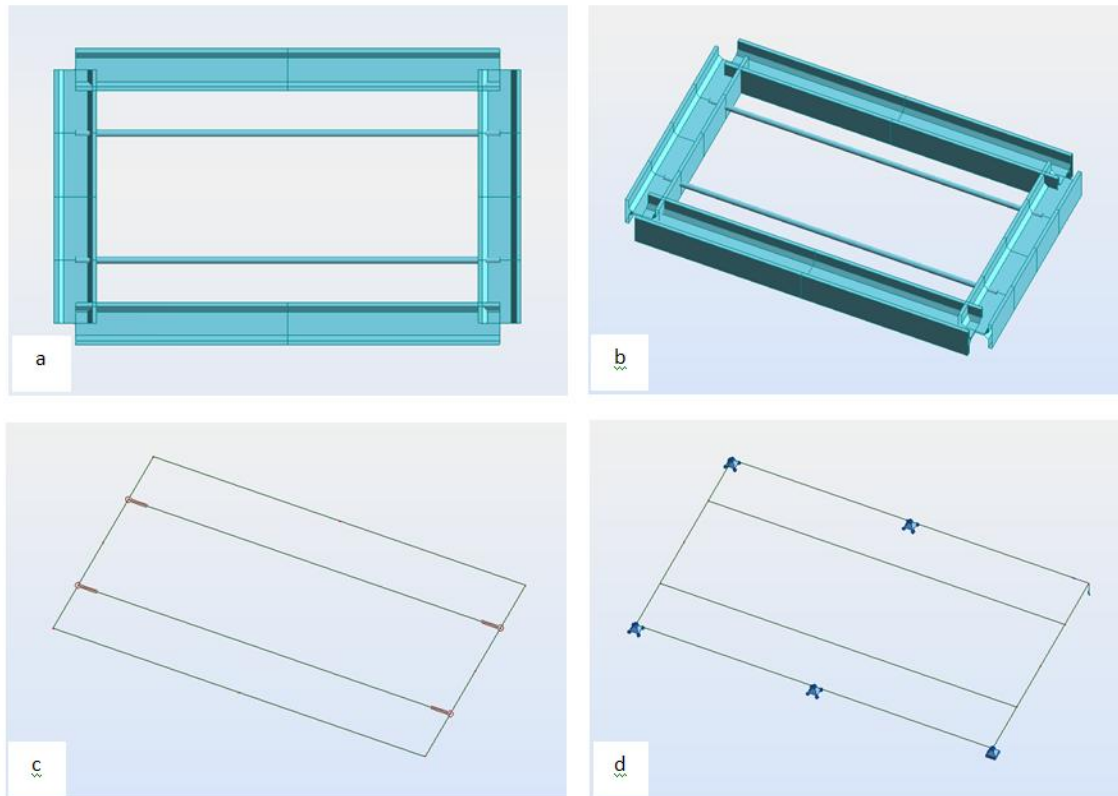


Figura 6.8. Vistes del model numèric.  
(a). Planta, (b) vista en 3D, (c) relaxacions en els extrems, (d) condicions de contorn.

Primera hipòtesi: esforços deguts a l'acció de la tracció aplicada als tirants. Iterativament es determina, el decrement de temperatura necessari per generar una tracció a la barra d' aproximadament 13.74 KN. Cal aplicar a la barra un decrement de ( $-40^{\circ}\text{C}$ ).

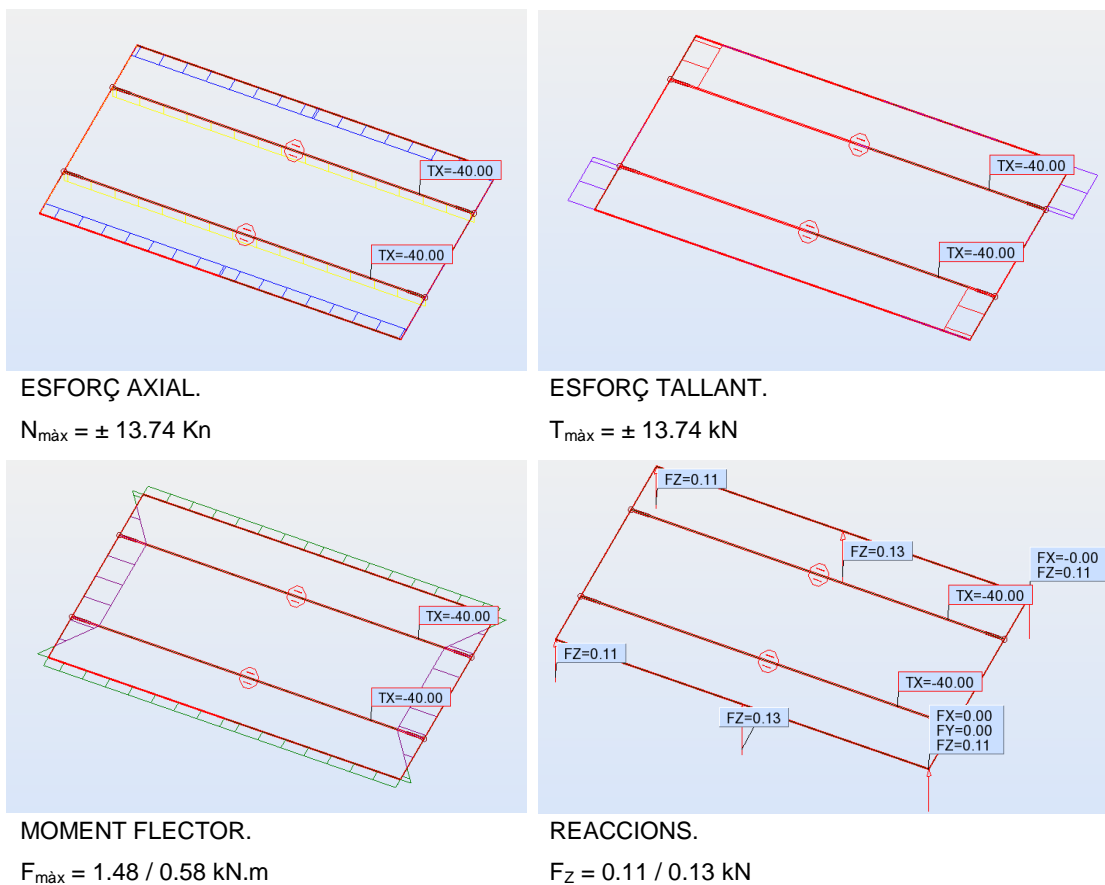


Figura 6.9. Diagrames d'esforços.

Segona hipòtesi: Increment tèrmic positiu de 50° a la totalitat de l'estructura.

### C.- Comprovacions.

A continuació es verifica que en cap cas, els esforços previstos en càlcul superen les propietats mecàniques del material.

Hipòtesis:

- Es considera que la totalitat dels perfils a analitzar pertanyen a la classe 3.
- No en consideren coeficients de seguretat, ja que els valors obtinguts es compararan amb els mesurats.

### C.1.- Comprovació del tirant.

Condicció:

$$N_{t,Rd} \leq N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd} \quad (\text{eq.6.06})$$

$$13.74 \cdot E^3 N \leq \frac{275}{1.10} \cdot 201 \text{mm}^2 = 50.25 \cdot E^3 N \quad (\text{eq.6.07})$$

Rati d'aprofitament:

$$\frac{N_{t,Rd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{17.74 \cdot E^3}{50.25 \cdot E^3} = 0.353 \quad (\text{eq.6.08})$$

### C.2.- Comprovació del marc.

#### C.2.1.- Condicció relativa a la compressió:

$$N_{c,Rd} \leq N_{b,Rd} \quad (\text{eq.6.09})$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \quad (\text{eq.6.10})$$

On:

- |                 |                                          |                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| X               | : Coeficient de reducció per vinclament. | f <sub>yd</sub> | : f <sub>yk</sub> /γ <sub>M1</sub> |
| A               | : Area neta.                             | f <sub>yk</sub> | : 275                              |
| f <sub>yd</sub> | : Resistència de càlcul de l'acer.       | γ <sub>M1</sub> | : 1.1                              |
| f <sub>yk</sub> | : Resistència característica de l'acer.  |                 |                                    |
| γ <sub>M1</sub> | : coeficient de seguretat del material.  |                 |                                    |

Càlcul del coeficient de reducció per vinclament.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \left[ \phi^2 - (\bar{\lambda}_k)^2 \right]^{1/2}} \leq 1 \quad (\text{eq.6.11})$$

on:

$$\phi = 0.50 \cdot \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda}_k - 0.2) + (\bar{\lambda}_k)^2 \right] \quad (\text{eq.6.12})$$

$$\bar{\lambda}_k = \left[ \frac{A \cdot f_{yd}}{N_{cr}} \right]^{1/2} \quad (\text{eq.6.13})$$

$$N_{cr} = \left[ \frac{\pi}{L_k} \right]^2 \cdot E \cdot I \quad (\text{eq.6.14})$$

On:

- |             |                                          |             |                                      |
|-------------|------------------------------------------|-------------|--------------------------------------|
| A           | : Coeficient d'imperfeció elàstica.      | $\alpha$    | : 0.34                               |
| $N_{cr}$    | : Càrrega cr                             | $N_{cr}$    | : (veure expressió).                 |
| $L_k$       | : Longitud de vinclament de la peça.     | $L_k$       | : bi-empotrada desplaçable = 1000mm. |
| I           | : Moment d'inèrcia en el pla considerat. | I           | : $f_{yk}/\gamma_{M1}$               |
| $\lambda_k$ | : esveltesa reduïda.                     | $\lambda_k$ | : (veure expressió).                 |
| $\Phi$      | :                                        | $\Phi$      | : (veure expressió).                 |

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	$a_0$	a	b	c	d
<b>Coefficiente (<math>\alpha</math>) de imperfección</b>	<b>0,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	<b>0,49</b>	<b>0,76</b>
$\leq 0,20$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,40	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,50	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,60	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,70	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,80	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,90	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,00	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,10	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,20	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,40	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,50	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,60	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,80	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
2,00 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

<sup>(1)</sup> esbeltez intolerable en los elementos principales  
<sup>(2)</sup> esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostramiento

Taula 6.6. Valor del coeficient de vinclament ( $\chi$ )

(Font: CTE-DB-SE-A)

De la taula 6.6, es determina el valor de  $\alpha$  i complementàriament el del coeficient de vinclament ( $\chi$ ). A partir del perfil emprat es determina que la corba a emprar és la b. Calculem l'esveltesa reduïda i a partir de la taula, determinem el valor del coeficient de vinclament.

Pas previ: valor de la càrrega crítica ( $N_{cr}$ )

$$N_{cr} = \left[ \frac{\pi}{L_k} \right]^2 \cdot E \cdot I = \left[ \frac{\pi}{1000} \right]^2 \cdot 210000 \cdot 167 \cdot 10^4 \approx 3.46 \cdot 10^6 N$$

(eq.6.15)

$$\bar{\lambda}_k = \left[ \frac{A \cdot f_{yd}}{N_{cr}} \right]^{1/2} = \left[ \frac{26 \cdot 10^2 \cdot (275 / 1.1)}{3.46 \cdot 10^6} \right]^{1/2} \approx 0.433$$

(eq.6.16)

Interpolem linealment per determinar el valor de  $\chi$ :

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0) = 0.93 + \frac{0.88 - 0.93}{0.50 - 0.40} \cdot (0.443 - 0.40) = 0.9085$$

(eq.6.17)

I per tant,

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} = 0.9085 \cdot 26 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1.1} = 590525.00 N \approx 590'25 kN \geq 13.74 kN$$

(eq.6.18)

Rati d'aprofitament:

$$\frac{N_{b,Rd}}{N_{c,Rd}} = \frac{13.74 \cdot E^3}{590.25 \cdot E^3} = 0.023$$

(eq.6.19)

**C.2.2.-** Condició relativa a la flexió:

$$M_{Rd} \leq M_{el,Rd}$$

(eq.6.20)

on

$$M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yd}$$

(eq.6.21)

On:

$W_{el}$  : Mòdul resistent elàstic en el pla considerat       $W_{el}$  :  $33.5 \cdot 10^3 \text{mm}^3$

Substituïm valors:

$$1'480 \cdot 10^6 N \cdot mm \leq 33.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{275}{1.1} = 8'375 \cdot 10^6 N \cdot mm$$

(eq.6.22)

Rati d'aprofitament:

$$\frac{M_{,Rd}}{M_{el,Rd}} = \frac{1.48 \cdot 10^6}{8.37 \cdot 10^6} = 0.178$$

(eq.6.23)

**C.2.3.-** Condició relativa al tallant:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_{yd}}{3^{1/2}}$$

(eq.6.24)

On:

$A_v$  : Àrea a tallant

$A_v = A - d \cdot t_w$  : 2000mm<sup>2</sup>

Substituïm:

$$13.74 \cdot 10^3 \leq 2000 \cdot \frac{275}{3^{1/2}} \approx 288.675 N \approx 288'7 kN$$

(eq.6.25)

Rati d'aprofitament:

$$\frac{V_{,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{13.74 \cdot 10^3}{288.7 \cdot 10^3} = 0.048$$

(eq.6.26)

**C.2.3.-** Interacció d'esforços.

Els valors dels esforços aïllats estan molt per sota dels exigibles. Al ser l' interacció, un sumatori d'aquests valors, el resultat segueix estan lluny de la condició límit.

Interacció flexió composta:

$$\frac{N_{b,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Rd}}{N_{el,Rd}} \leq 1 \rightarrow 0.023 + 0.178 = 0.206$$

(eq.6.27)

Interacció flexió i tallant:

$$\rho = \left( 2 \cdot \frac{V_d}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

(eq.6.28)



Aquesta expressió s'anul·la o agafa valors negatius quan la secció suporta més del doble del tallant real. El cas que ens ocupa, en seria un exemple. Al no tenir influència el valor de  $\rho$ , en l'expressió corresponent a l'interacció, podem estalviar-nos la comprovació ja que resulta redundant.

$$M_{V,Rd} = W_{pl} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} \quad (\text{eq.6.29})$$

Si  $\rho \approx 0$

$$M_{V,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} \quad (\text{eq.6.30})$$

Aquesta última situació ja ha estat prèviament verificada.

### 6.3.3.- Estructura definitiva.

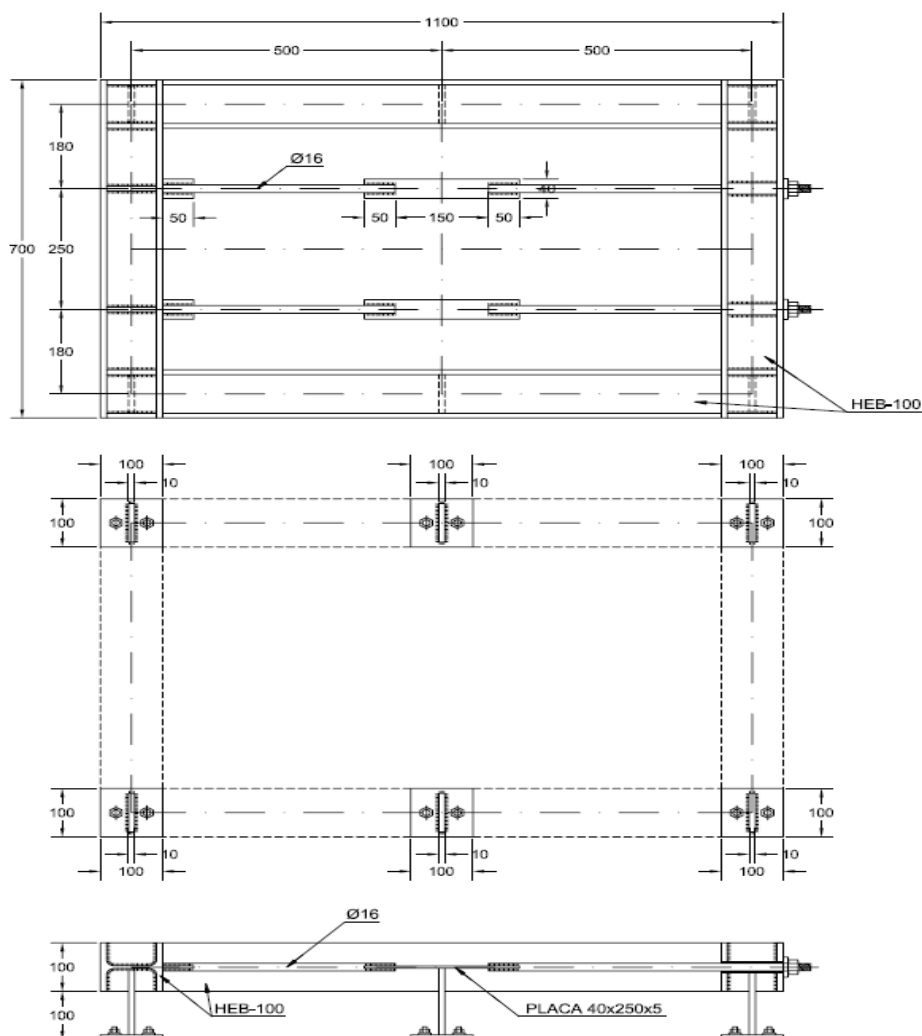


Figura 6.10 : Estructura amb les dimensions finals

## 6.4.- Instrumentació proposada.

Tal com s'ha indicat anteriorment, es preveu instrumentar aquest marc a fi de poder avaluar l' influència de la temperatura en les mesures efectuades emprant fibres de BRAGG.

Per fer-ho es proposa un sistema redundat on es puguin comparar les mesures obtingudes emprant fibra òptica amb altres mesures manuals o extensomètriques.

El material previst és el següent:

- Bandes extensomètriques unidireccionals de 350  $\Omega$ .  
(Veure especificacions de la referència C2A-06-125LW-350).

Strain gauge	
Model.	C2A-06-125LW-350
Resistence.	350 $\Omega$ $\pm$ 0.35%
Gauge factor (k-factor).	2.07 $\pm$ 1.00%
Transversal sensitivity.	0.20%
Op. environment	-10°C – +45°C

Taula 6.7 : especificacions de C2A-06-125LW-350.

(Font: WEB de Vishay micro Measurements)

- Sensor de temperatura de base extensomètrica.  
(Veure especificacions a la referència ETG-50B/W).

Strain gauge	
Model.	ETG-50B/W
Resistence.	50 $\Omega$ $\pm$ 0.30%
Gauge factor (k-factor).	-
Transversal sensitivity.	0.20%
Op. environment	-100°C – +230°C

Taula 6.8 : especificacions de C2A-06-125LW-350

(Font: WEB de Vishay micro Measurements)

- Sistema linealitzador.  
(Veure especificacions a la referència LST-100C-350D).

Strain gauge	
Model.	LST-100C-350D
Weatstone Bridge	HALF
Ratio $\mu$ d/°C	100
Function= Linealize Gage mesure To Temp	-150°C – +260°C
Op. environment	-10°C – +45°C

Taula 6.9 : especificacions de LST-100C-350D

(Font: WEB de Vishay micro Measurements)

.- Sensor de mesura de deformacions basat en la tecnologia de la fibra de Bragg.  
 (Veure especificacions a la referència SG-01).

Fibra de Bragg	
Model.	SG-01
Strain Resolution	0.85 $\mu\text{d}$
Strain Precision	1.70 $\mu\text{d}$
Active gage legth	8 MM
Op. environment	-50°C – +130°C

Taula 6.10 : especificacions de C2A-06-125LW-350

(Font: WEB de FOS&S)

Com a equips de mesura s'empraran els següents interrogadors:

.- Un mòdul Strain Smart, model 5100B, per registrar les mesures de les galgues extensomètriques, els "dummies" i el marc (veure figura 6.16).

StrainSmart Data Acquisition System (Model 5000)	
Supplier	Vishay
Scan rate	1 scan per second.
Op. environment	-10° to +50°
Strain gage card	
Strain gages	120 $\Omega$ , 350 $\Omega$ (quarter bridge)
Resolution	1 $\mu\epsilon$
Accuracy	$\pm 5 \text{ Mv}$
System noise	$\pm 2 \mu\epsilon$
Software	




Figura 6.11 : Característiques bàsiques del Sistema Strain Smart 5100B.

(Font: WEB de Vishay micro Measurements)

El sistema 5100B permet l'adquisició de fins a 1200 canals d' exploració escanejats en intervals de 0,02 segons. Això es tradueix amb l'obtenció de resultats molt precisos, i en l' habilitat per capturar dades sota condicions de carga estàtica immediatament abans de la fallada. Les targetes de Strain Gage incorporen la terminació del quart i mig pont de Wheatstone i una font de tensió constant per 0, 0.5, 1,2, 5 i 10 VDC del pont excitat.

.- Un mòdul FBG Scan 800D, per registrar les mesures de les dos fibres òptiques ( veure figura 6.12).

Aquest sistema registra les mesures dels sensors de fibra òptica en aplicacions de camp reals controlades per un ordinador intern. Disposa, entre altres coses, de 8 canals independents i d'un protocol interfacial dedicat a comunicació de les dades de mesura sobre TCP/ IP a un servidor de dades.

FBG Scan 808	
Supplier	FBGS International
Scan rate	1 scan per second.
Op. environment	0º to +50º
Wavelength range	1525-1565 nm
Laser class	1
Accuracy	± 1 pm
System noise	---
Software	iLLumiSense Pro




Figura 6.12: Característiques bàsiques del sistema FBG Scan, model 800D.

(Font: WEB de FOS&S)

Així doncs, i a mode de resum, el sistema complet consta de dues unitats (una per cadascun del sensors) on s'ubiquen:

#### Elements fixats a l'estructura.

- Una banda extensomètrica.
- Una sensor de deformacions basada en fibra òptica.
- Una banda extensomètrica + un circuit linealitzador, per mesura de temperatura.

#### Elements fixats externament de l'estructura.

- Una banda extensomètrica fixada a una platina independent. Actua com a "dummy".

#### Lectures genèriques.

- Lectures de temperatura superficial de l'estructura.
- Lectures de temperatura ambient.

A l'apartat següent, es presenta un esquema de principi de l' instrumentació proposada.

#### A.- Esquema de principi.

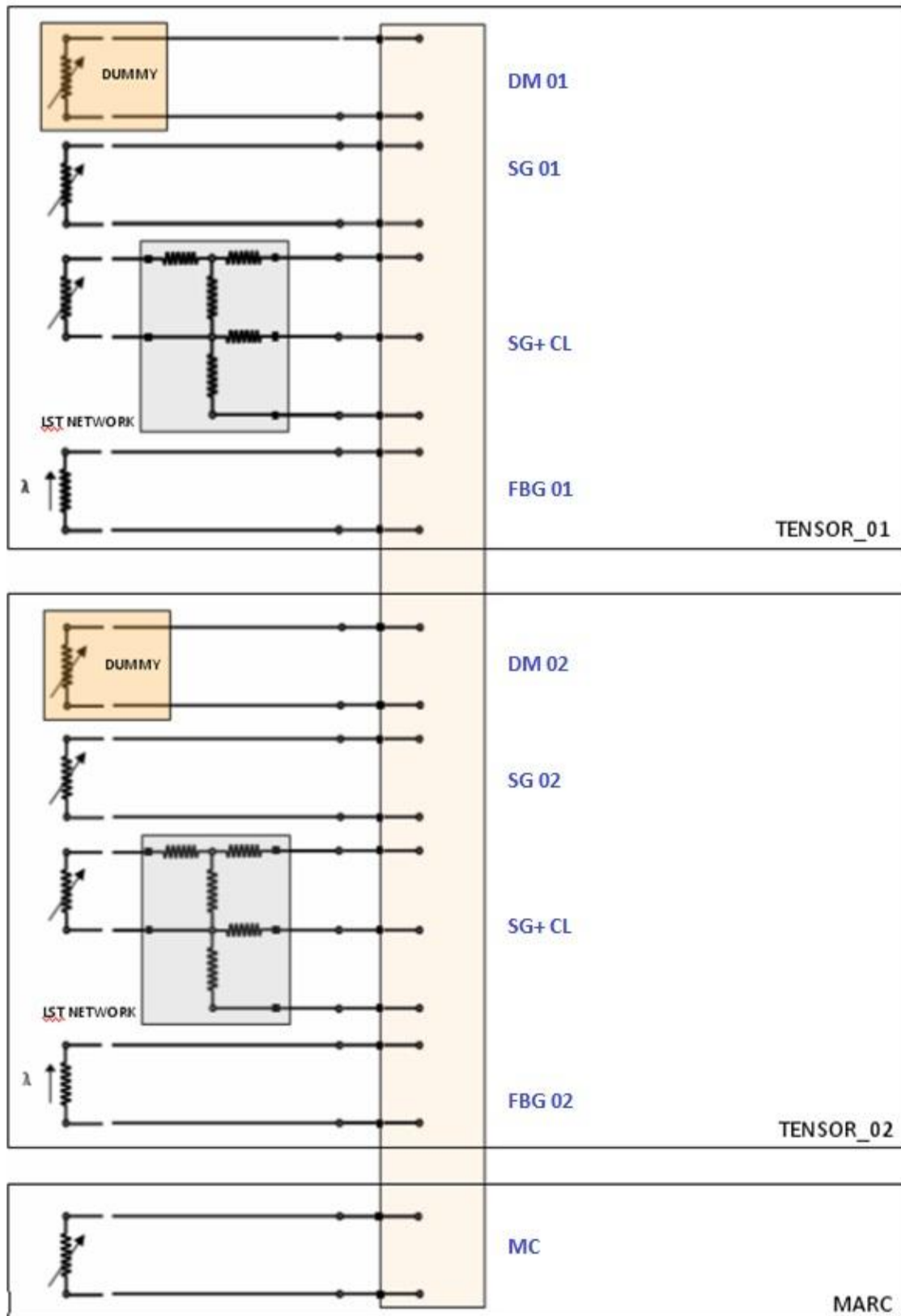


Figura 6.13: Esquema de principi.

## 6.5.- Construcció del suport.

A continuació es descriu el procediment de construcció del suport pas a pas.

### A.- Neteja del l'estructura.

Generalment les peces quan surten d'un procés de fabricació no presenten un bon aspecte visual ni d'acabat. Tot i que aquest fet no repercuteix a efectes mecànics ni de rendiment, s'ha optat per conferir a la nostra estructura una millor aparença visual.

Primerament, es procedeix a eliminar la pols i la brutícia que s' han anat dipositant principalment en les cantonades i/ o zones mortes. Seguidament, amb un paper de vidre es poleixen les rugositats més importants que s'hagin originant durant la fabricació.

En acabat, s'aplica a la totalitat de l'estructura un líquid desengreixant (15 minuts aproximadament) per eliminar tot tipus de substàncies greixoses i altres impureses. Un cop el desengreixant ja ha deixat d'actuar, es pinta l'estructura d'un gris color metàl·lic, evitant fer-ho a les parts mòbils del marc ( veure figura 6.14).



Figura 6.14: Marc acabat acabat de pintar.

### B.- Col·locació de la fibra òptica i les galgues.

La metodologia de treball tant en el cas de les galgues com de les fibres òptiques es comuna en gairebé tota l'execució. En el cas de les galgues, per tal d'aconseguir el millor contacte possible entre la galga i la superfície de la platina, es procedeix a realitzar un procés de neteja d'aquesta superfície (veure figura 6.15) i en acabat s'hi col·loca la galga. Els productes utilitzats són cotó i alcohol al 95%. És important durant el rentat, aplicar la neteja/ polit sempre en la mateixa direcció.



Figura 6.15: Procés de neteja i polit

Un cop la superfície està totalment neta, es col·loca la galga de manera que quedi completament plana sobre la cara superior de la platina. Una vegada col·locada se li acomoda a sobre una cinta adhesiva. D'aquesta manera al fixar-la a la cinta s'evita que la galga es mogui.

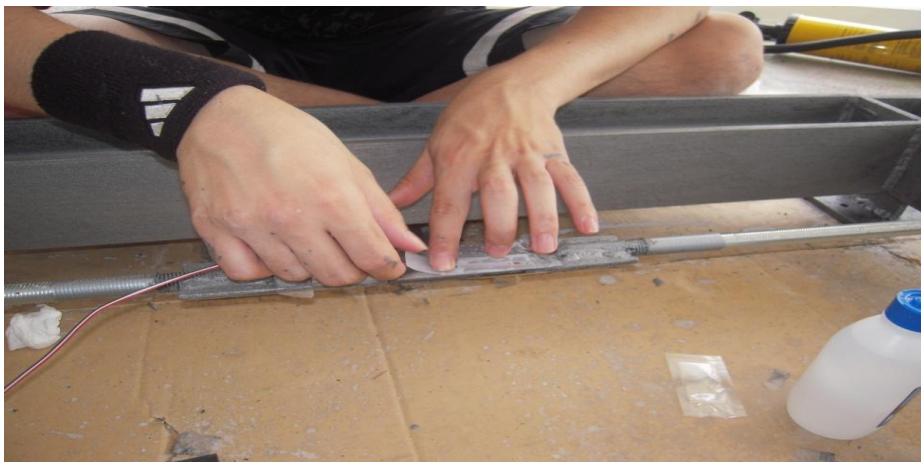


Figura 6.16 : Fixació de la galga al suport metàl·lic.

Per evitar que la galga es mogui, s'aixeca la cinta per un dels costats i, a la cara inferior de la galga se li aplica una pinzellada d'adhesiu. Posteriorment, es posiciona el conjunt cinta - galga i es manté pressionat uniformement durant un període de temps que varia en funció de la temperatura i el tipus d'adhesiu. En el cas descrit aquest temps va ser de 30 segons aproximadament.

En el cas de la fibra òptica, es procedeix de forma anàloga a la galga. En el moment del encolat amb la superfície, es retira l'encapsulat de protecció que la cobreix. En acabar, s'encola la fibra i es pressiona 30 segons perquè quedi perfectament adherida.

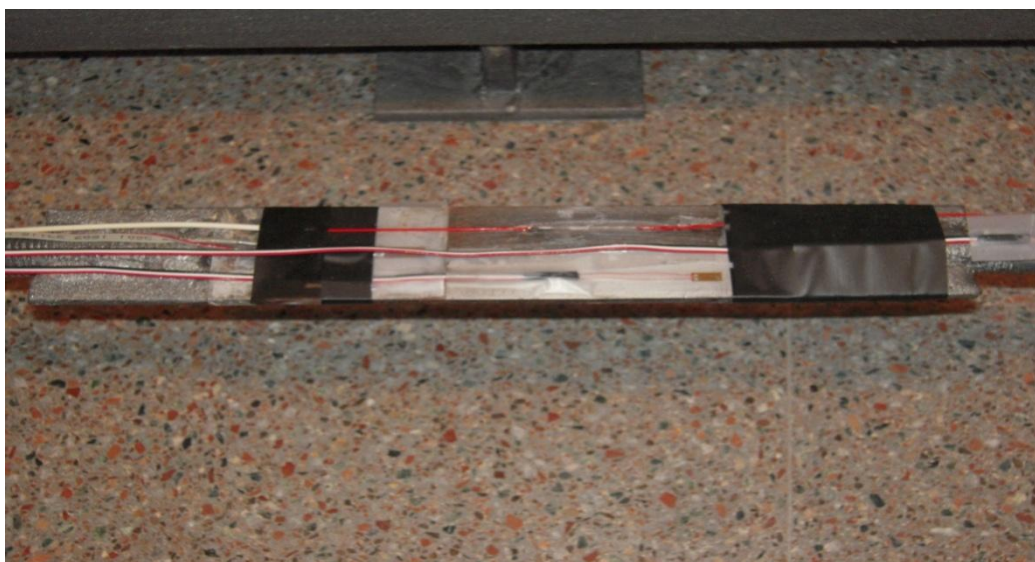


Figura 6.17: Detall de l'instrumentació de la platina

A la zona lliure de la xapa es col·loquen paral·lels entre sí el sensor de fibra òptica i la galga extensomètrica.

### C.- Instrumentació dels “dummies” i del marc.

En un dels extrems de la platina, just abans d'on comença l'interrupció amb el rodó, s'hi situa un “dummy” i se'l recobreix amb cinta adhesiva per evitar desplaçaments i/o l'efecte de l'oxidació ( veure figura 6.17 ).

S'anomena “dummy” a un element de característiques equivalents pel que fa al material, als elements estructurals sobre els que volem efectuar les mesures. La seva funció és permetre desacoblar els efectes tèrmics i els mecànics que es troben de forma conjunta a la mesura efectuada.



Això s'aconsegueix instrumentant l'element anomenat "dummy" i evitant que rebi esforços d'origen mecànic.

Tal com ja hem indicat, el "dummy" està situat en l'estructura de tal forma que queda totalment exempt de tot influència de fenòmens mecànics. La seva deformació serà exclusivament deguda a l'efecte de les variacions tèrmiques.



Figura 6.18: Col·locació del "dummy".

Com s'observa en la figura 6.19, les dos platines estan instrumentades de la mateixa manera. Si es mira la part superior de l'imatge, es pot veure com el marc també s'ha instrumentat amb una banda extensomètrica per avaluar-ne el comportament.

Per tenir informació redundat de les temperatures, es fan servir dos sistemes addicionals:

- Banda extensomètrica + linealitzador.

Es tracta d'una banda específicament dissenyada per respondre a les variacions de la temperatura. Està connectada a un petit circuit addicional que modifica la seva resistència per fer-la compatible amb l'equip d'adquisició i relaciona el gradient de temperatura amb les microdeformacions mesurades. En el cas que ens ocupa, la relació és de  $100\mu\text{d}/^\circ\text{C}$ .

- Lectures manuals mitjançant una sonda de temperatura.

Durant l'experiment es preveu fer lectures regulars tant de la temperatura ambient, com de la superficial de l'estructura.

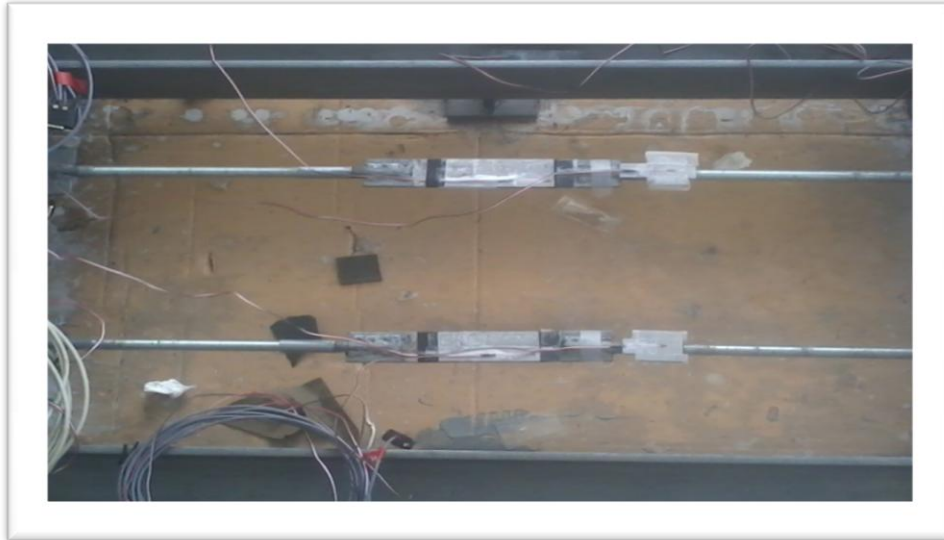


Figura 6.19: Ubicació de les bandes extensomètriques.

#### D.- Construcció de sistema linealitzador + banda extensomètrica.

Com s'ha comentat en el punt anterior, l'ús de la banda extensomètrica ETG-50B/W per a la mesura de temperatura requereix d'un condicionament previ. Aquesta és la funció que realitza el circuit linealitzador LST-100C-350D.

La connexió dels terminals de les galgues amb els terminals del linealitzador es realitza de la forma que s'indica en l'esquema de la figura 6.13.

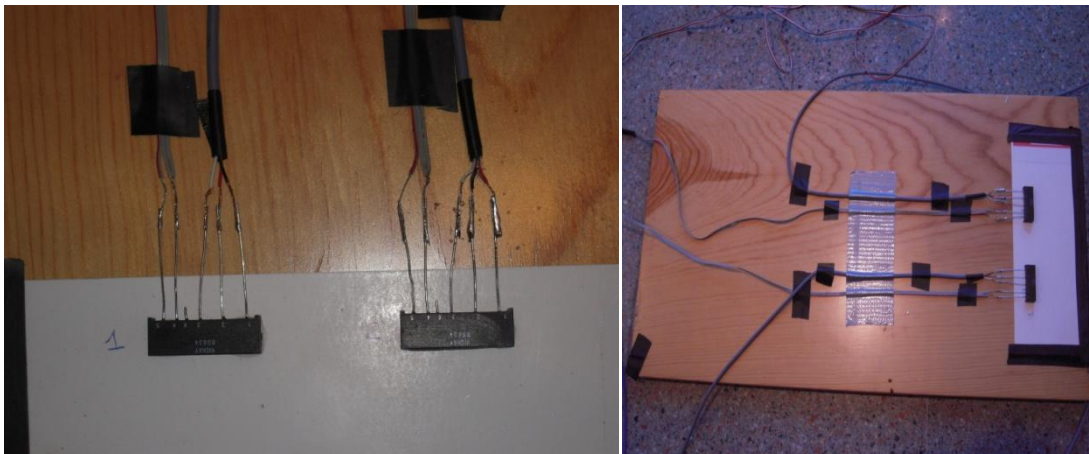


Figura 6.20: a) Detall de les connexions un cop soldades. b) Vista en planta del linealitzador.

Per arribar a la situació que trobem en les figures 6.21, es van realitzar prèviament una sèrie d'operacions. Primerament, es van escollir les connexions de colors, seguint els criteris lògics. A posteriori, per assegurar que les connexions fossin les correctes, es va mesurat i comprovar, amb l'ajut d'un multímetre, que cada punt marqués la corresponent resistència. Finalment un cop soldats els diferents terminals, es va fixar el conjunt sobre una petita plataforma de fusta per evitar qualsevol contacte mecànic que pogués malbaratar les connexions.

La següent imatge 6.21, mostra vista del linealitzador, muntat a sobre de la tauleta de fusta i amb el marc ja instrumentat.



Figura 6.21 : Imatge del conjunt banda extensomètrica + circuit linealitzador.

A la figura 6.22 s'identifiquen els dos sistemes que s'acaben de descriure, connectats a les respectives computadores.

.- sistema FBG-Scan 800D.

Interroga dos canals de fibra òptica.

.- Strain Smart.

Interroga 7 canals: dos de les galgues genèriques, dos per els "dummies", dos pel conjunt banda extensomètrica + linealitzador i un pel seguiment del marc.

Finalment, abans de procedir a realitzar l'assaig es va realitzar una petita prova experimental per comprovar que el sistema d'adquisició i tots els elements funcionaven correctament.

Per tenir una bona referència, es va utilitzar un instrument anomenat Testor que serveix entre moltes coses per mesurar temperatures en diferents situacions (ambiental, superficial, etc). La prova va consistir en modificar localment la temperatura mitjançant l'alè. Les mesures preses per l'equip d'adquisició es van comparar amb els valors obtinguts mitjançant el testor.

Es presenten a continuació diverses fotografies on es mostra l'assaig completament construït. També apareix el mecanisme emprat per esmorteir els efectes tèrmics en un dels dos tensors.

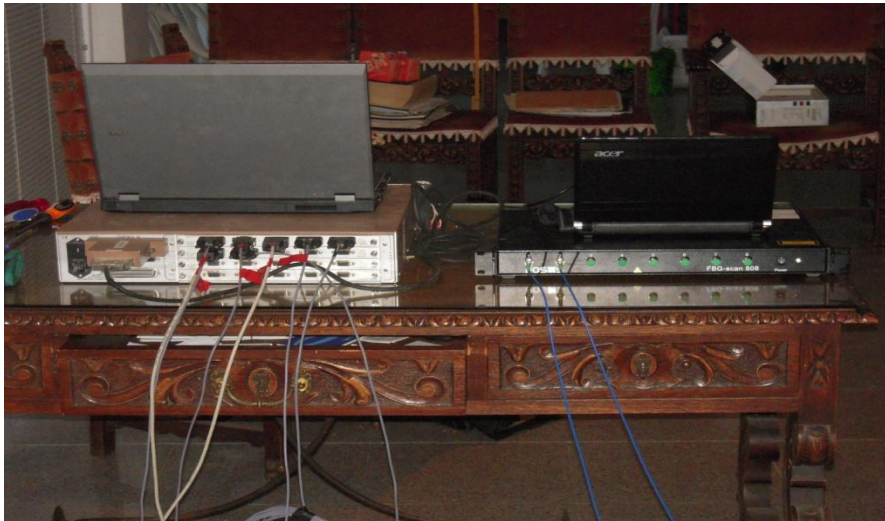


Figura 6.22: Sistemes d'adquisició utilitzats en l' assaig.

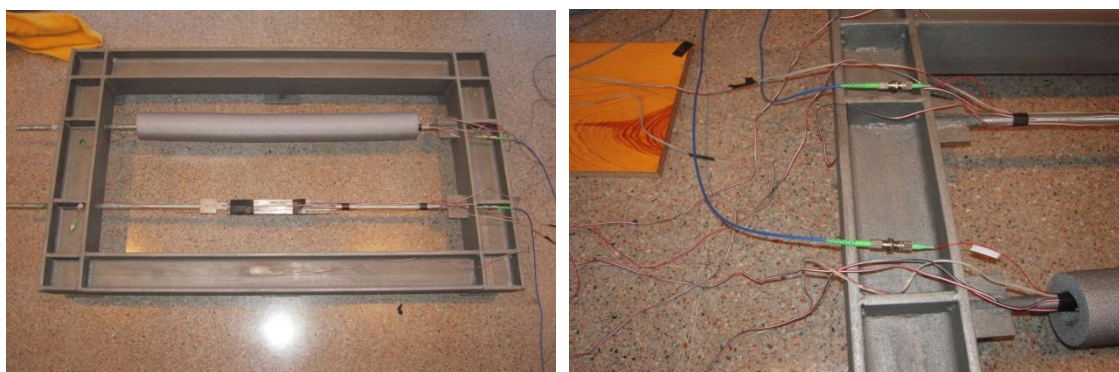


Figura 6.23: Detalls de l'assaig.



Figura 6.24: Vista general de l'assaig.

## 6.6.- L'assaig.

L'assaig s'ha efectuat a la localitat de Tossa de mar (Girona) durant els dies 27 de Juny al 1 de Juliol. La prova ha consistit en deixar l'estructura a l'aire lliure per poder simular de la forma més real possible les inclemències ambientals a les que pot estar sotmesa l'estructura. D'aquesta manera s'intenta identificar en quin grau la temperatura afecta a la presa de mesures.

Paral·lelament a la presa de dades automàtica mitjançant els interrogadors, es prenen mesures manuals de temperatura ambiental i de la temperatura superficial de l'estructura, emprant una unitat del Testor 435.

Al iniciar l'assaig s'aplica una tensió de tracció inicial al tensors. El que es pretén és impedir en la mesura del possible que degut a l'influència de la temperatura aquests puguin arribar a tenir tensió nul·la (és important recordar que en cap cas es poden assolir esforços de compressió al ser aquesta situació incompatible amb les condicions de vora del tensor). S'aplica una tensió inicial d'aproximadament 65 MPa. La temperatura ambiental del moment d'iniciar la prova és de 27,2°C.

### 6.6.1. Distribució dels canals.

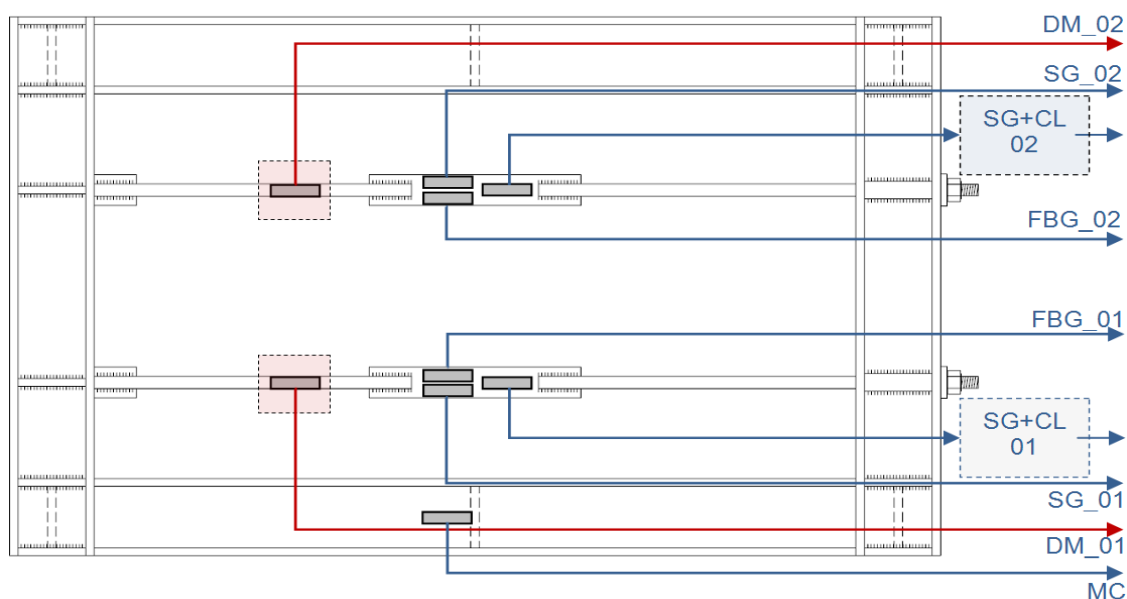


Figura 6.25: Esquema distribució dels sensors emprats.

## 7.- RESULTATS.

### 7.1.- Conversió de dades.

#### 7.1.1.- Bandes extensomètriques.

Els resultats obtinguts a partir de l' instrumentació són microdeformacions ( $\mu\text{d}$ ). Donat que el que volem és veure l'efecte de la temperatura a les mesures, no cal convertir aquest valor en cap d'altre.

Per veure l'efecte de la temperatura, únicament cal analitzar les mesures corresponents als "dummies"; per desacoblar els efectes tèrmics dels mecànics, només caldrà restar les lectures d'aquests de les de les bandes extensomètriques fixades a l'estructura associades.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{mec} + \varepsilon_{term} \rightarrow \varepsilon_{mec} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{term}$$

(eq.7.01)

On:

$\varepsilon_{tot}$  : Deformació unitària total.

$\varepsilon_{mec}$  : Deformació unitària relativa a fenòmens mecànics.

$\varepsilon_{term}$  : Deformació unitària relativa a fenòmens tèrmics.

#### 7.1.2.- Fibra òptica.

Les unitats corresponents a les mesures efectuades amb el sensor basat en fibra òptica són nanòmetres (nm).

Per poder comparar els resultats amb els de les bandes extensomètriques, cal trobar unes unitats comuns. En aquest treball s'ha decidit convertir tot a microdeformacions ( $\mu\text{d}$ ).

Per fer-ho, partim de la següent expressió:

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \rightarrow \Delta\varepsilon = \frac{1}{S_\varepsilon} \cdot \ln \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

(eq.7.02)

On:

$\Lambda$  : Longitud d'ona mesurada.

$\lambda_0$  : Longitud d'ona de referència.

$S_\varepsilon$  : Sensibilitat o factor de galga.

$S_\varepsilon$  :  $0.79 \cdot 10^{-6} \mu\text{d}^{-1}$

$\Delta\varepsilon$  : Variació de la deformació unitària.

Per tant, fixant el valor de deformació unitària inicial (usualment tindrà un valor nul), podem determinar-ne els successius increments.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$$

(eq.7.03)

On:

$E$  : Deformació unitària mesurada.

$\varepsilon_0$  : Deformació unitària de referència.

En el cas en que la mesura tingui efectes tèrmics i mecànics acoblats, les expressions a aplicar són del tipus:

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + S_T \cdot \Delta T$$

(eq.7.04)

On:

$S_T$  : Sensibilitat en front a la temperatura.

$S_T$  :  $6.32 \cdot 10^{-6}$

$\Delta T$  : Increment de temperatura.

Podem sofisticar l'expressió incorporant l'efecte de la temperatura sobre el propi sensor, afegint un nou terme a l'expressió (eq.7.04). Aquest efecte és degut a que si el material del suport i el de la fibra òptica tenen diferent coeficient de dilatació, es pot produir una certa restricció mútua.

L'efecte d'aquesta última correcció sobre el resultat final, és prou petita en el nostre cas, com per que pugui ser negligida.

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + [S_T + (\alpha_S - \alpha_{FO}) \cdot S_\varepsilon] \cdot \Delta T$$

(eq.7.05)

On:

$\alpha_S$  : Coeficient de dilatació tèrmica del suport.

$\alpha_{FO}$  : Coeficient de dilatació tèrmica de la fibra òptica

Per tant, si coneixem l'increment de temperatura (font de mesura complementària) i el valor de la sensibilitat en front a la temperatura ( $S_T$ ), podem desacoblar la part mecànica de la part tèrmica de la mesura.

---



$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + S_T \cdot \Delta T \rightarrow S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon = \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} - S_T \cdot \Delta T$$

(eq.7.06)

Les fonts de mesura complementàries poden ser:

- .- lectures de temperatura superficial de l'estructura.
- .- Col·locació d'un "dummy" consistent en un sensor de les mateixes característiques, fixat a un element del mateix material de l'estructura, però desvinculat des del punt de vista mecànic de la mateixa.

### 7.1.3.- Banda extensomètrica + circuit linealitzador.

La relació entre la temperatura i la lectura de la banda extensomètrica no és lineal. El circuit afegit a la banda, corregeix aquesta situació, i en el cas del emprat en aquesta aplicació, s'estableix el rati de 100µd/°C, entre micordeformacions mesurades i temperatura representada.

Per tant, per determinar el valor de la temperatura, s'utilitza la següent expressió:

$$T = T_0 + \frac{\Delta\varepsilon_{temp}}{100}$$

(eq.7.07)

On:

- T : Temperatura.
- T<sub>0</sub> : Temperatura inicial.
- Δε<sub>temp</sub> : variació de les micordeformacions respecte a origen.

## 7.2.- Resultats.

### 7.2.1.- Diferència entre temperatura superficial i temperatura ambient.

Les superfícies poden modificar la seva temperatura superficial, escalfant-se o refredant-se, i distanciant de forma progressiva la seva pròpia temperatura de la temperatura ambient.

Per avaluar la magnitud d'aquest fenomen en el cas de les estructures metàl·liques, s'han utilitzat els següents recursos:

- .- Lectures manuals de temperatura ambient i temperatura superficial.
- .- Lectures de la temperatura superficial mitjançant el conjunt banda extensomètrica + circuit linealitzador.

Com a pas preliminar, es determina l'error comés depenent de la forma de mesura.

A la (figura 7.1) s'avalua l'error comés entre les lectures de temperatura superficial efectuades manualment i les obtingudes a partir de la banda extensomètrica + circuit linealitzador.

Per quantificar l'error l'operació efectuada ha estat:

Càlcul dels valor mig de les lectures:

$$T_{av} = \frac{(T_{TH-01} + T_{man})}{2} \quad (\text{eq.7.08})$$

Valor de l'error de les mesures respecte a la mitja, de forma percentual:

$$E_{err,av} = 1 - \left[ \frac{(T_{TH-01,man} \cdot 100)}{T_{av}} \right] \quad (\text{eq.7.09})$$

On:

$T_{TH-01}$  : Temperatura superficial mesurada amb el sistema banda+linealitzador. (cas sense protecció).

$T_{man}$  : Temperatura superficial mesurada manualment.

$T_{av}$  : Mitja de  $T_{TH-01}$  i  $T_{man}$

$E_{err,av}$  : Error de les mesures respecte de la mitja, en forma percentual.

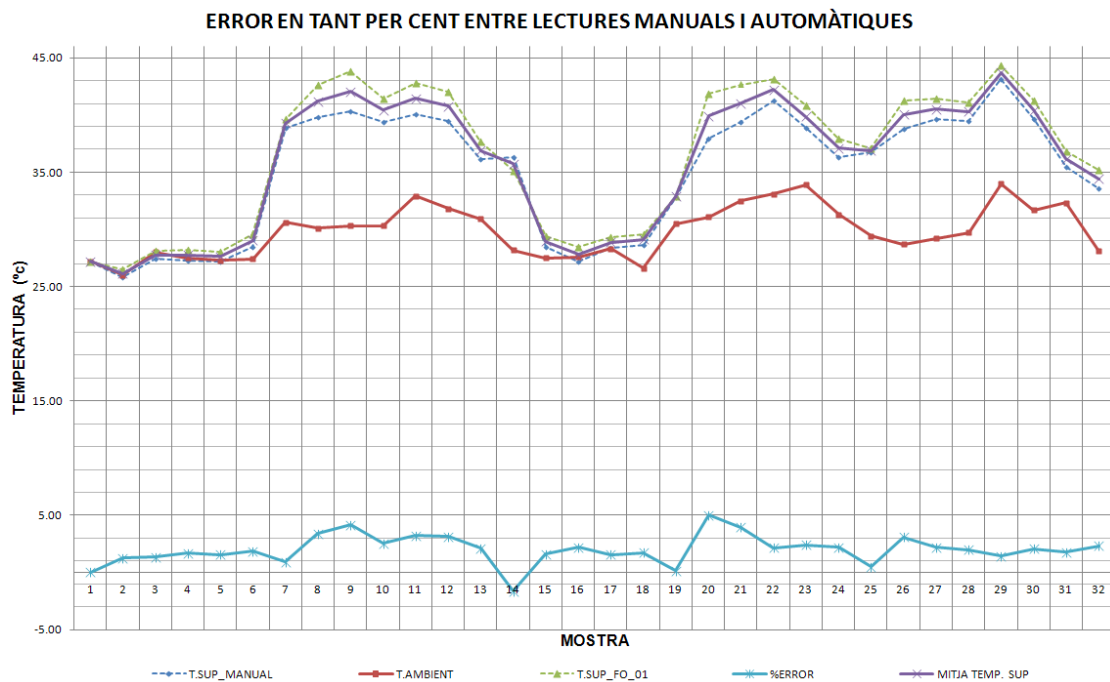


Figura 7.1: Error en % entre les lectures manuals i automàtiques de la temperatura superficial.

D'aquest anàlisi es conclou que les diferències màximes entre mesures manuals i emprant el sistema banda-linealitzador, són de 5.01% en el rang de valors analitzats. En termes absoluts, això implica un error d'aproximadament 2°C.

Un cop efectuada aquesta verificació, i validades les lectures, passem a comparar les diferències entre la temperatura ambient i la temperatura superficial de l'element.

La comparació és doble:

- .- Temperatura ambient v/s temperatura superficial mitjana de la superfície desprotegida. (veure gràfic "DIF: T.AMBIENT – C\_01" a la gràfica 00).
- .- Temperatura ambient v/s temperatura superficial de la superfície protegida. (veure gràfic "DIF: T.AMBIENT – C\_02" a la gràfica 00).

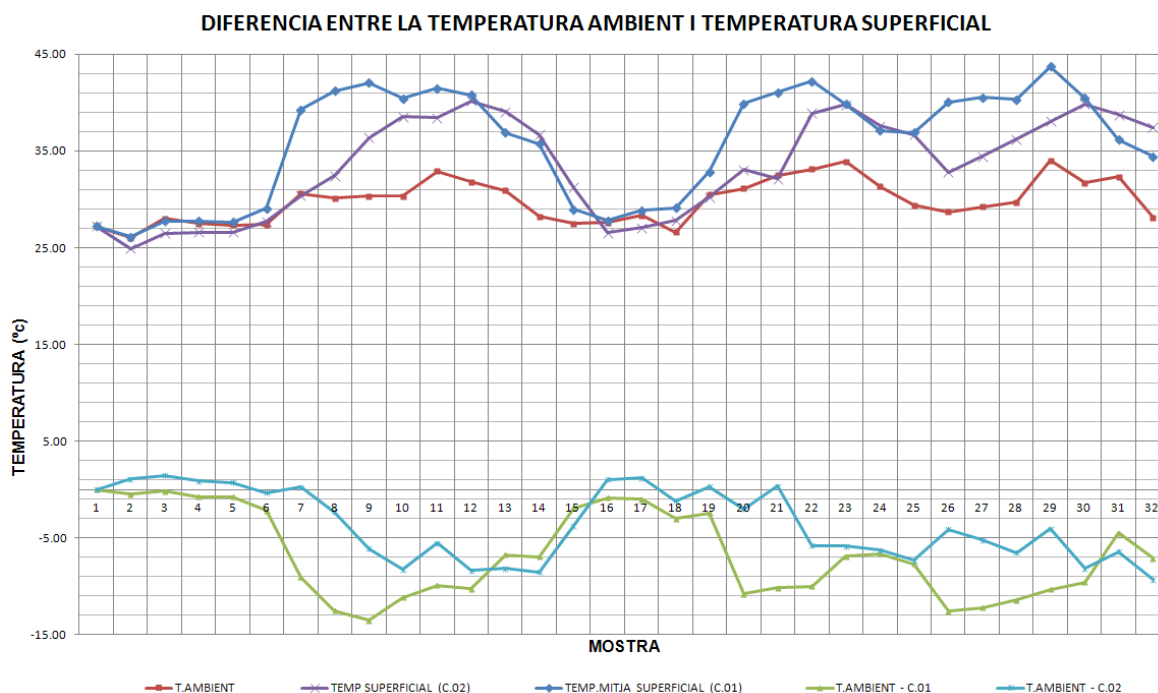


Figura 7.1: Diferència en °C entre la temperatura ambient i la temperatura superficial.

Tal com s'aprecia a la figura 7.1, les temperatures superfícials en general, superen els valors de la temperatura ambient.

Les diferències poden ser significatives: En el cas de la superfície desprotegida, les diferències màximes s'aproximen als 15°C per temperatures exteriors pròximes als 30°C.

Això implica que aquest fenomen no requereix de l'existència de temperatures extremes; amb temperatures estivals relativament habituals, el gradient de temperatura ja és significatiu.

Resulta també interessant, analitzar les diferències entre el comportament tèrmic de superfícies protegides i superfícies sense protegir.

En aquells casos en que es prenen mesures a l'exterior, els elements estructurals analitzats, poden presentar diferents graus d'exposició:

.- Elements sotmesos a radiació directe.

El sol incideix sobre les superfícies sense cap tipus d'impediment.

.- Elements amb ocultacions parcials.

Parts de l'element està protegida de la radiació degut a ombres del propi perfil, de la pròpia estructura, etc.

.- Elements amb ocultacions totals.

Es dona en casos on una part de l'estructura, tot i estar en les mateixes condicions tèrmiques ambientals, no rep radiació directe.

Des del punt de vista de l'instrumentació els més crítics resulten ser el elements amb ocultacions parcials, donat el caràcter variable d'aquesta situació.

Determinar si en aquests casos, la diferència en el valor de les temperatures és significativa, pot condicionar per exemple, l'estratègia a seguir a l'hora de situar els "dummies".

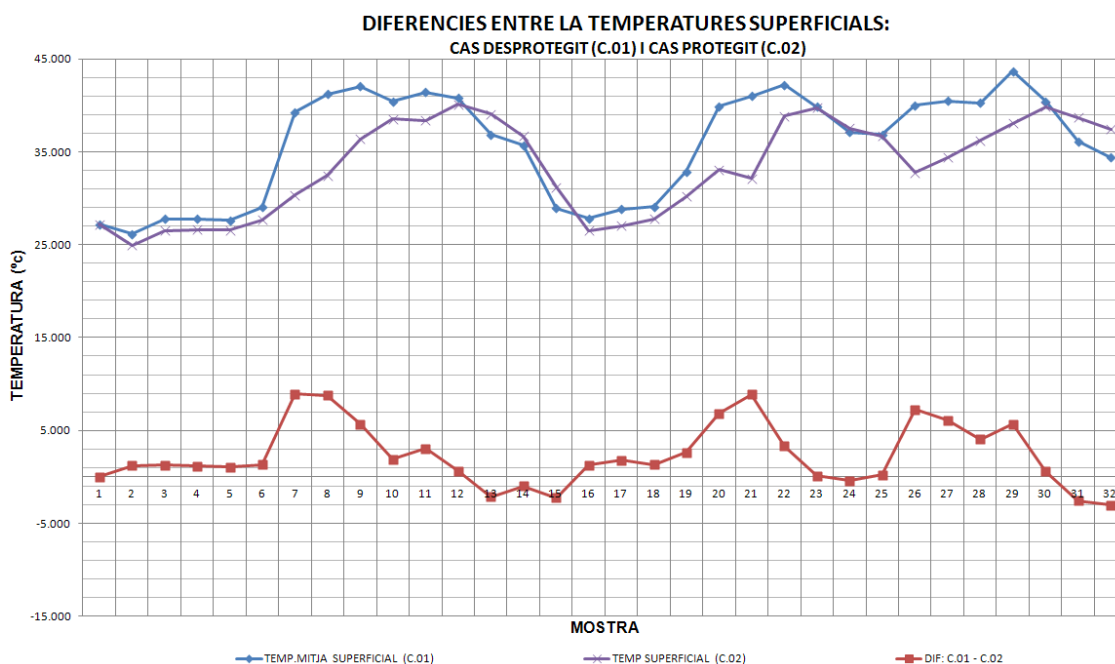


Figura 7.2: Diferència en °C entre la temperatura mitja superficial desprotegida (C.01) i la temperatura superficial en el cas protegit (C.02).

Tal com s'aprecia a la figura 7.2, la protecció col·locada en l'experiment proposat, ha generat variacions tèrmiques que en determinats casos, poden suposar valors pròxims als 8°C.

Com a efecte col·lateral, i degut a les característiques del material emprat per fer l'estudi i de la seva capacitat aïllant, es produeixen també un cert esmorteïment i un

retard tèrmics. Aquests dos fenòmens també queden reflectits a la gràfica on es comparen les dades corresponents a la banda + circuit linealitzador, per el casos protegit i desprotegit (veure figura 7.3).

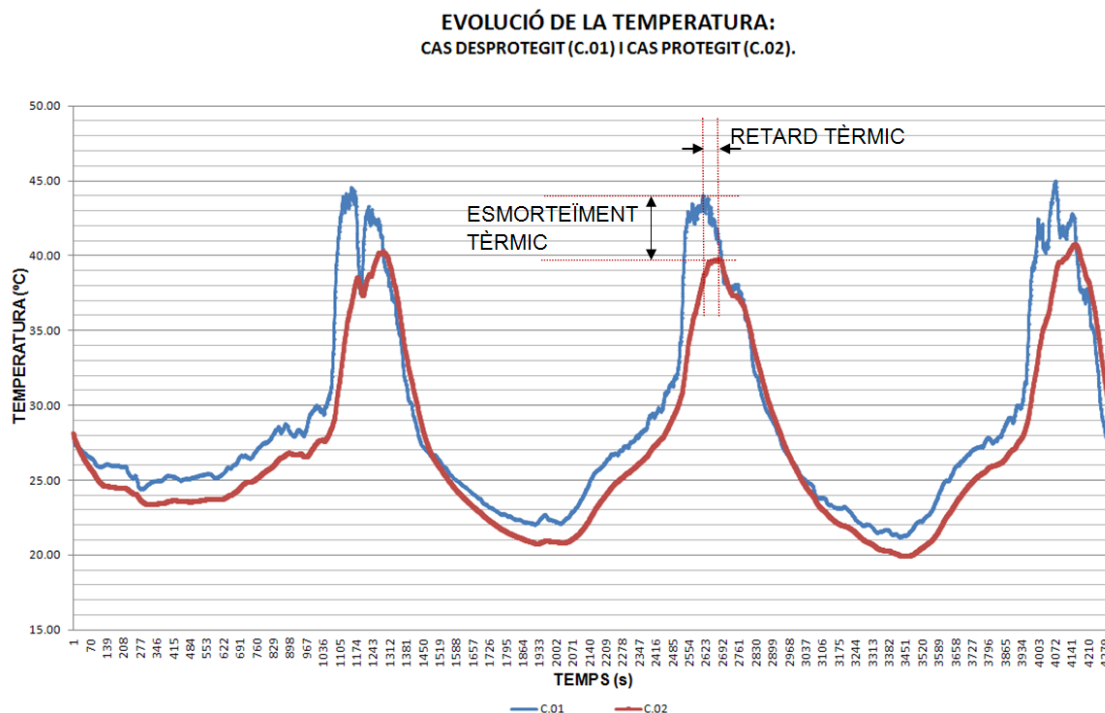


Figura 7.3: Esmorteïment i retards tèrmics. (Avaluació feta mitjançant banda + circuit linealitzador).

### 7.2.2.- Variació en les lectures obtingudes a partir de fibra òptica i extensometria.

Es conegut que la fibra òptica és molt més sensible que les bandes extensomètriques pel que fa als efectes tèrmics. Amb les dades obtingudes durant l'assaig, es pretén confirmar l'anterior asseveració, verificar els procediments numèrics adreçats a corregir l'anomalia, i veure les conseqüències de no tenir en compte, aquest tipus de correcció.

Es comparen aquests procediments amb els habitualment emprats en el cas de les bandes extensomètriques. A l'experiment no es fa servir el mig pont de Wheatstone, per compensar l'efecte de la temperatura, sino que es fa manualment mitjançant l'ús directe de les dades del "dummy".

A la figura 7.4, es poden observar les dades relatives a les galgues i a la fibra òptica sense cap tipus de correcció. Tal com es pot apreciar, la diferència entre el comportament d'ambdós sistemes, és molt notable.

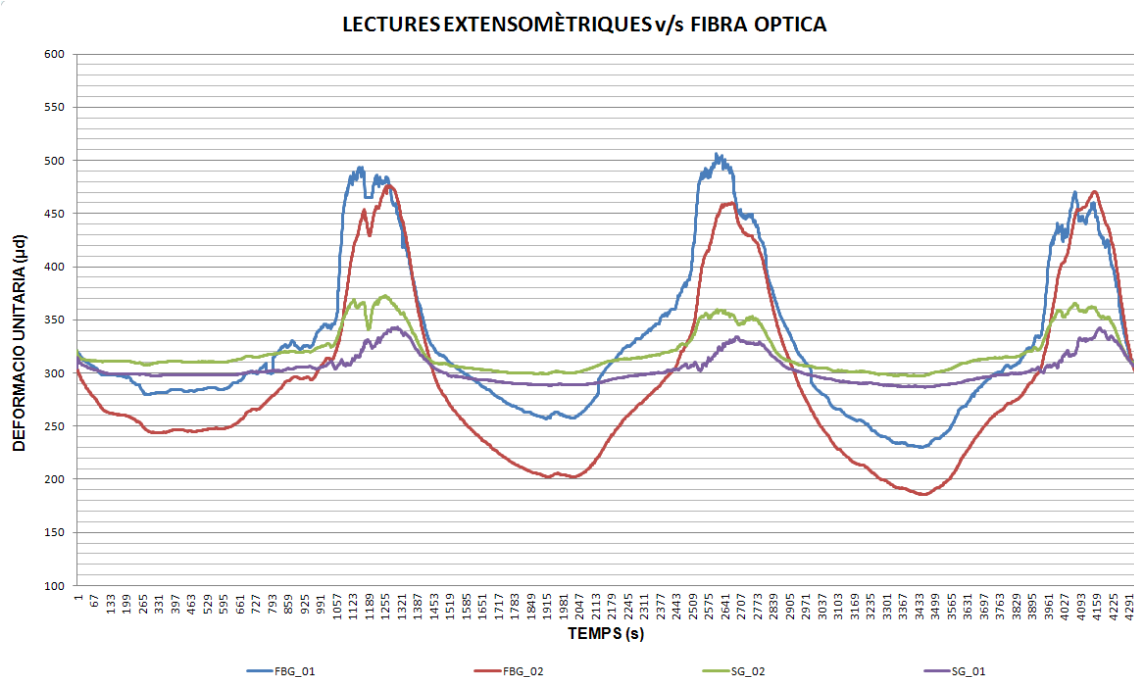


Figura 7.4: Comparatiu de lectures extensomètriques i basades el la reixa de Bragg.

A continuació es procedeix a desacoblar els efectes tèrmics en els dos casos.

**A.- Cas de la fibra òptica.**

Podem fer la correcció dels efectes de la temperatura sobre la fibra òptica, emprant l'expressió 7.04.

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\epsilon \cdot \Delta\epsilon + S_T \cdot \Delta T \rightarrow S_\epsilon \cdot \Delta\epsilon = \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} - S_T \cdot \Delta T \rightarrow \Delta\epsilon = \left[ \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} - S_T \cdot \Delta T \right] \cdot \frac{1}{S_\epsilon}$$

(eq.7.10)

Determinem l'efecte mecànic restant de la mesura obtinguda, l'efecte de la temperatura. Per fer-ho podem fer servir les temperatures obtingudes directament amb el conjunt banda+ circuit linealitzador.

Fem primer un exemple que es caracteritzi per presentar temperatures altes:

Reg	Hora	FBG_02 (actual)	FBG_02 (origen)	Temp. (actual)	Temp. (origen)	SG_02 (actual)	SG_02 (origen)	DM_02 (actual)	DM_02 (origen)
		(nm)	(nm)	(°C)	(°C)	(µd)	(µd)	(µd)	(µd)
1165	16:16	1555.913	1555.3121	44.42	27.20	363	321	11	0

Taula 7.1: valors associats al registre 1165 (corresponent a les 16:16)

Calculem l' increment de temperatura:

$$\Delta T = T - T_0 = (44.42 - 27.20)^\circ C = 17.22^\circ C$$

(eq.7.11)

Paràmetres addicionals:

$$S_T : \text{Sensibilitat en front a la temperatura.} \quad S_T : 6.32 \cdot 10^{-6} \mu\text{d}^{-1}$$

$$S_\varepsilon : \text{Sensibilitat o factor de galga.} \quad S_\varepsilon : 0.79 \cdot 10^{-6} \mu\text{d}^{-1}$$

Apliquem l'expressió 7.10:

$$\Delta\varepsilon = \left[ \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} - S_T \cdot \Delta T \right] \cdot \frac{1}{S_\varepsilon} = \ln \left[ \frac{1555.913}{1555.31217} - 6.32 \cdot 10^{-6} \cdot 17.22 \right] \cdot \frac{1}{0.79 \cdot 10^{-6}} = 351'14 \mu\text{d}$$

(eq.7.12)

Determinem l'error comés quan es relaciona la lectura efectuada únicament amb fenòmens mecànics:

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda_0} = S_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \rightarrow \Delta\varepsilon = \left[ \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} \right] \cdot \frac{1}{S_\varepsilon} = \left[ \ln \frac{1555.913}{1555.31217} \right] \cdot \frac{1}{0.79 \cdot 10^{-6}} = 488,90 \mu\text{d}$$

(eq.7.13)

L'error associat referit al valor corregit és :

$$\%_{err} = \left( \frac{488.90}{351.14} - 1 \right) \cdot 100 = 39.23\%$$

(eq.7.14)

**B.- Cas de les bandes extensomètriques.**

Comparem aquests valors amb els obtinguts amb les bandes extensomètriques. En aquest cas, desacoblar els efectes tèrmics dels mecànics es redueix a la pràctica de restar al valor de la galga, el valor del "dummy".

Per tant

$$\varepsilon_{mec} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{term} = SG\_02 - DM\_02 = (363.00 - 11.00) \mu\text{d} = 352 \mu\text{d}$$

(eq.7.15)

Tal com es pot apreciar, la coincidència de resultats es gaire be perfecte.

**C.- Reproducció del procés per un cas de baixa temperatura.**

Fem ara un exemple que reproduïxi un descens de la temperatura respecte de l'inicial.

Reg	Hora	FBG_02	FBG_02	Temp.	Temp.	SG_02	SG_02	DM_02	DM_02
		(actual)	(origen)	(actual)	(origen)	(actual)	(origen)	(actual)	(origen)
		(nm)	(nm)	(°C)	(°C)	(μd)	(μd)	(μd)	(μd)
2032	6:43	1555.629	1555.3121	22.14	27.20	300	321	-11	0

Taula 7.2: valors associats al registre 2032 (corresponent a les 6:43)



Determinem la variació de temperatura:

$$\Delta T = T - T_0 = (22.14 - 27.20)^\circ C = -5.06^\circ C$$

(eq.7.16)

Determinem el valor de  $\Delta \varepsilon$  per el cas de la fibra òptica:

$$\Delta \varepsilon = \left[ \ln \frac{\lambda}{\lambda_0} - S_T \cdot \Delta T \right] \frac{1}{S_\varepsilon} = \ln \left[ \frac{1555.629}{1555.31217} - 6.32 \cdot 10^{-6} \cdot 5.06 \right] \cdot \frac{1}{0.79 \cdot 10^{-6}} = 298'31 \mu d$$

(eq.7.17)

Determinem el valor de  $\Delta \varepsilon$  per el cas de bandes extensomètriques:

$$\varepsilon_{mec} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{term} = SG\_02 - DM\_02 = (300.00 + 11.00) \mu d = 311 \mu d$$

(eq.7.18)

Determinem l'error respecte a la galga extensomètrica:

$$\%_{err} = \left( 1 - \frac{298.31}{311.00} \right) \cdot 100 = 7.3\%$$

Reproduïm finalment un gràfic on s'aprecia el progressiu ajust de les dues famílies de valors (senyors basats en fibra òptica i en extensometria) un cop efectuades les correccions degudes a la temperatura (veure figura 7.5).

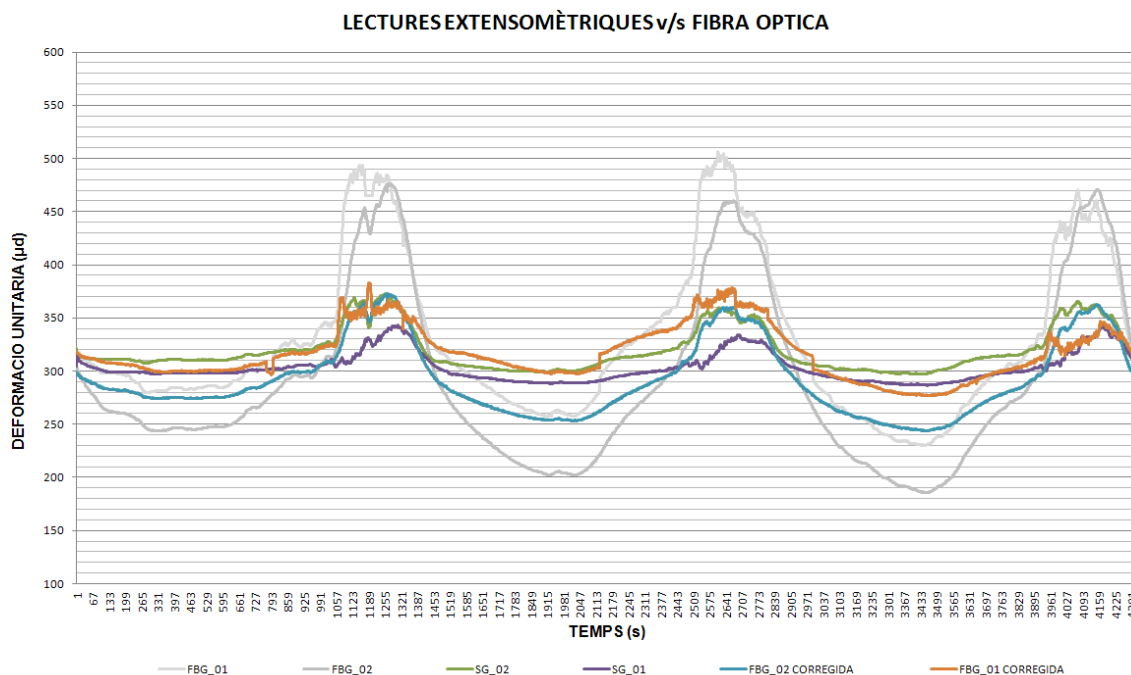


Figura 7.5: Comparatiu de lectures extensomètriques i basades el la reixa de Bragg.

## **8.- RESUM DEL PRESSUPOST.**

El pressupost final del present projecte, que es troba detallat en l' Annex C, ascendeix al valor de **7701.35 €** (set mil set-cents un euros amb trenta-cinc cèntims).

## **9.- CONCLUSIONS I DESENVOLUPAMENTS FUTURS.**

### **9.1.- Conclusions.**

#### **A.- Conclusions generals.**

El treball realitzat ha servit per conèixer en profunditat, el comportament dels sensors de deformació basats en la reixa de Bragg i tenir una comprensió més general dels sensors basats en extensometria.

Ha permès tenir una visió més directa dels fenòmens estructurals, al poder avaluar de forma numèrica el comportament de l'estructura proposada, i posteriorment, veure'n el comportament real.

#### **B.- Conclusions relatives a l'estat de l'art.**

El comportament i els processos de fabricació de la fibra òptica estan completament assumits per l'indústria.

En el cas dels sensors basats en fibra òptica aplicats a l'enginyeria civil, el cas és diferent. El corpus teòric i moltes de les aplicacions concretes encara estan en procés d'ajust. La fabricació d'aquest tipus de sensor és encara escassa, i concentrada en poques empreses. En molts de casos resulten poc competitius respecte als seus homòlegs, basats en altres tecnologies.

Tot i que s'han pogut trobar diversos exemples de l'ús de la fibra òptica en l'avaluació d'elements estructurals, es fa palès que es tracta d'un camp on les aplicacions encara són escasses, i els resultats encara pobrament disseminats.

#### **C.- Conclusions relatives a la construcció del marc.**

El procés de construcció, ha estat relativament fàcil, ja que els condicionants bàsics, finalment no han estat els resistents, sino els relatius al control de les deformacions i a generar espai suficient per distribuir els sensors.

El model numèric emprat en el pre-disseny és simple, tot i que fer-ne un capaç de reproduir el comportament real amb tota la seva complexitat, pot ser probablement i per ell mateix, materia per un projecte final de carrera específic.

El procés de construcció pròpiament dit, ha permès entendre la necessitat de que els projectes desenvolupats a una oficina tècnica estiguin definits de forma acurada i exacta. També s'ha pogut comprovar l'importància d'entendre el procés de construcció en el moment de dissenyar els elements estructurals, i la necessitat de definir quines són les toleràncies admissibles, respecte al disseny teòric.

#### **D.- Conclusions relatives a l'instrumentació.**

La correcció en la col·locació de sensors, i el seu posterior calibrat, són condicions ineludibles per obtenir mesures fiables.

La quantitat de variables que intervenen en el comportament real d'una estructura, requereix evitar noves incògnites fruit d'una col·locació poc curosa o d'una definició de zeros (dades en origen) ambigua.

També resulten interessants les tècniques de pre-anàlisi, ja que permeten tenir un ordre de magnitud dels resultats esperats, així com jerarquitzar les variables en funció de la seva importància.

#### **E.- Conclusions relatives a l'assaig.**

##### **e.1.- Mesura de la temperatura.**

El conjunt banda extensomètrica + circuit linealitzador, que es provava per primera vegada en aquesta aplicació, ha donat un resultat excel·lent, mostrant-se com una eina fiable i robusta.

La complexitat vinculada al seu muntatge, es redueix finalment a trobar un suport adequat per a la seva col·locació i transport, així com a modificar-ne les connexions per poder reutilitzar el linealitzador (la galga es perd).

El mètode per corregir els efectes de la temperatura en el cas de la banda extensomètrica pot ser més eficient si es fa servir mig pont de Wheatstone, ja que d'aquesta manera la correcció de la temperatura es fa de forma automàtica.

S'ha observat que la diferència entre la temperatura ambient i la superficial pot arribar a experimentar gradients significatius si l'element estructural està sotmès a radiació solar. Per tant, no resulta adequat, fer correccions tèrmiques a partir de la mesura de temperatures ambientals.

#### **e.2.- Comportament de la fibra òptica.**

El resultat final de les mesures efectuades mitjançant sensors de fibra òptica depèn en gran mesura, de les condicions tèrmiques de l'assaig. El procediment emprat, requereix d'un sistema complementari - banda extensomètrica + linealitzador -, per poder fer la correcció tèrmica. Un procediment alternatiu, podria ser emprar un "dummy" del sensor de fibra òptica, seguint el mateix procediment emprat en el cas de l'extensometria.

La fibra òptica presenta un problema addicional, lligat al fet de tenir que "tesar" manualment el sensor per possibilitar que aquest adquireixi valors tant positius com negatius. Al fer aquest "tesat" de forma manual, es perd el valor inicial.

Tot i que es pot agafar com a inicial el primer valor mesurat, seria més convenient resoldre aquesta qüestió:

- .- emprant sensors basats amb reixa de Bragg on l'efecte del tesat estigui fet en origen (aquest tipus de sensor està disponible en el mercat).
- .- fent el tesat amb la fibra prèviament connectada a l'interrogador. Mantenir l'adquisició fins que el valor inicial s'estabilitzi i emprar posteriorment aquest nou valor obtingut com a valor d'origen.

En l'avaluació d'estructures emprant sensors basats amb la reixa de Bragg, resulta ineludible la correcció per temperatura, ja que l' influència en el resultat final és molt gran.

Aquest fet és especialment cert en el cas en que es facin mesures in situ, ja que tal com hem dit anteriorment, les estructures sotmeses a variacions tèrmiques per canvis de temperatura ambiental o per radiació solar, presenten resultats altament afectats per aquesta variable.

## **9.2.- Desenvolupaments futurs.**

Aquest treball ha recollit la documentació necessària per centrar adequadament la qüestió de l'ús de sensors basats en reixa de Bragg en aplicacions d'enginyeria civil. A la vista dels resultats anteriors, es proposen les següents línies de treball a desenvolupar el futur:

**A.-** Completar els assaigs, incloent:

**A1.-** Instrumentació complementària.

.- Incloure sensors en el marc, a fi de poder avaluar el comportament de la resta de l'estructura de forma acurada. En aquest cas, s'ha col·locat un únic sensor com a eina de control.

.- Inclusió d'un "dummy" consistent en un sensor de fibra òptica fixat a una part de l'estructura que resulti inert, per comparar l'eficàcia d'aquest procediment respecte al emprat en el present projecte.

**A2.-** Modificacions en els suports de manera que es garanteixi únicament resposta en sentit ascendent. Això es podria concretar en la col·locació de rodaments o dispositius equivalents a la base, de tal manera que s'anul·li la fricció en el pla horitzontal.

**A3.-** Ocultacions basades en l'ombra. En el present projecte, l'ocultació emprada en el projecte, ha donat com a resultat no solsament esmorteïment de la temperatura superficial, si no un decalatge tèrmic probablement degut a les propietats aïllants del material emprat. Aquest segon efecte no sembla propi del comportament de l'estructures en els casos habituals.

**B.-** Incloure l'efecte tèrmic degut a d'interacció entre el sensor i la base. Per poder-ho fer, s'haurà de sol·licitar el coeficient de dilatació tèrmica del material emprat en la confecció del sensor.

Signat:

Joan Cho Heang Lee Vergés

Girona, 19 d'agost del 2012

## **10.- RELACIÓ DE DOCUMENTS.**

Els documents que constitueixen el present projecte titulat “ Aplicacions de la fibra òptica en la monitorització d'estructures: Influència dels canvis de temperatura”, són:

Document núm. 1	Memòria.
Document núm. 2	Annexos.

## 11.- BIBLIOGRAFIA.

### A.1.- Referències bibliogràfiques.

[01]: CAUSADO-BULEVAS. J.D, GOMEZ.D, GONZALEZ.E, JESSIE.D, TORRES.P  
Aplicaciones de sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica en estructuras civiles. Grupo de Fotónica & Opto-electrónica, Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Publicado en línea 04.10.2011.

[02]: CÓRDOBA. M . Procesos de fabricación de fibras ópticas. Tesina de la Universidad de Belgrano. Marzo 2003.

[03]: FRÖVEL. M . Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en materiales compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas. Tesis Doctoral . Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid. 2006

[04]: GLISIC.B, INAUDI.D. Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring. Ed Wiley 2007

[05] : INAUDI.D, CASANOVA.N, MARTINOLA.G, VURPILLOT.S, KRONENBERG.P  
"SOFO: Monitoring of Concrete Structures with Fiber Optic Sensors", 5th International Workshop on Material Properties and Design, Weimar, October 1998, Aedificatio Publishers, (p. 495-514)

[06]: INAUDI.D, VURPILLOT.S, GLISIC.B, KRONENBERG.P, LLORET.S. Long-term Monitoring of a Concrete Bridge with 100+ Fiberoptic long-gage Sensors. Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infraestructure & Manufacturing 1999, Newport Beach, USA.

[07]: INAUDI.D, DEL GROSSO. A, LANATA.F, BRUNETTI.G, FEDOLINO.M.  
Automatic and Remote Deformation Monitoring of the Genoa San Giorgio Pier Using SOFO Sensors. OFS 2000 14 th Internacional Conference on Optical Fiber Sensors, 11-13.10. 2000, Venice, Italy.



[08]: INAUDI.D, CASANOVA.N, GLISIC.B. Long-term deformation Monitoring of Historical Constructions with Fiber Optic Sensors 2001. (p.421-430)

[09]: LEE. B . Review of the present status of optical fiber sensors. School of Electrical Engineering, Seoul National University, Kwanak-Gu Shinlim-Dong. Seoul 151-744, South Korea. 28 August 2002.

[10]: LYÖRI.V. Structural Monitoring with Fibre-Optic Sensors Using the Pulsed Time-of-flight Method and Other Measurement Techniques. Department of Electrical and Information Engineering. University of Oulu 2007. (p.23-55)

[11]: MARTINEZ.F. Sensores de fibra óptica como instrumentos de monitorización en estructuras en condiciones de servicio. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. Febrero 2011.

[12]: M.MEASURES.R, Structural Monitoring with Fiber Optic Technology. Ed. Academic Press, San Diego, California 2001.

[13]: OFSETH. Optical Fibre Sensors Embedded into technical Textile for Healthcare. Proposal/ contract no: FP6-027 869.

[14]: PERREGAUX.N, VURPILLOT.S, TOSCO.J.S, INAUDI.D, BURDET.O. Vertical Displacement of Bridges using the SOFO System: a Fiber Optic Monitoring Method for Structures, 12th Eng. Mech. Conference "A Force for the 21<sup>st</sup> Century", 17-20. 05.1998, La Jolla- California, USA.

[15]: TOCA.M. Influencia de la forma del pulso de bombeo en la resolución de sensores distribuidos basados en dispersion estimulada de Brillouin en fibra óptica. Proyecto fin de Master. Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza. Curso 2010/2011

[16]: VALLINAS.A, BENITO.D . Sensores de fibra óptica: Fundamentos de medida y análisis de la oferta comercial. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de Navarra. Pamplona, Junio 2011.

[17]: VÉLEZ-HOYOS. F.J, MILENA.C GÓMEZ.N.D. Medición de microdeformaciones en losas viales usando sensores de redes de Bragg en fibras ópticas. Ingeniería y Ciencia, ISSN 1794-9165 Volumen 6, número 11, enero-junio de 2010, (p35-45).

[18]: WEN-CHEN JAU, SHIH-CHUN LIN, YUAN-CHENG PU, YUN-CHEN HSU. Application of Fiber Optics long-gage sensor on prestressed beams in early age.

#### **A.2.- Recursos Xarxa.**

[19]: ALAVA INGENIEROS. Tecnología de fibra óptica y su aplicación a la monitorización de estructuras civiles. (<http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/instrumentacion/medida-con-fibra-optica/> , 2 de Novembre )

[20]: Des Tec. RBGF- Redes de Bragg Grabadas en Fibra. 2009  
( [www.destec-corp.co](http://www.destec-corp.co), 8 de Novembre).

[21]: MICRON OPTICS. Optical Fiber Sensors Guide. Fundamentals & Applications.  
([http://www.micronoptics.com/sensing\\_doc\\_library.php](http://www.micronoptics.com/sensing_doc_library.php), 16 de Novembre)

#### **A.2.1.- Consultes a la xarxa.**

<http://www.alava-ing.es>  
[www.fibraopticahoy.com](http://www.fibraopticahoy.com)  
<http://www.fbgs.com/>  
<http://www.lunainnovations.com/>  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)  
<http://www.vishaypg.com/micro-measurements/>

#### **A.3.- Extracció de les figures via web.**

[22]:[http://www.pactual.com/articulo/actualidad/noticias/10366/barcelona\\_tendra\\_cobertura\\_total\\_fibra\\_optica.html](http://www.pactual.com/articulo/actualidad/noticias/10366/barcelona_tendra_cobertura_total_fibra_optica.html) )

[23]: <http://telecomjournalelsalvador.blogspot.com.es/2010/05/fibra-optica-la-luz-al-servicio-de-las.html>

[24]:[http://www.astarmathsandphysics.com/a\\_level\\_physics\\_notes/optics/a\\_level\\_physics\\_notes\\_snells\\_law\\_refraction\\_total\\_internal\\_reflection\\_critical\\_angle.html](http://www.astarmathsandphysics.com/a_level_physics_notes/optics/a_level_physics_notes_snells_law_refraction_total_internal_reflection_critical_angle.html)

#### **A.4.- Normes**

[25]: Normativa CTE-DB-SE-AE tracta sobre la seguretat estructural . Accions en l'edificació. L'informació tractada en aquest document es troba en l' annex E.

[http://www.apta.com.es/pdf/Normativa/CTE/DB\\_SE\\_AE.pdf](http://www.apta.com.es/pdf/Normativa/CTE/DB_SE_AE.pdf)