



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Determinació de desplaçament a partir de sensors continus de fibra òptica. Aplicació als ponts

Treball realitzat per:

**Antoni Secanell Garcia**

Dirigit per:

**Joan Ramón Casas Rius**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, 16 de juny de 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

## AGRAÏMENTS

Arriba el moment d'entregar el Treball Final de Màster, la meva última etapa acadèmica, i ja es hora d'enfrontar el futur. No obstant, no puc evitar, abans de fer aquest salt tant important, mirar enrere. Per acomiadar-me de certes etapes, felices i dures, però sobretot, per agrair aquells que m'han acompanyat i ajudat a assolir aquest punt.

Per començar, voldria donar les gràcies al meu tutor, Joan Ramón, i al doctorant António Barrias, per la paciència, comprensió i ajuda que m'han ofert durant la realització d'aquesta tesina.

Després, als meus amics i companys de carrera. Hem viscut molts anys junts, hem compartit moltíssimes coses, hem afrontat moments difícils, colze amb colze; quan les circumstàncies no auguraven bons resultats si estaves sol, ells sempre han estat allà, ajudant-me.

Però per últim, he d'agrair especialment el fet que estigui avui aquí, en aquest punt, a la meva família. Avis, tiets, cosins, la vostra alegria i ànims han sigut molt útils, espero que us hagi correspost igual de bé la vostra estima. Tanmateix, és el contacte diari, les abraçades en moments que creus que no ho aconseguiràs, la injecció d'autoestima quan no confies prou en tu mateix, les bromes quan estàs col·lapsat, allò que és vital per a sobreviure. Els meus pares i el meu germà Eduard m'han donat tot això i molt més, només desitjo que algun dia pugueu sentir-vos orgullosos de mi.

A tots vosaltres, moltes gràcies.

## RESUM

Avui en dia les infraestructures estan totalment integrades en la societat, bé sigui en xarxes viàries com ponts o túnels, com en sistemes de subministració per exemple. En el cas que alguna d'elles pateixi algun mal, l'afectació que podrien patir els habitants pot esdevenir considerable, un trasbals important per a l'administració, comunitat, etc. Per això, tant rellevant és la construcció de noves estructures que milloren la vida de les persones, com el correcte manteniment de les ja presents. Així doncs, no sorprèn que en les últimes dècades la investigació de mètodes per al manteniment d'estructures hagi augmentat en gran mesura. Un mètode és la definició d'una estratègia per a identificar els possibles danys que ha patit una estructura, el que es coneix com a Monitorització de la Salut Estructural (SHM).

Aquesta SHM consistia habitualment en inspeccions visuals realitzades per experts, no obstant s'ha millorat la precisió i l'efectivitat amb noves tecnologies com són els sensors de fibra òptica (OFS). Els OFS poden classificar-se mitjançant diversos criteris, però un criteri que s'ha assentat és el de la resolució. Els sensors distribuïts (DOFS) poden aconseguir altes resolucions espacials, o petites distàncies entre sensors, de fins a 1mm, de manera que els és possible identificar el comportament global de l'estructura així com detectar possibles afectacions com poden ser esquerdes o fissures.

En aquest document es realitza una investigació on es detallen les característiques d'aquests sensors distribuïts de fibra òptica, es classifiquen depenent de l'objectiu de la monitorització i es faciliten exemples d'altres estudis en el camp de l'enginyeria civil.

No obstant, la part principal d'aquest Treball Final de Màster consisteix en la determinació d'una metodologia que permeti l'obtenció de les deformacions d'una estructura a partir de les lectures d'un sistema de sensors distribuïts de fibra òptica. Es proporciona l'informe d'una prova de laboratori on s'analitzen els resultats i es comparen amb els d'un model teòric dissenyat per a aquest test, de manera que, amb conclusions positives es pugui assolir l'objectiu principal.

**Paraules clau:** Monitorització de Salut Estructural, fibra òptica, sensors distribuïts de fibra òptica, reflectometria de domini temporal, reflectòmetre de retrodispersió òptica, enginyeria civil, deformació, mòdul d'elasticitat

## ABSTRACT

Infrastructures are currently fully integrated in society, either in road networks such as bridges or tunnels or supply systems for example. In case any of them suffer any harm, the inhabitants affectation could be considerable, a significant disruption to the administration, community, etc. Therefore it is as important to build new structures that improve people's lives as the proper maintenance of the already present. So it is not surprising that in recent decades the methods for the structure maintenance researching has greatly increased. One of these methods consists in defining a strategy to identify structural damage, which is known as Structural Health Monitoring (SHM).

SHM used to consist in visual inspections performed by experts, however accuracy and efficiency have been improved by new technologies such as fiber optic sensors (OFS). OFS could be classified using different criteria, nevertheless the criteria that has settled is the resolution. Distributed sensors (DOFS) could reach high spatial resolutions, or small distances between sensors, up to 1mm, so it is possible to identify the structure overall behaviour as well as to detect possible effects such as cracks or fissures.

This paper research details the characteristics of these distributed fiber optic sensors, the classification by the monitoring purpose and provides examples of other studies in the civil engineering field.

However, the main part of this Master Final Project involves the determination of a methodology to obtain the structural strains using the monitoring sensing data. A report of a laboratory test results, that are analysed and compared with a theoretical model designed for this test, is provided.

**Keywords:** Structural Health Monitoring, distributed fiber optic sensors, time domain reflectometry, optical backscattered reflectometer, civil engineering, strain, elasticity modulus

## Índex

AGRAÏMENTS.....	1
RESUM.....	2
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS .....	11
Introducció .....	11
Objectius .....	12
REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA .....	13
Introducció .....	13
Monitorització de la Salut Estructural.....	13
Tipus de sensors .....	14
Sensors distribuïts de fibra òptica.....	16
Sensors de fibra òptica.....	16
Anatomia d'una fibra òptica.....	17
Sensors multiplexats de fibra òptica .....	19
Sensors distribuïts de fibra òptica.....	22
Time Domain Reflectometry (OTDR).....	24
Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR).....	31
Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA).....	32
Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) .....	33
Raman Optical Time Domain Reflectometry (ROTDR).....	34
Aplicacions de DOFS en Enginyeria Civil.....	34
Proves de laboratori .....	35
Canonades .....	41
Estructures Geotècniques .....	42
Ponts.....	44
Preses .....	45
Exemples en Altres Camps .....	46
METODOLOGIA PER A L'OBTENCIÓ DE FLETXES A PARTIR DE DOFS .....	47
Descripció de la prova .....	47
Obtenció de les deformacions .....	50
Càlcul de la curvatura.....	52
Obtenció dels girs.....	53
Interpolació amb funció quadràtica .....	54
Aproximació amb la Regla del Trapezi .....	55

Càlcul dels girs .....	56
Càlcul de les fletxes .....	57
Obtenció de les propietats mecàniques de l'estructura .....	61
Model Teòric .....	63
RESULTATS I DISCUSSIÓ .....	66
Comparació entre trams .....	66
Comprovació dels resultats amb el model teòric .....	67
Anàlisi de la relació $EI$ .....	72
Obtenció del mòdul d'elasticitat.....	76
Comparació amb un estudi amb sensors puntuals .....	80
CONCLUSIONS I RECOMANACIONS.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	84

## Índex de Figures

<b>Figura 1.</b> Col·lapse Pont Injaka .....	14
<b>Figura 2.</b> Galga, acceleròmetre i inclinòmetre .....	15
<b>Figura 3.</b> Composició Fibra Òptica .....	17
<b>Figura 4.</b> Esquema dels tipus de sensors de fibra òptica .....	19
<b>Figura 5.</b> Sensor multiplexat .....	20
<b>Figura 6.</b> Diagrama de multiplexació per divisió de longitud d'ona .....	20
<b>Figura 7.</b> Operació d'un sensor òptic FBG .....	21
<b>Figura 8.</b> Vista amplificada d'un FBG .....	21
<b>Figura 9.</b> Processos d'scattering en una fibra òptica .....	23
<b>Figura 10.</b> Esquema d'un sensor distribuït de Brillouin .....	24
<b>Figura 11.</b> Diagrama d'un OTDR .....	25
<b>Figura 12.</b> Rayleigh Backscattering .....	25
<b>Figura 13.</b> Reflexes de Fresnel creats per (1) entroncament mecànic, (2) mampares i (3) connectors oberts .....	26
<b>Figura 14.</b> Esdeveniment fusionat d'una zona morta llarga .....	27
<b>Figura 15.</b> Mesura de l'esdeveniment d'una zona morta .....	27
<b>Figura 16.</b> Zona morta d'atenuació .....	28
<b>Figura 17.</b> Mesura de la zona morta d'atenuació .....	28
<b>Figura 18.</b> Pols curt vs. pols llarg .....	30
<b>Figura 19.</b> Resolució de mostreig: (a) resolució alta. (b) resolució baixa .....	31
<b>Figura 20.</b> Canvi en la freqüència de la llum reflectida quan es sotmet a tensió .....	31
<b>Figura 21.</b> Esquema d'un BOTDR .....	32
<b>Figura 22.</b> Configuració d'un BOTDA .....	33
<b>Figura 23.</b> Geometria de la ranura (esquerra) i vista de detall de la fi de la zona d'unió (dreta) .....	36
<b>Figura 24.</b> Distribució de les tensions a compressió (a) i tracció (b) mesurades amb sensors distribuïts de Brillouin .....	37
<b>Figura 25.</b> Configuració del SHM proposat .....	37
<b>Figura 26.</b> Comparació de la pauta real de cisallament (a) i l'obtingut per un sistema OBR (b) (adaptat d'Article 91) .....	38
<b>Figura 27.</b> Detall de la instrumentació de la secció central del tram en mm (a) i imatge de la instrumentació de la biga abans del formigonat .....	39
<b>Figura 28.</b> Lectures de deformació obtinguts amb el sistema de DOFS per a una càrrega de 20 kN: En la zona comprimida del nivell 1 (a) i en la zona traccionada del nivell 3 (b) .....	39

<b>Figura 29.</b> Lectures de deformació obtinguts amb els sistema de DOFS per a càrregues superiors a 50kN .....	40
<b>Figura 30.</b> Diagrama de la biga en voladís (a) La fibra es va adherir a la biga dibuixant dos cicles i repartit en 10m i 797m de longitud en els dos extrems. En (b) es mostra la deformació obtinguda pel sistema .....	41
<b>Figura 31.</b> Resultats del test amb danys detectats (indicats amb les fletxes) .....	41
<b>Figura 32.</b> Diagrama del BOTDR per a pendents.....	42
<b>Figura 33.</b> Història de la distribució de les deformacions al llarg de l'eix de l'ancoratge K3-04	43
<b>Figura 34.</b> Configuració del BOTDA en el model (unitats en mm) .....	43
<b>Figura 35.</b> Pont de Götaälv a Gothenburg, Suècia .....	44
<b>Figura 36.</b> Pont de Sarajevo a Barcelona (a) i esquema general de la monitorització amb DOFS (b) .....	45
<b>Figura 37.</b> Esquema dels sensors en un dic de riu .....	46
<b>Figura 38.</b> Esquema de les dimensions de la biga.....	47
<b>Figura 39.</b> Secció tipus acotada.....	47
<b>Figura 40.</b> Distribució de les càrregues en l'estructura .....	48
<b>Figura 41.</b> Diagrama de la càrrega aplicada .....	49
<b>Figura 42.</b> Distribució de la fibra òptica en la biga.....	49
<b>Figura 43.</b> Esquema de la instrumentació amb fibra òptica OBR .....	50
<b>Figura 44.</b> Dades obtingudes amb un OBR per a una càrrega total de 100kN .....	51
<b>Figura 45.</b> Lectures d'interès per a una càrrega total de 100kN.....	51
<b>Figura 46.</b> Expressió per al càlcul de les curvatures.....	52
<b>Figura 47.</b> Curvatures obtingudes amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 21,5kN i 61kN (a) i curvatures obtingudes amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 100kN i 200kN (b).....	53
<b>Figura 48.</b> Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de girs .....	54
<b>Figura 49.</b> Funcions obtingudes amb la interpolació quadràtica de la curvatura per als casos de 100kN (a) i 200kN (b) .....	55
<b>Figura 50.</b> Integració per la regla del trapezi .....	55
<b>Figura 51.</b> Comparació dels girs obtinguts amb els dos mètodes, interpolació quadràtica i aproximació amb la regla del trapezi per als casos de càrrega de 100kN (a) i 200kN (b) .....	56
<b>Figura 52.</b> Girs obtinguts amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 61kN i 125kN (a) i girs obtinguts amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 200kN i 250kN (b) .....	57
<b>Figura 53.</b> Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de desplaçaments verticals (dos primers components) .....	58



<b>Figura 54.</b> Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de desplaçaments verticals (quart component).....	59
<b>Figura 55.</b> Translació de la llei de desplaçaments verticals.....	60
<b>Figura 56.</b> Fletxes obtingudes amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 40,5kN i 100kN <b>(a)</b> i fletxes obtingudes amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 150kN i 200kN <b>(b)</b> ...	60
<b>Figura 57.</b> Esquema d'una biga birrecolzada amb dues càrregues iguals i simètriques.....	61
<b>Figura 58.</b> Resultats obtinguts de la relació $EI$ .....	62
<b>Figura 59.</b> Esquema del model dissenyat amb el programa SAP2000.....	63
<b>Figura 60.</b> Resultats obtinguts amb les dues hipòtesis per a la configuració del mòdul d'elasticitat amb un sistema de càrrega de 100kN del pistó <b>(a)</b> i 200kN del pistó <b>(b)</b> .....	64
<b>Figura 61.</b> Comparació dels resultats entre els trams 1 i 3 i trams 2 i 4 per a càrregues de 40,5kN <b>(a)</b> , 100kN <b>(b)</b> i 150kN <b>(c)</b> .....	67
<b>Figura 62.</b> Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 0kN <b>(a)</b> i 1,84kN <b>(b)</b> .....	68
<b>Figura 63.</b> Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 21,5kN <b>(a)</b> i 40,5kN <b>(b)</b> .....	69
<b>Figura 64.</b> Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 61kN <b>(a)</b> , 100kN <b>(b)</b> , 125kN <b>(c)</b> , 150kN <b>(d)</b> i 200kN <b>(e)</b> .....	70
<b>Figura 65.</b> Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 250kN <b>(a)</b> i 300kN <b>(b)</b> .....	71
<b>Figura 66.</b> Resultats obtinguts de la relació $EI$ per al cas de càrrega de 100kN.....	72
<b>Figura 67.</b> Esquema d'una biga birrecolzada amb dues càrregues iguals i asimètriques.....	73
<b>Figura 68.</b> Resultats obtinguts de la relació $EI$ per al cas de càrrega de 61kN centrats <b>(a)</b> i desplaçats 26cm a la dreta <b>(b)</b> .....	74
<b>Figura 69.</b> Resultats obtinguts de la relació $EI$ per al cas de càrrega de 100kN desplaçats 29cm a la dreta .....	74
<b>Figura 70.</b> Resultats obtinguts de la relació $EI$ per als casos de càrrega de 125kN desplaçats 35cm <b>(a)</b> , 150kN desplaçats 43cm <b>(b)</b> i 200kN desplaçats 54cm <b>(c)</b> .....	75
<b>Figura 71.</b> Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures <b>(a)</b> i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic <b>(b)</b> per al cas de 61kN .....	77
<b>Figura 72.</b> Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures <b>(a)</b> i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic <b>(b)</b> per al cas de 100kN .....	77
<b>Figura 73.</b> Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures <b>(a)</b> i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic <b>(b)</b> per al cas de 125kN .....	78
<b>Figura 74.</b> Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures <b>(a)</b> i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic <b>(b)</b> per al cas de 150kN .....	79
<b>Figura 75.</b> Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures <b>(a)</b> i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic <b>(b)</b> per al cas de 200kN .....	79

**Figura 76.** Esquema de la distribució dels transductors de desplaçament en la biga ..... 80

**Figura 77.** Lectures dels transductors de desplaçament en funció del temps ..... 80

## Índex de Taules

<b>Taula 1.</b> Comparació de sensors extrínsecs i intrínsecs.....	18
<b>Taula 2.</b> Actuació de les tècniques de detecció mencionades.....	34
<b>Taula 3.</b> Característiques geomètriques de la secció tipus.....	48
<b>Taula 4.</b> Instants que es tindran en compte en l'estudi.....	50
<b>Taula 5.</b> Comparació dels resultats dels transductors amb els dels DOFS .....	81

## INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

### Introducció

En aquest Treball Final de Màster es tracta la implementació del sistema de sensors distribuïts de fibra òptica per a la monitorització d'estructures i detecció de deformacions i/o danys que puguin malmetre la seva estabilitat i la seva funcionalitat. Concretament s'estudien la precisió i fiabilitat del sistema de sensors distribuïts anomenat Reflectòmetre de Retrodispersió Òptica (OBR).

En primer lloc es presenten els objectius i motivacions que han dut a la realització d'aquest projecte. Seguidament es desenvolupa una revisió bibliogràfica que fonamenta amb coneixements teòrics del funcionament d'una fibra òptica i les tipologies de sensors pel que fa a l'obtenció de les dades. A més a més, es complementa aquesta informació amb una àmplia sèrie d'exemples d'estudis que s'han realitzat fins al dia d'avui amb sensors de fibra òptica en diversos camps de l'enginyeria civil.

En el següent capítol es presenta la prova de laboratori que s'ha realitzat en una biga simplement recolzada, on s'hi ha instrumentat un sistema de sensors OBR. Es desenvolupa el procediment utilitzat per a recollida de dades, així com també es mostren els primers resultats per a comparar diverses estratègies que s'han considerat. En aquest apartat es dissenya un model teòric que permetrà la comparació dels resultats per a conèixer-ne la fiabilitat i precisió.

Posteriorment, s'analitzen i es discuteixen els resultats obtinguts, es comparen amb els resultats que proporciona el model teòric i es determinen les propietats mecàniques de l'estructura, prèviament desconegudes. Per últim, s'observen les lectures de sensors puntuals que també monitoritzaven la biga i es comprova si ambdues tipologies de sensors defineixen el mateix comportament estructural.

Finalment, s'extreuen les conclusions pertinents d'aquest Treball Final de Màster i es proposen altres línies d'investigació futures necessàries per a seguir aprofundint en el desenvolupament d'aquesta prometedora tècnica.

## Objectius

Els sensors de fibra òptica són un tipus d'instrumentació que ha arrelat en molts processos constructius que es duen a terme avui en dia. Aquests són una tipologia de sensors en continu desenvolupament i, per tant, són objectes de diversos estudis que en determinen la precisió i les condicions on el seu rendiment és màxim, entre d'altres. Aquest Treball Final de Màster es centra en l'estudi dels sensors OBR, una tecnologia relativament nova. L'objectiu principal d'aquest projecte és la determinació d'una estratègia, una metodologia per obtenir els desplaçaments verticals a partir de les lectures de deformació que proporcionen els sensors.

Com s'ha detallat en la introducció, per assolir l'objectiu principal s'han utilitzat els resultats d'una prova de laboratori realitzada al Laboratori de Tecnologia d'Estructures on s'ha instrumentalitzat una biga de formigó simplement recolzada. Les característiques geomètriques d'aquesta biga eren fàcilment determinables; tanmateix, es desconeixien els valors exactes de les propietats mecàniques de l'estructura. Es pretén, doncs, complementar l'objectiu principal amb el disseny d'una estratègia que, amb la monitorització esmentada, obtingui amb precisió aquestes propietats.

Per últim, cal esmentar que els resultats i conclusions que s'obtindran amb la realització d'aquest Treball Final de Màster seran útils i s'utilitzaran en estudis de gran abast duts a terme pel Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

## REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA

### Introducció

#### Monitorització de la Salut Estructural

En el dia a dia de la societat, hi ha molts elements que fan la nostra vida més fàcil, simplifiquen i ajuden a que puguem realitzar les nostres tasques i voluntats; els vehicles, els mòbils i les xarxes en són exemples. Caldria destacar però un element essencial que pot arribar a percentatges del 8-10% en els pressupostos generals de diversos estats europeus, les infraestructures (Presupuestos Generales del Estado, 2015). Aquestes poden estar compostes per ponts, viaductes i edificis, entre d'altres, i assumeixen un rol molt important ja que formen part de xarxes i nodes vitals per al correcte desenvolupament de la societat.

L'ús continuat de les infraestructures, així com els increments de volum de transit o demanda degut al propi desenvolupament de la tecnologia i la societat, fan que aquestes afrontin una possible degradació a llarg termini. El correcte manteniment d'aquestes infraestructures augmentarà la competitivitat de la societat que en faci ús ja que, probablement, incrementarà la resiliència de l'estructura i, per tant, en un futur, reduirà costos. D'aquí es conclou l'extrema importància de conèixer en tot moment l'estat d'aquestes, de detectar amb rapidesa les possibles alteracions que l'estructura pugui patir i així poder prendre les mesures corresponents. Per aconseguir aquests objectius, una estructura moderna ha d'estar preparada amb un sistema que inclogui un "subsistema nerviós", un "cervell", i unes "línies de veu", que estarà contínuament operant i capaç de detectar les condicions de l'estructura (López-Higuera, 2011). D'aquest procediment se'n diu Monitorització de la Salut Estructural (SHM).

La SHM té com a objectiu donar, en cada moment durant la vida d'una estructura, un diagnòstic del "estat" dels materials constituents, de les diferents parts, i del conjunt complet d'aquestes parts que constitueixen l'estructura com un tot. L'estat de l'estructura ha de romandre en el domini especificat en el disseny, encara que això pot ser alterat per l'envelliment normal a causa de l'ús, per l'acció del medi ambient, i per esdeveniments accidentals. A més a més, gràcies a la dimensió temporal de la monitorització, que fa possible considerar l'historial de l'estructura mitjançant la base de dades, la SHM pot proporcionar també un pronòstic (evolució del dany, vida residual, etc.).

Si tenim en compte només la primera funció, el diagnòstic, es podria estimar que la Monitorització de la Salut Estructural és una forma nova i millorada de fer una avaluació no destructiva. Això és parcialment cert, però la SHM és molt més. Es tracta de la integració de sensors, materials intel·ligents, transmissió de dades, poder computacional i capacitat de processament dins de les estructures. Això fa possible reconsiderar el disseny de l'estructura i la gestió completa de la pròpia estructura com a part de sistemes més amplis.

Per tant, donada la rellevància de la identificació del dany, del diagnòstic, seria de suposar que la SHM porta segles desenvolupant-se, no obstant, no és del tot així. Han hagut de succeir alguns accidents greus per a que la motivació de millorar la seguretat augmentés. El col·lapse del Pont Injaka, on el procés de manufacturació va ser deficitari, n'és un exemple.



**Figura 1.** Col·lapse Pont Injaka

El Pont Injaka, situat a Mpumalanga, va col·lapsar el 6 de juliol de 1998, causant la mort de 14 persones. Era un pont continu de 7 trams d'una longitud total de 300 metres i es va dissenyar per a ser executat mitjançant el mètode d'empenta del dintell. Les causes del col·lapse resulten d'una llarga llista de defectes, com ara la manca de personal i de supervisió competent, o que el bec de llançament no fou prou rígid, però el fet realment destacable és que el col·lapse no va ser immediat, l'estructura va "avisar". Van aparèixer esquerdes en la coberta del pont com a senyals d'advertència de que les coses anaven malament, però ningú va prendre-les seriosament. Aquí rau la importància d'una correcta monitorització, avaluar el danys que puguin anar succeint i identificar-ne les causes.

### Tipus de sensors

Habitualment, l'avaluació de les estructures, siguin edificis, ponts, túnels, preses o qualsevol altra infraestructura civil, es duta a terme per enginyers preparats per a la inspecció visual, que pot ser poc acurada a causa de diferències en els seus antecedents per a l'avaluació de l'estat de seguretat. Per a completar l'eficiència d'aquestes inspeccions visuals, s'implementa la utilització de sensors.

L'ús de sensors de monitorització de la infraestructura té l'avantatge de permetre l'avaluació en línia, l'avaluació ràpida en cas d'accident i la reducció dels costos d'inspecció. A més de les aplicacions de monitorització, els sensors també estan actualment sent utilitzats en solucions estructurals que incorporen un control passiu i actiu.



En un principi, la SHM per a ponts de llarga longitud es basava en l'ús de sensors convencionals tals com galgues, acceleròmetres de tres eixos o inclinòmetres (Figura 2). El rendiment d'aquests sensors convencionals es considera raonable per a aplicacions en servei.



**Figura 2.** Galga, acceleròmetre i inclinòmetre

No obstant, aquests són sensibles a efectes ambientals com ara la temperatura, humitat, alcalinitat, etc. Aquesta sensibilitat va donar lloc a la necessitat de desenvolupar nous sensors que es caracteritzin per la seva robustesa i fiabilitat i que siguin capaços de proporcionar correctament tota la informació necessària per avaluar la salut de l'estructura.

Desafortunadament, la majoria d'aquests sensors actuen i donen informació d'un lloc puntual o d'una zona concreta. Això fa que, per a grans estructures, les nombre de sensors que s'hagin d'aplicar incrementi notablement fins a fer econòmicament inviable la monitorització. Les galgues de curt abast obtenen dades precises i útils d'un comportament local, que interpolant amb resultats d'altres galgues, poden ajudar en l'obtenció del comportament global. Tot i així, és possible que s'ometi informació important en llocs no instrumentalitzats on s'esdevingui una degradació. Aquest fet s'ha pogut corregir parcialment amb la utilització de galgues de llarg abast, cobrint extensions més grans i identificant comportaments globals amb més precisió. No obstant, la caracterització del comportament estructurals en llocs no instrumentats continua depenent d'algoritmes, que poden no tenir en compte variacions locals com ara fissures. Només els sensors basats en la tecnologia de fibra òptica aconsegueixen mesures integrals, quasi-distribuïdes o totalment distribuïdes en llargues longituds.



## Sensors distribuïts de fibra òptica

Els sensors distribuïts de fibra òptica (DOFS) ofereixen un mitjà atractiu per a la monitorització de la condició de les estructures civils. La versatilitat geomètrica dels sensors de fibra òptica (OFS), així com la capacitat a integrar-se dins dels diferents tipus d'estructures i materials, fa d'aquest tipus de sensors una solució interessant per a la detecció distribuïda. "En lloc de la detecció d'un esdeveniment discret, la monitorització de fibra òptica pot ser usat per a detectar un canvi en les propietats mecàniques que implica el deteriorament dels materials com ara l'envelliment de l'asfalt o el micro-esquerdament del formigó (*Livingston, 1998*).

Si és factible, els sensors sense cable poden oferir una alternativa a la monitorització per cable. Els sensors sense fils eliminen la necessitat de cablejat, i en conseqüència, redueix significativament el temps i el cost d'instal·lació. No obstant això, el principal problema dels sensors sense fils roman en assegurar la recarregabilitat de la font d'alimentació.

## Sensors de fibra òptica

Tot i que la fibra òptica encara no és capaç de competir completament amb les galgues extensomètriques pel que fa a preu i precisió, presenta algunes qualitats que les fan molt adequades segons la seva aplicació:

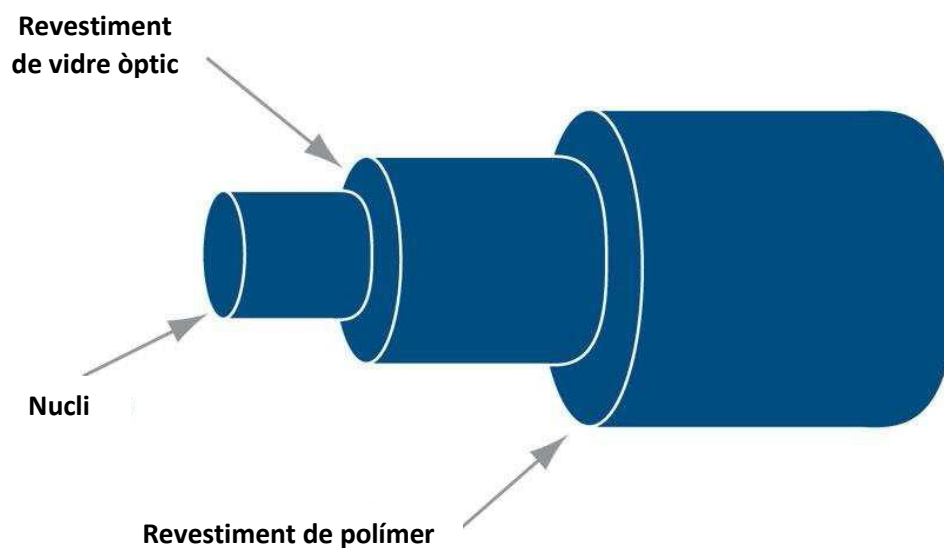
- Pes i volum reduït.
- Bona integració en materials compostos.
- Capacitat de mesurar directament paràmetres com la deformació o la temperatura.
- Elèctricament passiu.
- Immune a radiacions magnètiques.
- Bona resistència a corrosió i fatiga. Llarga vida.
- Capacitat de mesurar grans deformacions ( $>10000\mu\text{m}/\text{m}$ ) i treballar en un ampli rang de temperatures (4K - 950K).
- Alta sensibilitat i gran ample de banda.
- Fàcil d'instal·lar
- Possibilitat de multiplexació.

No obstant, també existeixen aspectes en els que la fibra òptica mostra certes debilitats:

- Fragilitat de la fibra. El radi de curvatura de la fibra ha de ser major de 10mm.
- Necessitat d'equips interrogadors.
- Mostra alta dependència de la temperatura. ( $\Delta\lambda/\lambda$  causat per  $1^\circ\text{C}$  és equivalent al causat per  $8\mu\text{m}/\text{m}$ ). Es necessita compensar l'efecte de la temperatura.

### Anatomia d'una fibra òptica

La fibra òptica acostuma a estar composta per un nucli central de vidre òptic ( $\text{SiO}_2$ ) d'entre  $5\mu\text{m}$  i  $10\mu\text{m}$  de diàmetre i d'un índex de refracció uniforme. Aquest nucli està envoltat per un revestiment també de vidre de fins a  $125\mu\text{m}$ ; l'índex de refracció d'aquesta segona capa és menor que la del nucli per tal de permetre la refracció total interna de la llum. A més a més, la fibra de vidre es recobreix addicionalment amb un tipus de polímer (uns  $250\mu\text{m}$ ) dissenyat per a protegir la superfície de la fibra de vidre de possibles abrasions (*Ansari, 1997*).



**Figura 3.** Composició Fibra Òptica

Aquestes dimensions son relativament grans si es pensa adherir la fibra òptica en material compost. Per exemple, el diàmetre d'una fibra de carboni està comprés entre valors de  $5$  a  $10\mu\text{m}$ . S'estan desenvolupant sensors de fibra òptica miniaturitzats que no superen les  $50\mu\text{m}$  de diàmetre amb la fi de minimitzar el possible efecte advers sobre el material on s'allotgi la fibra (*K. Satori, 2002*).

D'altra banda, com s'ha comentat, la diferència en l'índex de refracció entre el nucli i el primer revestiment fa que la llum, procedent d'una font, viatgi al llarg del nucli. D'aquesta manera, es poden recórrer grans distàncies sense una pèrdua significativa d'intensitat. Aquesta pèrdua només es apreciable per a valors de radi de curvatura per sota de  $30\text{m}$  o quan està sotmesa a forces transversals importants. Depenent del diàmetre i de l'índex de refracció del nucli i del revestiment, la fibra òptica podrà transportar un o varis modes de llum. Les fibres es denominen "de mode simple" o "multi-mode" en funció de si la fibra transmet un o múltiples modes de llum. És molt més fàcil treballar amb fibres multi-mode degut a que els grans diàmetres del nucli permeten una interconnexió més senzilla amb el terminal que transmet o rep la llum (*Ansari, 1997*).

Habitualment, en camps com el de les telecomunicacions, el polímer assumeix el paper d'absorbir els esforços que pugui patir el sensor per tal de minimitzar els efectes que puguin afectar a la fibra. No obstant, en enginyeria civil, s'intenta que els esforços

que rebi la fibra siguin similars, sinó iguals, als que rep l'estructura mateixa, de manera que les deformacions, i per tant les lectures, siguin idèntiques. Aquestes diferències de criteri marcaran l'elecció del polímer que s'usarà per al revestiment exterior.

Hi ha diverses formes de classificar els sensors de fibra òptica (OFS) depenent de les propietats que es considerin com ara el procés de modulació i desmodulació, l'aplicació, els punts de mesura, etc. (*Gholamzadeh, 2008*). Un esquema utilitzar per a la seva classificació és diferenciar entre intrínsecs i extrínsecs.

S'anomena intrínsec a un sensor de fibra òptica si el procés d'anàlisi de la llum que es transmet es duu a terme en la mateixa fibra. El sensor es considera extrínsec si, en canvi, la modulació es produeix fora de la fibra (*Merzbacher, 1996*). En els FOS extrínsecs, una vegada feix de llum amb uns paràmetres coneguts entra a la regió de modulació, emergeix amb una variació determinada en una de les seves característiques causada per alguna pertorbació externa o senyal ambiental (*Fuhr, 2004*). En el cas de sensors intrínsecs, una pertorbació externa causa un "canvi local de la guia d'ona de la fibra òptica" (*Fuhr, 2004*). En la Taula 1 es fa una breu comparació entre els FOS extrínsecs i intrínsecs.

**Taula 1.** Comparació de sensors extrínsecs i intrínsecs

FOS Extrínsec	FOS Intrínsec
Menys sensible	Més sensible
Més fàcil d'usar	Més difícil de protegir de pertorbacions externes no desitjades
Fàcil de multiplexar	Redueix els problemes de sensibilitat en la regió del modulador
Susceptible de patir problemes en la recepció/emissió	Depèn d'un sistema de desmodulació de la senyal més elaborat.
Més barat	Significativament més car
Menys robustesa i adaptabilitat a requeriments d'una instal·lació poc comú	Més robust i adaptable

No obstant, tenint en compte l'objectiu d'aquesta tesina, els FOS es categoritzaran en tres classes diferents: sensors d'interferometria, sensors basats en la difracció múltiple i sensors distribuïts (*Guo, 2011*). Aquesta última és la classe que es desenvoluparà en aquesta revisió bibliogràfica.

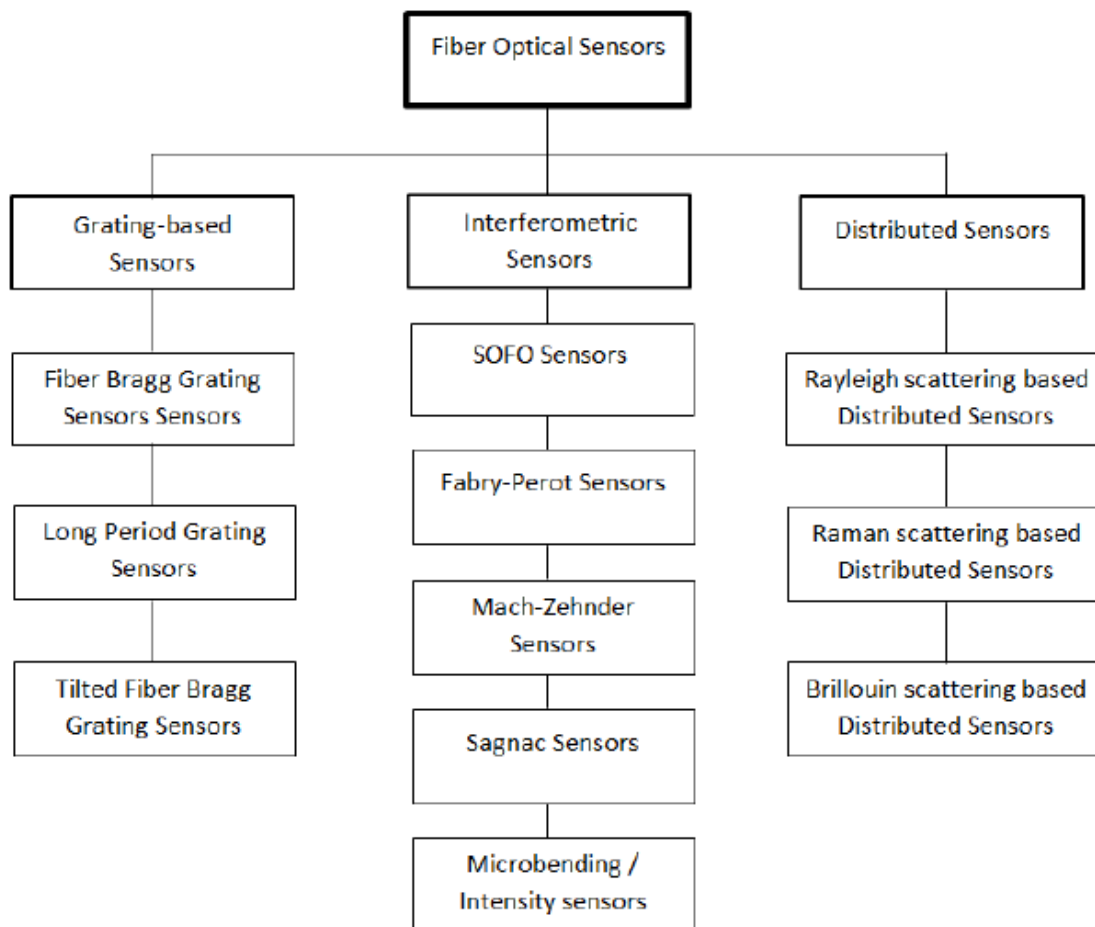


Figura 4. Esquema dels tipus de sensors de fibra òptica

### Sensors multiplexats de fibra òptica

En els exemples que es mostraran posteriorment, així com la prova de laboratori que s'ha realitzat s'han usat sensors distribuïts. Tanmateix, els DOFS són sensors relativament joves, no s'han acabat d'implementar en el mercat. De fet, els sensors més populars eren els multiplexats fins al punt en que 2/3 dels projectes amb SHM optaven per sensors quasi-distribuïts, concretament els sensors de difracció múltiple de Bragg (FBG) (Ferdinand, 2014).

La multiplexació es realitza sempre que es situen sensors de localització múltiple en intervals al llarg de la longitud de la fibra. L'objectiu de la multiplexació és mesurar un o diversos tipus de pertorbacions que es produeixen en una estructura, normalment de grans dimensions. Mitjançant un sensor multiplexat, l'usuari pot discernir i aïllar les lectures de cada sensor a partir de la freqüència o el temps característic de la seva senyal i així documentar, a temps real, els paràmetres de l'estructura (Merzbacher, 1996). Com es mostra en la següent figura, el sensor multiplexat proporciona el valor mig de les deformacions entre els punts d'ancoratge del sensor.

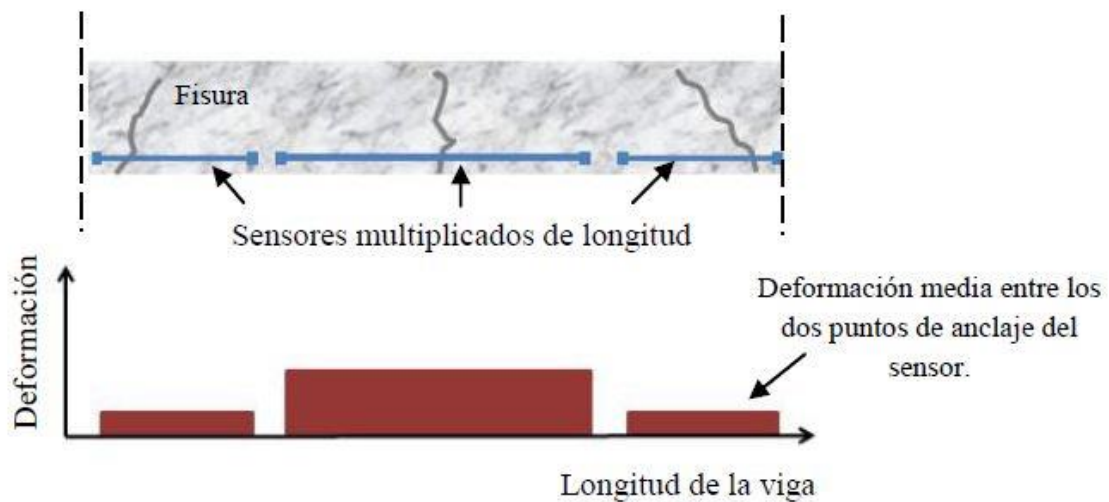


Figura 5. Sensor multiplexat

Una tècnica de multiplexació interessant es basa en la multiplexació de múltiples xarxes de Bragg a través de divisió de longitud d'ona (WDM) (Ansari, 1997). Per a aquesta tècnica, s'analitzen una sèrie de FBG usant una font de llum de banda ampla. Cada xarxa de Bragg té una longitud d'ona de reflectància lleugerament diferent de les altres; així és possible reconèixer i detectar el canvi en la longitud d'ona de cada sensor, relacionant aquest canvi amb la magnitud de la pertorbació que pugui ocórrer en algun lloc específic (Ansari, 1997).

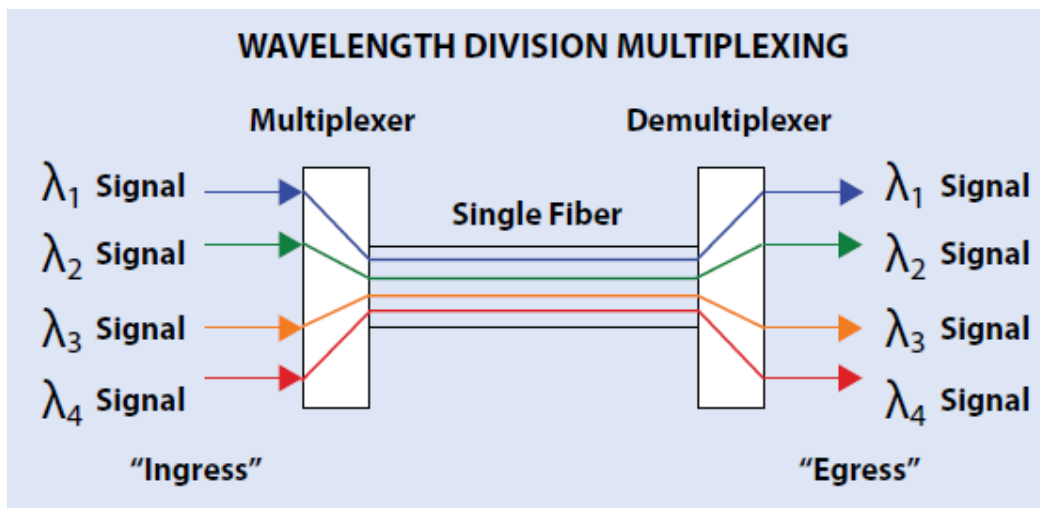


Figura 6. Diagrama de multiplexació per divisió de longitud d'ona

Quan un feix de llum d'ampli espectre s'envia a un FBG, alternant l'índex refractiu, les reflexions de cada segment interfereixen de forma positiva per a una longitud d'ona específica de llum, anomenada longitud d'ona de Bragg, descrita en la següent equació.

$$\lambda_b = 2n\Lambda$$

On  $\lambda_b$  és la longitud d'ona de Bragg,  $n$  és l'índex refractiu efectiu del nucli de la fibra i  $\Lambda$  és la separació de les xarxes, coneguda com al període de xarxa. Això provoca que el FBG reflecteixi una freqüència específica de llum al transmetre tota la resta.

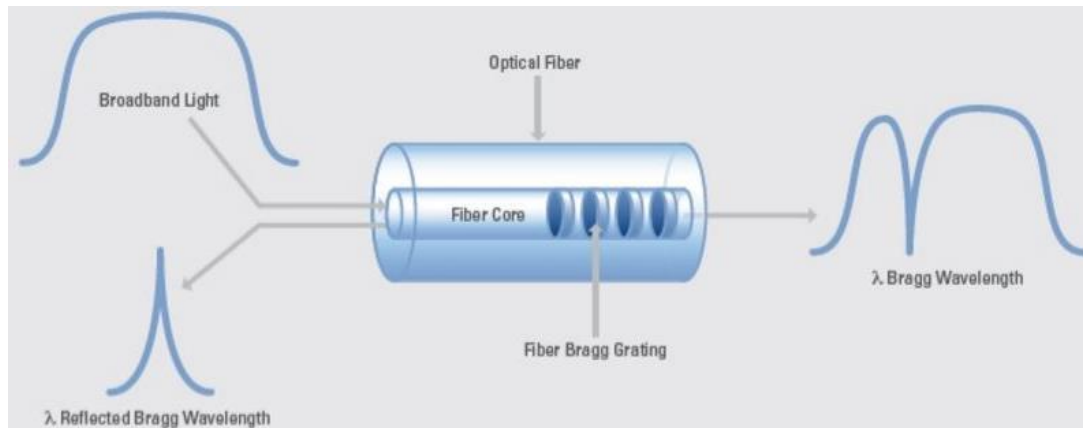


Figura 7. Operació d'un sensor òptic FBG

Degut al fet que la longitud d'ona de Bragg és una funció de la separació entre les xarxes ( $\Lambda$ ), els FBGs poden ser fabricats amb varies longituds d'ona de Bragg, el qual permet a diferents FBGs reflectir longituds d'ona de llum úniques.

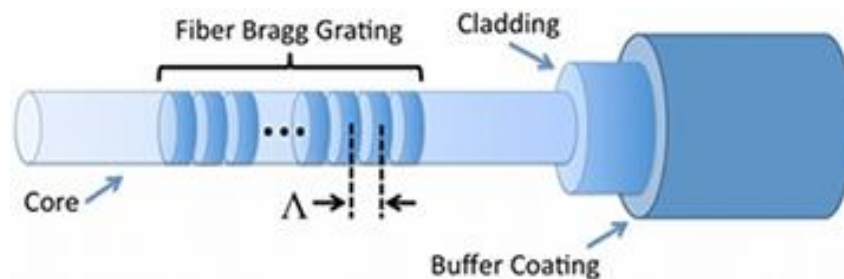


Figura 8. Vista amplificada d'un FBG

Els canvis en la tensió i la temperatura afecten l'índex refractiu efectiu ( $n$ ) i el període de xarxa ( $\Lambda$ ) d'un FBG, el qual resulta en un canvi en la longitud d'ona reflectida. El canvi de longitud d'ona d'un FBG degut a tensió i temperatura es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e) * \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) * \Delta T$$

On  $\Delta\lambda$  és el canvi de longitud d'ona i  $\lambda_0$  és la longitud d'ona inicial. La primera part de l'expressió descriu l'impacte que produeix una tensió en el canvi de longitud d'ona, on  $p_e$  és el coeficient de tensió òptica i  $\varepsilon$  és la tensió experimentada per la xarxa. Per altra banda, la segona part de l'expressió descriu l'impacte de la temperatura en el canvi de longitud d'ona, on  $\alpha_\Lambda$  és el coeficient d'expansió tèrmica i  $\alpha_n$  és el coeficient òptic tèrmic, descrivint l'expansió de la xarxa i el canvi en l'índex reflectiu respectivament.

No obstant, el procediment de divisió de longitud d'ona discretitza la fibra a un nombre màxim proper als 100 canals, un nombre suficient per a la majoria dels casos i preferible per la seva major precisió, però possiblement escàs si s'aplica en una gran estructura ja que no es podria cobrir la totalitat de l'estructura, és a dir, existirien zones sense monitoritzar. Per una banda, si l'estímul (variació de temperatura o deformació) apareix en una zona no instrumentada no seria possible la seva detecció. En canvi, si l'estímul té lloc en el rang que monitoritza el sensor, aquest indicaria una deformació mitja més gran de la normal entre els dos punts que delimiten la seva longitud. En aquest cas seria molt difícil la detecció del dany durant la seva iniciació, i aquest només seria apreciable en un estat avançat del dany (*Torres, 2014*).

Els sensors distribuïts ofereixen una alternativa a aquest tipus de problemes. Com indica el seu nom, es tracta d'un sensor continu a través de la fibra. Això significa que al llarg del cable òptic empleat en la monitorització es disposarà de tants punts de mesura com ho permeti la tecnologia utilitzada (actualment s'han aconseguit resolucions de centímetres).

### Sensors distribuïts de fibra òptica

En un sensor distribuït de fibra òptica (DOFS), cada element de la fibra s'utilitza per a l'objectiu de mesurar i transmetre dades. L'obtenció de paràmetres al llarg de la longitud de la fibra requereix l'ús de fibres òptiques distribuïdes, que permeten quantificar una mesura en funció de la longitud d'aquesta. La mesura indueix un canvi en la transmissió de la llum. La capacitat de realitzar mesures de múltiples punts fa que els sensors distribuïts s'adaptin notablement a l'ús en grans estructures. A més a més, simplifica considerablement el sistema de monitorització, ja que, a diferència dels sensors puntuals, que requereixen un cable cadascun, aquest es limita a un sol cable.

Com s'ha comentat prèviament, en un sensor distribuït es mesura el paràmetre d'interès amb una resolució espacial determinada en qualsevol punt al llarg d'un sol cable òptic. Els processos físics subjacents bàsics que realitza un DOFS es proporcionen mitjançant diversos processos de dispersió (scattering). A mesura que el feix de llum es propaga al llarg de la fibra òptica, una petita quantitat de llum es dispersa en cada punt de la fibra tornant enrere. Els tres processos de scattering són els següents:

- Raman scattering, causada per la interacció amb vibracions moleculars i rotacions en el vidre.
- Brillouin scattering, causada per la interacció amb les inhomogeneïtats creades per ones de so en la fibra (fonons acústics).
- Rayleigh scattering, causada pels reflexes de les possibles inhomogeneïtats en l'índex de refracció, fixat en la producció de la fibra.

Quan s'analitza la llum que retorna (backscattered light) en el domini de la longitud d'ona, es pot observar que la component del Rayleigh scattering és de la mateixa longitud d'ona que la llum incident ( $\lambda_0$ ). Hi ha dos components del Raman scattering desplaçades per igual per sobre (component d'Stokes) i per sota de  $\lambda_0$



(component d'Anti-Stokes). De la mateixa manera, el Brillouin backscatter consta també de dos components desplaçats per sobre i per sota de  $\lambda_0$ . En la Figura 9 es pot veure la distribució.

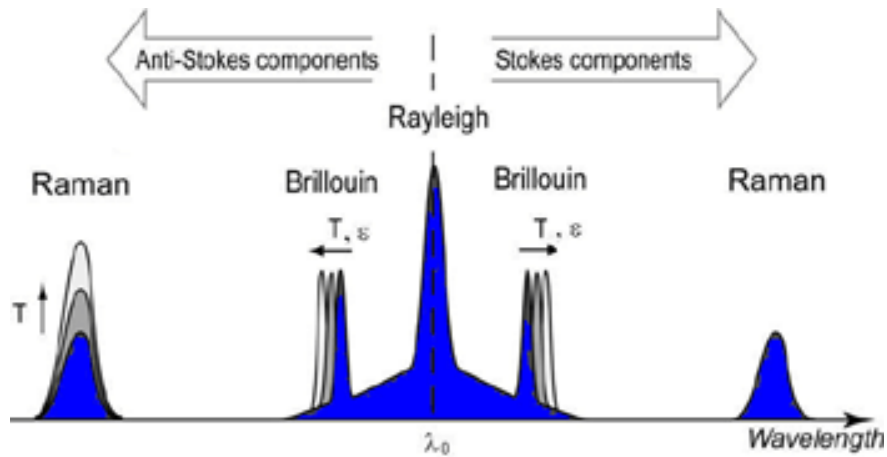


Figura 9. Processos d'escattering en una fibra òptica

El fet que fa d'aquests processos d'escattering interessant per als sensors òptics és que la propietat de la llum dispersada (backscattered light) depèn de la tensió i/o la temperatura de la fibra. Com s'ha indicat en la Figura 9, la intensitat de la component d'Anti-Stokes de Raman incrementa en augmentar la temperatura  $T$  mentre que la component d'Stokes pot ser considerada independent d'aquesta. Per tant, tenint en compte la diferència entre les dues, es pot extreure l'efecte que causa la temperatura en l'estructura de forma inequívoca. En el cas de Brillouin scattering, els canvis en la tensió o temperatura ( $\epsilon$  i  $T$  respectivament) produeixen una variació en la longitud d'ona, incrementant la diferència amb la longitud d'ona inicial  $\lambda_0$  i la component de Rayleigh. Per tant, obtenint el canvi esmentat en la longitud d'ona de la backscattered light, se n'extreu l'efecte causat per ambdós paràmetres (Lopez-Higuera, 2002).

Adicionalment, per a separar els efectes que causen la tensió i la temperatura, es pot instal·lar un cable de referència sense unir-lo rigidament a l'estructura, de manera que només la temperatura hi interactuï.



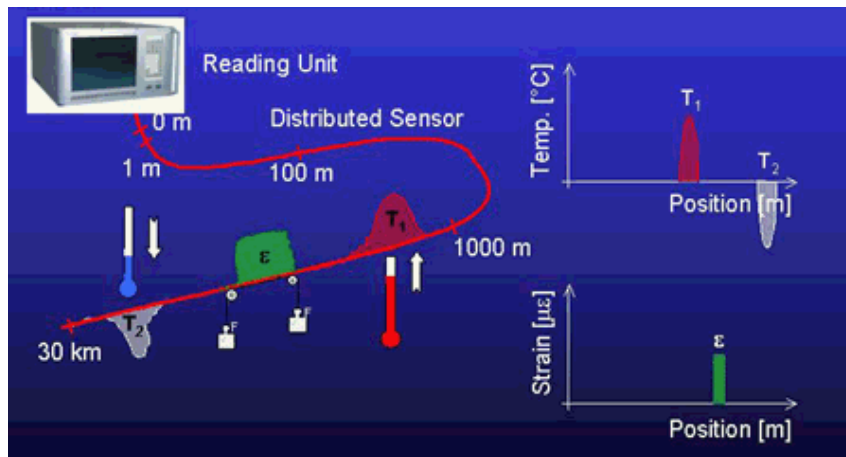


Figura 10. Esquema d'un sensor distribuït de Brillouin

Existeixen diverses tècniques d'extreure la distribució espacial, a continuació es descriuran algunes d'elles.

### Time Domain Reflectometry (OTDR)

La forma més comuna d'extreure la distribució espacial és l'ús d'un pols de llum i enregistrar les característiques de la backscattered light en el temps. Aquest procés és l' Optical Time Domain Reflectometer (OTDR).

Un OTDR combina una font de llum (o làser) i un detector per a proporcionar una vista de l'interior de la fibra. Aquesta font de llum envia una senyal cap a la fibra, on el detector rebra la llum reflectida de diferents elements del cable. Aquest procés produeix una traça en una gràfica feta a partir de la senyal rebuda, i llavors es genera una taula d'esdeveniments de post-anàlisi que conté informació completa sobre cada component de la xarxa. La senyal que s'envia és un pols curt que porta una certa quantitat d'energia. A continuació, es calcula, amb molta precisió, el temps de circulació del pols, que esdevé distància al conèixer les propietats de la fibra. A mesura que el pols es desplaça al llarg de la fibra, una petita part de l'energia d'aquest torna al detector a causa de la reflexió de les connexions i de la pròpia fibra. Quan la totalitat del pols ha tornat al detector, immediatament s'envia un altre, repetint el procés fins que finalitza el temps d'obtenció, aconseguint, d'aquesta manera, molts resultats. Finalment, d'aquestes dades se'n farà una mitjana per a cada segon per a proporcionar així una imatge clara dels components.

Un cop s'ha finalitzat l'obtenció de dades ja es pot processar la senyal per a calcular diversos paràmetres com ara la distància, la pèrdua i la reflexió de cada pertorbació o l'atenuació de la fibra. El principal avantatge d'utilitzar un OTDR és que només necessita un operador per a qualificar el cable o trobar algun error en la xarxa. A continuació es pot veure un diagrama del procediment esmentat:

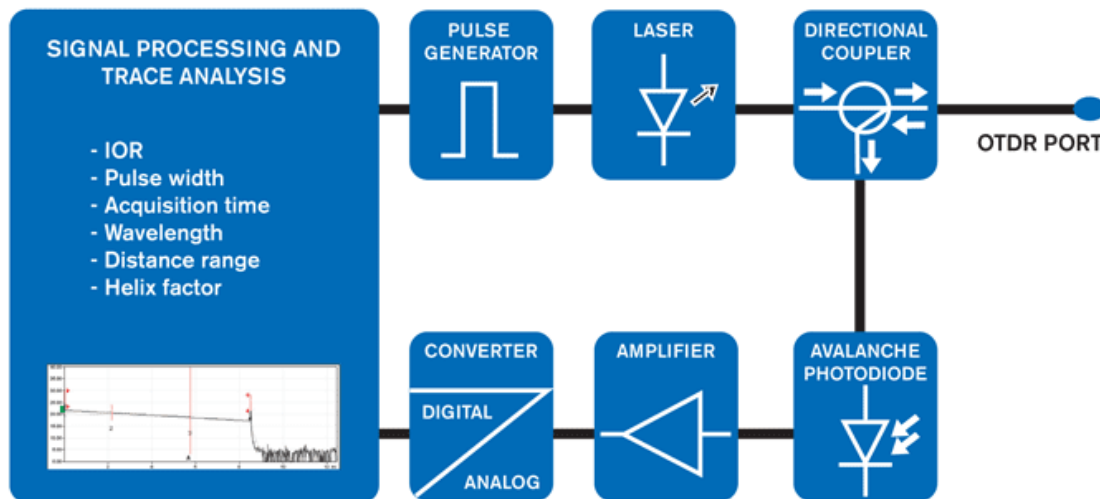


Figura 11. Diagrama d'un OTDR

### Tipus de Reflex

Com s'ha examinat anteriorment, la OTDR proporciona una imatge del cable mitjançant la lectura del nivell de llum que retorna del pols que s'ha emès. Aquesta quantitat de llum es pot discernir en dos tipus diferents: un nivell baix constant creat per la fibra anomenat "Rayleigh backscattering" i un pic d'alt reflex en els punts de connexió anomenat "reflex de Fresnel". El Rayleigh backscattering s'usa per a calcular el nivell d'atenuació en la fibra en funció de la distància, que es representa amb una pendent recta en la traça d'un OTDR. Aquest fenomen es produeix pel reflex natural i l'absorció d'impureses dins de la fibra òptica. Quan hi impacta, algunes partícules redirigeixen la llum en diverses direccions, creant així una certa atenuació de la senyal i retrodispersió (backscattering). Les longituds d'ona més altes pateixen una menor atenuació que les baixes i, per tant, requereixen de menys energia per a viatjar la mateixa distància en una fibra estàndard. La Figura 12 il·lustra el Rayleigh Backscattering.

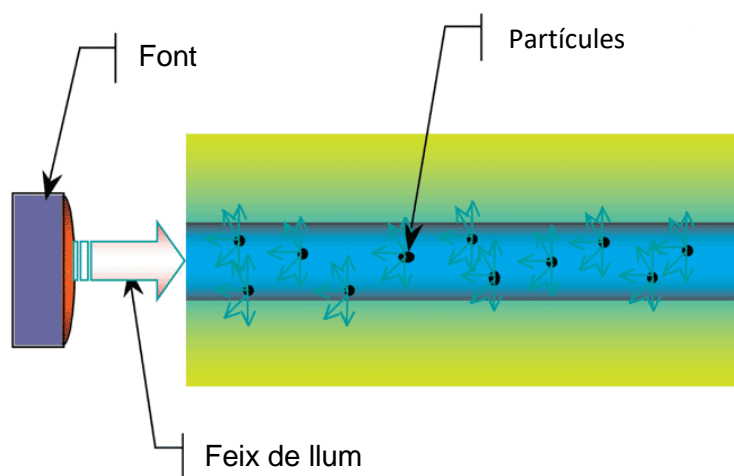


Figura 12. Rayleigh Backscattering

El segon tipus de reflex que utilitza un OTDR és el reflex de Fresnel, que detecta les pertorbacions físiques al llarg de la fibra. Quan la llum incideix en un canvi brusca en l'índex de refracció (per exemple de vidre a aire) una quantitat major de llum reflecta enrere, creant el reflex de Fresnel, que pot arribar a ser milers de vegades major que el Rayleigh Backscattering. Així doncs, el reflex de Fresnel és fàcilment identificable pels pics en la traça d'un OTDR. Alguns exemples que puguin produir tals reflexes són els connectors oberts, entroncaments mecànics, mampares o el trencament de fibres (Payne, 1977). En la Figura 13 es mostren diferents connexions que creen el reflex de Fresnel.

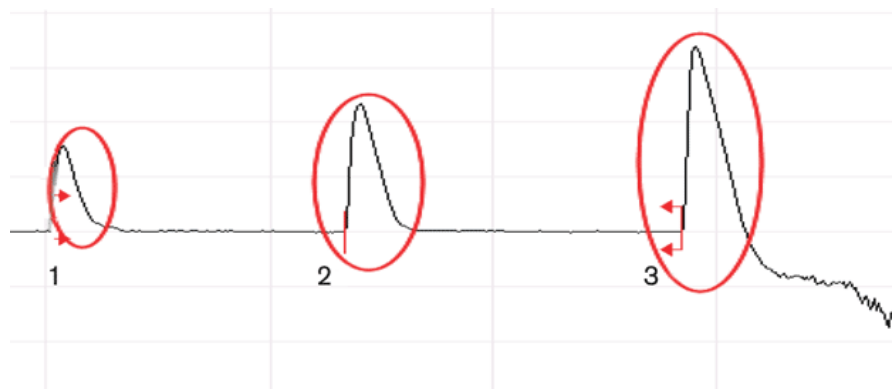


Figura 13. Reflexes de Fresnel creats per (1) entroncament mecànic, (2) mampares i (3) connectors oberts

#### Zones Mortes

Els reflexes de Fresnel condueixen a una especificació important de l'OTDR coneguda com a "zones mortes". Hi ha dos tipus de zones mortes: d'esdeveniment i d'atenuació. Ambdues s'originen a partir dels reflexes de Fresnel i s'expressen en unitats de distància (metres), que varia depenent de la força dels reflexes esmentats. Una zona morta es defineix com a la quantitat de temps durant la qual el detector està engegat temporalment per una alta quantitat de llum reflectida, fins que aquest es recupera i pot obtenir lectures altre cop. De manera més senzilla es comparable a la situació que es pot trobar algú conduint de nit i es creua amb un altre vehicle que circula en direcció oposada, durant uns instants la vista queda engegada. En l'àmbit que s'està estudiant, el temps es converteix en distància; per tant, un reflex major implicarà més temps que el detector necessitarà per a recuperar-se, resultant en una zona morta major (Ref Szewczyk, 2004).

La zona morta d'esdeveniment és la distància mínima després d'un reflex de Fresnel en què un OTDR pot detectar un altre esdeveniment. En altres paraules, és la longitud mínima de fibra necessària entre dos esdeveniments reflectants. Utilitzant l'exemple anterior del cotxe que engega el conductor, després d'uns segons es pot observar un objecte en a trajectòria sense ser capaç d'identificar-lo correctament. En el cas d'un OTDR, es detecta la pertorbació consecutiva però la pèrdua no es pot mesurar (com s'il·lustra en la Figura 14).

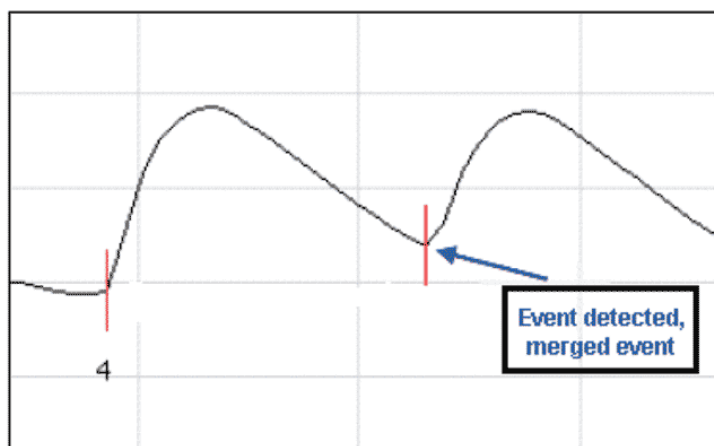


Figura 14. Esdeveniment fusionat d'una zona morta llarga

L'OTDR fusiona els esdeveniments consecutius i retorna un reflex global i la pèrdua de tots els esdeveniments fusionats. Segons les especificacions utilitzats en la indústria, el mètode més comú és mesurar la distància a -1,5 dB a cada costat del pic del reflex (Figura 15).

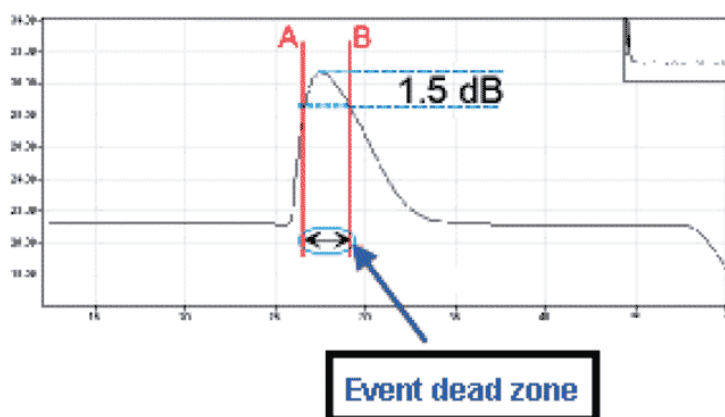


Figura 15. Mesura de l'esdeveniment d'una zona morta

La importància de tenir zones mortes d'esdeveniment el més curt possibles és considerable ja que permet que l'OTDR detecti perturbacions poc distanciades en el cable. Per exemple, quan es proven les xarxes locals es requereix un OTDR amb zones mortes d'esdeveniment curtes degut a que els cables de connexió que enllacen els diferents centres de dades són extremadament curts. Si les zones mortes són massa llargues, alguns connectors poden passar-se per alt i no ser identificats pels tècnics, el que fa més difícil de localitzar un problema potencial.

Per altra banda, la zona morta d'atenuació és la distància mínima després d'un reflex de Fresnel en què un OTDR pot mesurar amb precisió la pèrdua d'un esdeveniment consecutiu. Utilitzant de nou l'exemple anterior, després d'un breus

instantans, els ulls s'han recuperat prou com per a identificar i analitzar la naturalesa de l'objecte que hi ha en la trajectòria.

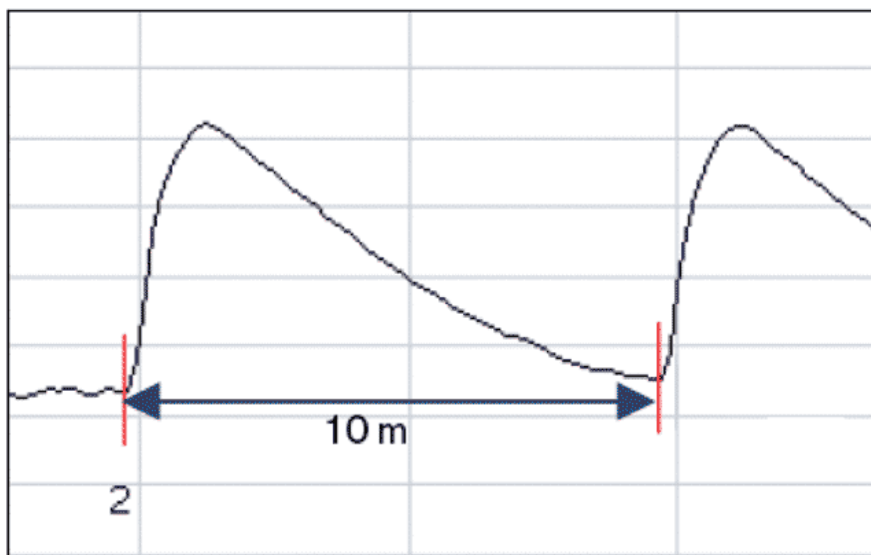


Figura 16. Zona morta d'atenuació

Com mostra la Figura 16, el detector té prou temps per a recuperar-se i, per tant, detectar i mesurar la pèrdua de l'esdeveniment consecutiu. La distància mínima necessària es mesura des del començament d'un reflex fins que la reflexió és de nou a 0,5dB sobre el nivell de backscattering de la fibra, com es mostra en la Figura 17 a continuació.

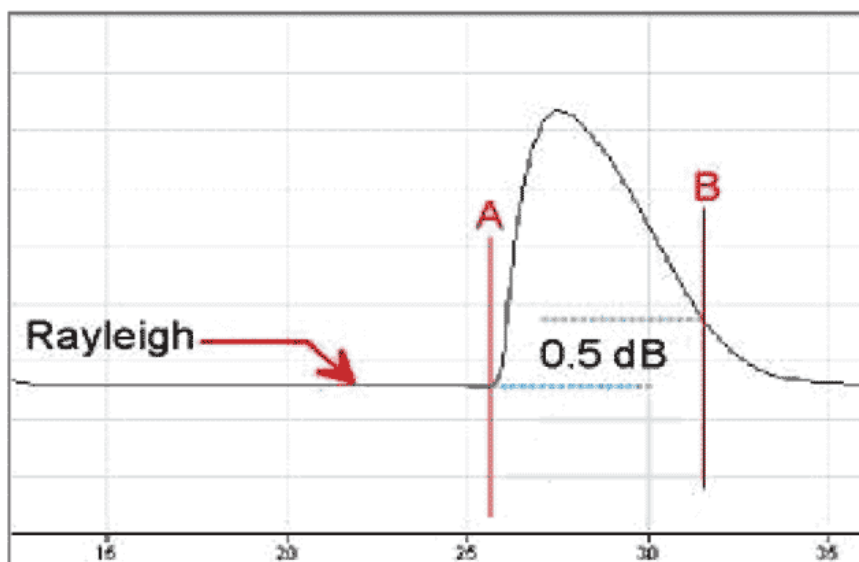


Figura 17. Mesura de la zona morta d'atenuació

Les zones mortes d'atenuació curtes permeten a l'OTDR detectar un esdeveniment consecutiu i obtenir la pèrdua d'esdeveniments pròxims entre sí. Per exemple, la pèrdua d'un cable de connexió curt dins d'una xarxa ara es pot conèixer, el que ajuda als tècnics a tenir una idea clara del que passa dins del cable. Les zones mortes

també es veuen influïdes per un altre factor: l'amplada de senyal. Les especificacions d'aparells d'OTDR recomanen utilitzar una amplada de senyal curta per a reduir les zones mortes. No obstant, les zones mortes no sempre tenen la mateixa longitud, sinó que la seva variació incrementa a mesura que s'augmenta l'amplada de senyal (*Avantek, 1980*).

### Rang Dinàmic

Un paràmetre important d'un OTDR és el rang dinàmic. Aquest paràmetre revela la pèrdua òptica màxima que un OTDR pot analitzar des del nivell de retrodispersió (backscattering) en el detector degut a una pertorbació específica. En altres paraules, és la longitud màxima de la fibra a la que un pols pot arribar. Per tant, com més gran és el rang dinàmic (en dB), major serà la distància assolida. Evidentment, la distància màxima varia d'una aplicació a una altra ja que la pèrdua del cable que es prova és diferent. Alguns dels factors que redueixen la longitud màxima d'un OTDR són els connectors, els entroncaments i els divisors. Així doncs, la clau per augmentar la distància màxima mesurable és fent una mitjana durant el període de temps més llarg i usant el rang de distàncies apropiat.

Una bona regla general és triar un OTDR amb un rang dinàmic d'entre 5 i 8dB major que la pèrdua màxima que es trobarà. Per exemple, un OTDR monomode amb un rang dinàmic de 35dB té un rang dinàmic utilitzable d'aproximadament 30dB. Suposant que l'atenuació d'una fibra típica és de 0,20 dB/km a 1550nm i que té entroncaments cada 2km (pèrdua de 0,1dB per entroncament), una unitat com aquesta seria capaç de certificar amb exactitud les distàncies de fins a 120km. Es podria calcular de forma aproximada la distància màxima dividint l'atenuació de la fibra al rang dinàmica de la OTDR. Això ajuda a determinar quin rang dinàmic permetrà a la unitat arribar al final de la fibra. S'ha de tenir en compte que una major pèrdua que hi hagi a la xarxa, requerirà un major rang dinàmic (*Raymond, 2001*).

### Amplada de senyal

L'amplada de senyal és el temps durant el qual el làser està encès. Com s'ha comentat anteriorment, en aquest camp el temps es converteix en distància, de manera que l'amplada de senyal de unitats de longitud. En un OTDR, el pols transporta l'energia necessària per a crear la retrorreflexió que caracteritza el cable. Com més curt el pols, menys energia porta i més distància viatja degut a la pèrdua al llarg de la fibra (apareixen l'atenuació, connectors, entroncaments, etc.). Un pols llarg transporta molta més energia per al seu ús en fibres extremadament llargues. La Figura 18 il·lustra l'amplada de senyal en funció del temps.

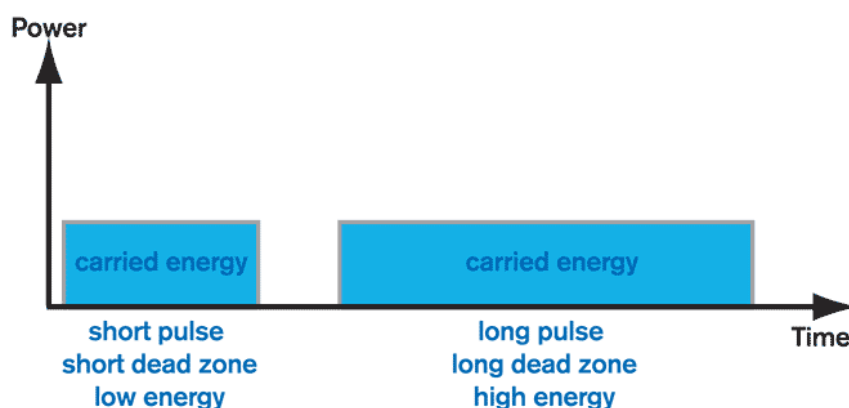


Figura 18. Pols curt vs. pols llarg

Si el pols és massa curt, perd l'energia que porta abans d'arribar al final de la fibra, causant que el nivell de backscattering sigui massa baix en el punt on la informació es perd. Un altre símptoma és quan la traça es torna massa "sorollosa" (resultats poc definits) a prop de l'extrem de la fibra, l'OTDR ja no pot continuar amb l'anàlisi i els resultats poden ser defectuosos (Raymond, 2001).

Quan la traça es torna sorollosa, hi ha dues maneres fàcils d'obtenir una traça més neta. En primer lloc, el temps d'adquisició es pot augmentar, el que es tradueix en una millora considerable del signal-to-noise(SNR), és a dir, la relació entre senyal neta i sorollosa; i a la vegada es manté la bona resolució del pols curt. No obstant, augmentar el temps de mitjana té els seus límits, ja que no millora l'SNR indefinidament. Si la traça encara no és prou suau, s'hauria d'utilitzar el segon mètode, que consisteix a utilitzar el següent pols major disponible(més energia). Tanmateix, s'ha de tenir en compte també que les zones mortes s'estenen a la vegada que l'amplada de senyal. Afortunadament, la majoria d'OTDR en el mercat tenen un mode automàtic que selecciona l'amplada de senyal apropiada per a la fibra que es prova; aquesta opció és molt convenient quan es desconeix la longitud o la pèrdua de la fibra testada.

En la caracterització d'una xarxa o una fibra, és obligatori seleccionar l'amplada de senyal adequada per al cable que es prova. En el cas que les perturbacions estiguin poc espaciades quan es prova un cable curt, s'utilitzen una amplada de pols curta, zones mortes curtes i baixa potència, mentre que s'utilitzen una amplada de pols llarga, zones mortes llargues i alta potència per a aconseguir majors distàncies per a les xarxes més llargues o xarxes on es produeixin pèrdues altes.

#### Resolució de mostreig i punts de mostreig

La capacitat d'un OTDR per assenyalar la distància correcta d'una perturbació es basa en una combinació de diferents paràmetres, entre els que estan la resolució de mostreig i dels punts de mostreig. La resolució de mostreig es defineix com a la distància mínima entre dos punts de mostreig consecutius adquirits per l'instrument. Aquest paràmetre és crucial, ja que defineix la precisió màxima de la distància i la capacitat de l'OTDR de trobar perturbacions. Depenent de l'amplada de senyal seleccionada i el rang

de distància, aquest valor pot variar de 4 cm fins a uns pocs metres. En conseqüència, ha d'haver un elevat nombre de punts de mostreig presos durant una adquisició per mantenir la millor resolució possible. La Figura 19 il·lustra el paper que juga l'alta resolució en la localització d'entroncaments.

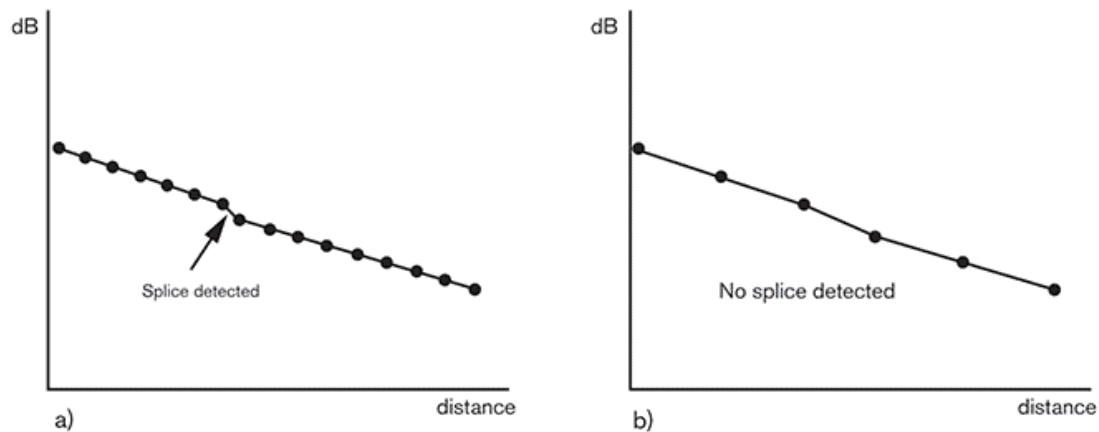


Figura 19. Resolució de mostreig: (a) resolució alta. (b) resolució baixa

Com es pot observar, tenir un alt nombre de punts de mostreig resulta en una alta resolució (poca distància entre punts), cosa que ajuda notablement a l'hora de trobar entroncaments (Doornink, 2004).

### Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR)

El principi físic d'un BOTDR consisteix en mesurar el canvi en la freqüència de la llum que viatja en una fibra òptica sotmesa a deformacions. La Figura 20 il·lustra qualitativament l'efecte de la freqüència de la llum reflectida quan la fibra òptica es sotmet a canvis tensionals.

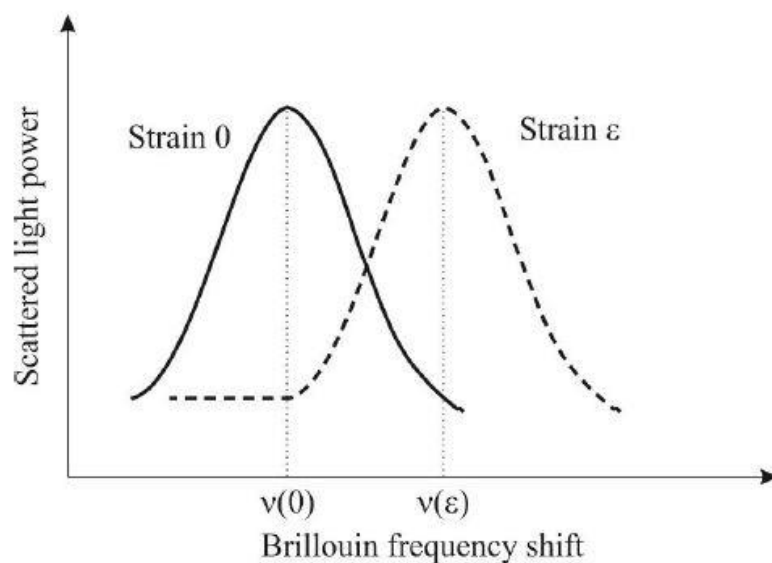


Figura 20. Canvi en la freqüència de la llum reflectida quan es sotmet a tensió



La idea és simple, però l'equip que es requereix és molt sofisticat, ja que s'ha de mesurar el canvi en la freqüència de la llum en distàncies curtes (uns pocs metres) i llargues (alguns quilòmetres). Aquesta llum és transmesa per l'equip (BOTDR) a través de la fibra òptica i es reflecteix cap enrere de manera que es poden observar els canvis en la freqüència. Hi ha diversos autors que tracten el tema com ara (*Horiguchi, 1989*) que parla de la teoria darrere de la tecnologia, o bé (*Ohno, 2001*), (*Thévenaz, 1998*) i (*Hao, 2008*) que presenten aplicacions particulars. Aquests últims autors utilitzen aquesta tecnologia per controlar les esquerdes en elements estructurals de formigó, i es conclou que la fibra ha de ser incrustada en l'element per tal de detectar amb més la tensió a la que està sotmesa l'estructura. Més recentment, (*Sun, 2014*) van utilitzar la tecnologia d'un BOTDR amb èxit per controlar les fractures induïdes per la corrosió en una columna de formigó.

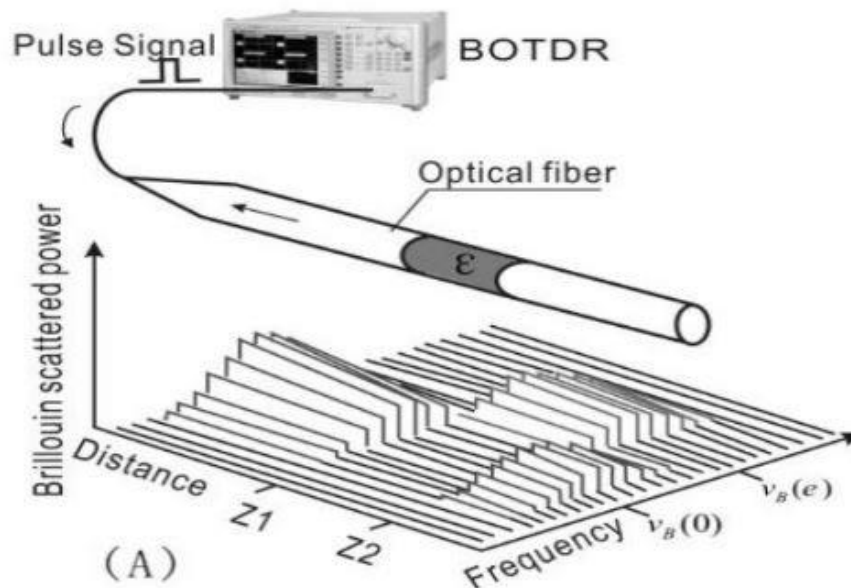


Figura 21. Esquema d'un BOTDR

### Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)

Per altra banda, estimulant el Brillouin scattering en el que es basa el BOTDR es pot desenvolupar una tècnica més avançada, el Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Aquesta tècnica usa dos làsers contra-propagats i un sistema de detecció per a sensors de gran longitud combinats amb una alta resolució de deformacions i temperatura per a distàncies que poden arribar als 50km sense regeneració de senyal (*Bao, 2012*).

En un BOTDA s'emet un pols en un extrem de la fibra que es propaga per la seva longitud, mentre que des de l'extrem oposat s'emet una ona continua (CW) que analitza la fibra. En aquesta configuració, el pols genera un increment en la freqüència de Brillouin. L'estimulació del Brillouin scattering té lloc quan la diferència entre la freqüència de la CW i del pols és igual a la freqüència de Brillouin de la fibra òptica. A més a més, la freqüència de Brillouin d'una fibra pateix variacions a causa de l'aparició

de deformació o temperatura. Així doncs, aquest canvi en la freqüència de Brillouin proporcionarà informació de les deformacions o temperatura que pot patir la fibra. La següent equació expressa aquesta relació:

$$\nu(\varepsilon, T) = \nu(0, 0) + C1 * \varepsilon + C2 * T$$

On  $\nu$  és la freqüència,  $\varepsilon$  la deformació,  $T$  la temperatura i  $C1$  i  $C2$  són els coeficients de deformació i temperatura respectivament, que es consideren habitualment de 0,05MHz/microdeformació i 1,2MHz/°C per a fibres òptiques convencionals usades en rangs de longitud d'ona de 1500nm (Song, 2005).

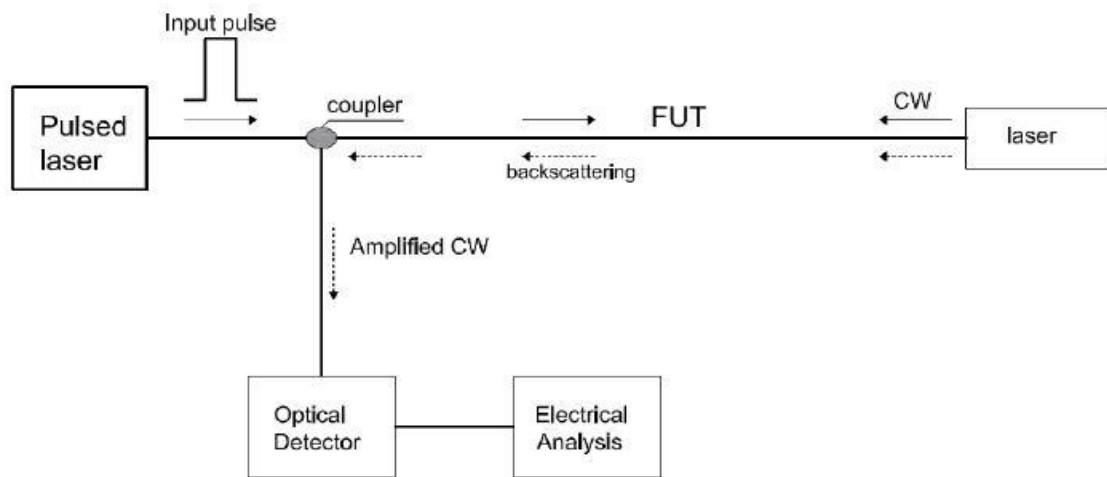


Figura 22. Configuració d'un BOTDA

### Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)

Els procediments o tècniques que s'han descrit en els apartats anteriors tenen resolucions diferents. Quan el criteri per escollir la fibra o tècnica de monitorització prima una alta resolució, de l'ordre de mil·límetres, usar un Optical Frequency Domain Reflectometer (OFDR) pot ser una bona elecció (Von der Weid, 1997)(Oberson, 2000). Aquest procés consisteix en dividir la llum d'una font làser sintonitzable (TLS) i enviar-la a través d'uns braços de referència de mesurament i estàtica d'un interferòmetre i recombinar-la en un detector òptic (Eickhoff, 1981). Quan la freqüència del làser es sintonitza es generen les franges d'interferència (Glombitza, 1993). Aquestes franges es detecten i es relacionen amb l'amplitud òptica i resposta fàstica del sistema, o del dispositiu sota testeig (DUT). Les dades de les franges d'interferència, que es produeixen en el domini espectral del DUT, poden ser processades usant la transformació de Fourier en el domini temporal. En aquest domini es pot construir un mapa dels reflexes en funció de la longitud interna del DUT. Així doncs, es pot concloure que l'OFDR pot ser utilitzat tant per a la reflectometria de domini espectral i temporal (Froggatt, 1999).

L'OFDR té avantatges per sobre l'OTDR i la low coherence frequency domain reflectometry (OLCR) per a algunes aplicacions. Específicament, l'OFDR és molt adequat per a aplicacions que requereixen una combinació d'alta velocitat, sensibilitat i resolució en rangs de longitud intermitjos. Les aplicacions que entren en aquesta categoria inclouen la caracterització del mòdul i els components de la fibra òptica (Kieckbusch,

2003)(VanWiggeren, 2002)(Froggatt, 1996), detecció òptica distribuïda (Froggatt, 1998) i imatges biomèdiques (Yun, 2003).

### Raman Optical Time Domain Reflectometry (ROTDR)

Finalment, es pot mencionar també un mètode no tan utilitzat en el camp que s'està estudiant, el Raman Optical Time Domain Reflectometry (ROTDR). L'ROTDR és un radar òptic unidimensional que proporciona una exploració, basada en l'eco, de tota la longitud d'una fibra òptica en les línies d'Stokes i d'Anti-Stokes. És capaç de mesurar la temperatura en molts punts al llarg de tota la longitud simultàniament. En aquesta tècnica, s'emet un pols de làser curt al llarg de la fibra i es detecta, amb alta resolució temporal, la llum de Raman retrodispersada (backscattered Raman light). Aquesta llum conté informació sobre la temperatura al llarg de la fibra.

Així doncs, un cop s'han definit i explicat les tècniques de detecció multiplexades i distribuïdes, es pot realitzar una taula resumint les característiques principals de cadascuna.

**Taula 2.** Actuació de les tècniques de detecció mencionades

Tècnica de detecció	Tipologia	Rang de longitud	Resolució espacial	Paràmetres mesurables
<b>FBG</b>	Multiplexada	≈ 100 canals	2mm (longitud de Bragg) <sup>*5</sup>	Temperatura, deformació i desplaçament
<b>BOTDR</b>	Distribuïda	20-50km	≈ 1m	Temperatura i deformació
<b>BOTDA</b>	Distribuïda	150-200km <sup>*1</sup>	2cm (2km) <sup>*6</sup> 2m (150km) <sup>*7</sup>	Temperatura i deformació
<b>Rayleigh OFDR</b>	Distribuïda	50-70m <sup>*2</sup>	≈ 1mm <sup>*8</sup>	Temperatura i deformació
<b>Raman OTDR</b>	Distribuïda	1km <sup>*3</sup> 37km <sup>*4</sup>	1cm <sup>*3</sup> 17m <sup>*4</sup>	Temperatura

<sup>\*1</sup> (Bao, 2012), <sup>\*2</sup> (Rodríguez, 2015), <sup>\*3</sup> (Tanner, 2011), <sup>\*4</sup> (Park, 2006), <sup>\*5</sup> (Ferdinand, 2014), <sup>\*6</sup> (Dong, Zhang, 2012), <sup>\*7</sup> (Dong, Chen, 2012), <sup>\*8</sup> (Froggatt, 1998)

### Aplicacions de DOFS en Enginyeria Civil

En el principi de l'apartat anterior s'ha mencionat que la tipologia de sensors més comú en projectes d'enginyeria civil són els sensors multiplexats, concretament els FBG. S'hi ha especificat també els avantatges i desavantatges de l'ús d'aquesta tipologia respecte els sensors distribuïts. No obstant, degut a que en la prova de laboratori que es detallarà posteriorment s'ha usat una tipologia distribuïda de sensors, només es presentaran aplicacions de monitorització amb sensors d'aquest últim tipus.

Avui en dia, els sensors DoFs són una tecnologia interessant que ofereix un rendiment superior i avantatges en comparació amb els sensors més convencionals aplicats en la SHM. Malgrat el seu aparent alt cost, són ideals per a aplicacions on la

fiabilitat en entorns difícils és essencial. A més a més, ofereixen menors costos d'instal·lació i manteniment.

No obstant això, segueix sent una tecnologia recent i en desenvolupament, ja que s'ha aplicat en un nombre relativament reduït de projectes SHM. Tanmateix, en les últimes dècades s'han usat DOFs en diferents estructures d'enginyeria civil, com ara canonades, estructures geotècniques, preses, ponts, túnels, etc. A continuació, es mostraran diverses proves i projectes on s'han testejat i utilitzat DOFs.

### Proves de laboratori

En primer lloc, a l'hora d'utilitzar un DOFS per a la monitorització d'una estructura, per assegurar una correcta obtenció de dades, s'ha de posar especial èmfasi que la deformació o variació de temperatura que pateix la fibra és la mateixa que la que rep la mateixa estructura. Per analitzar quina és la col·locació més adequada Zeng *et al.*, per exemple, va realitzar la monitorització de la deformació d'una biga de formigó armat d'1,65 m amb sensors distribuïts que utilitzen la dispersió de Brillouin analitzant dos mètodes d'instal·lació diferents: un amb la fibra encastada en un polímer de reforç (GFRP) i l'altre unint les fibres a les barres d'acer de reforç (Zeng, 2002). Ambdós mètodes van resultar ser efectius en la protecció del nucli de la fibra òptica i en l'obtenció de les dades de deformació.

Per altra banda, Hoult *et al.* va realitzar una sèrie d'assaigs de tracció axial sobre plaques d'acer usant cables recoberts de poliamida i niló (Hoult, 2014). En general, la fibra recoberta de poliamida va presentar una major precisió i una millor correlació amb els resultats obtinguts amb galgues elèctriques. No obstant, les mesures semblaven errònies en els llocs on apareixien fissures. D'altra banda, la fibra recoberta de niló presentava una major precisió en zones amb esquerdes però no és tan precisa com l'anterior en zones sense fissures degut al lliscament que es produeix entre el nucli intern i el revestiment de niló.

A més a més, en certes ocasions, una bona protecció del DOFS pot interferir en l'obtenció de les deformacions correctes. Per tal d'anul·lar, o reduir aquests problemes, i així mesurar correctament la deformació d'una estructura de formigó armat després l'aparició de fissures, Quiertant *et al.* va provar mitjançant una sèrie d'experiments la implementació d'una unitat OFDR unida a les barres de reforç amb l'objectiu de mesurar les deformacions en estructures de formigó armat com es mostra en la Figura 23 (Quiertant, 2012).

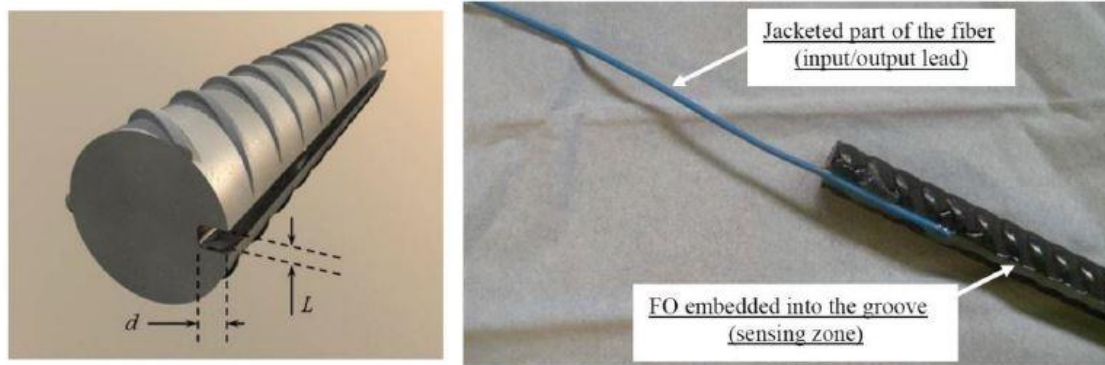


Figura 23. Geometria de la ranura (esquerra) i vista de detall de la fi de la zona d'unió (dreta)

En aquestes proves es volien estudiar diversos paràmetres; en primer lloc el mètode d'instal·lació de la fibra òptica, que pot ser unida a la superfície de la barra de reforç o encaixada en una ranura; en segon lloc la geometria de la mateixa ranura; i per últim la tipologia de la fibra òptica que s'usarà (on el criteri principal serà l'elecció del material de revestiment, a escollir entre poliamida de  $250\mu\text{m}$  de diàmetre o  $190\mu\text{m}$  d'acrilat). Va resultar que la fibra òptica revestida de poliamida encastada en una ranura ofereix uns millors resultats.

Com s'ha mencionat anteriorment, el principal avantatge dels sensors distribuïts respecte els sensors puntuals o multiplexats és la detecció d'esquerdes en estructures de formigó armat. Tanmateix, les diferències de resolució entre les diverses tipologies de sensors distribuïts poden produir resultats no del tot similars entre elles; per exemple, els DOFS basats en Brillouin estan limitats respecte a canvis de deformacions que poden ocórrer en longituds més curtes que la meitat de la resolució espacial, ja que no els detecta ni mesura, fent que aquesta elecció pugui no ser l'adequada per a la detecció d'esquerdes. Deif *et al.* va estudiar la possibilitat de millorar les resolucions espacials i de deformacions de sensors BOTDA per tal de solucionar aquest problema (Deif, 2010). Es va aplicar un mètode d'ajustament multi-pic per obtenir les distribucions de les tensions en les superfícies superior i inferior d'una biga de formigó reforçat que va estar subjecte a una configuració de flexió en quatre punts. Aquest mètode d'ajustament va permetre millorar la resolució espacial de 15 cm a 5 cm. No obstant, el sistema no va ser capaç de detectar i precisar la localització de les fissures, com s'observa en la Figura 24.



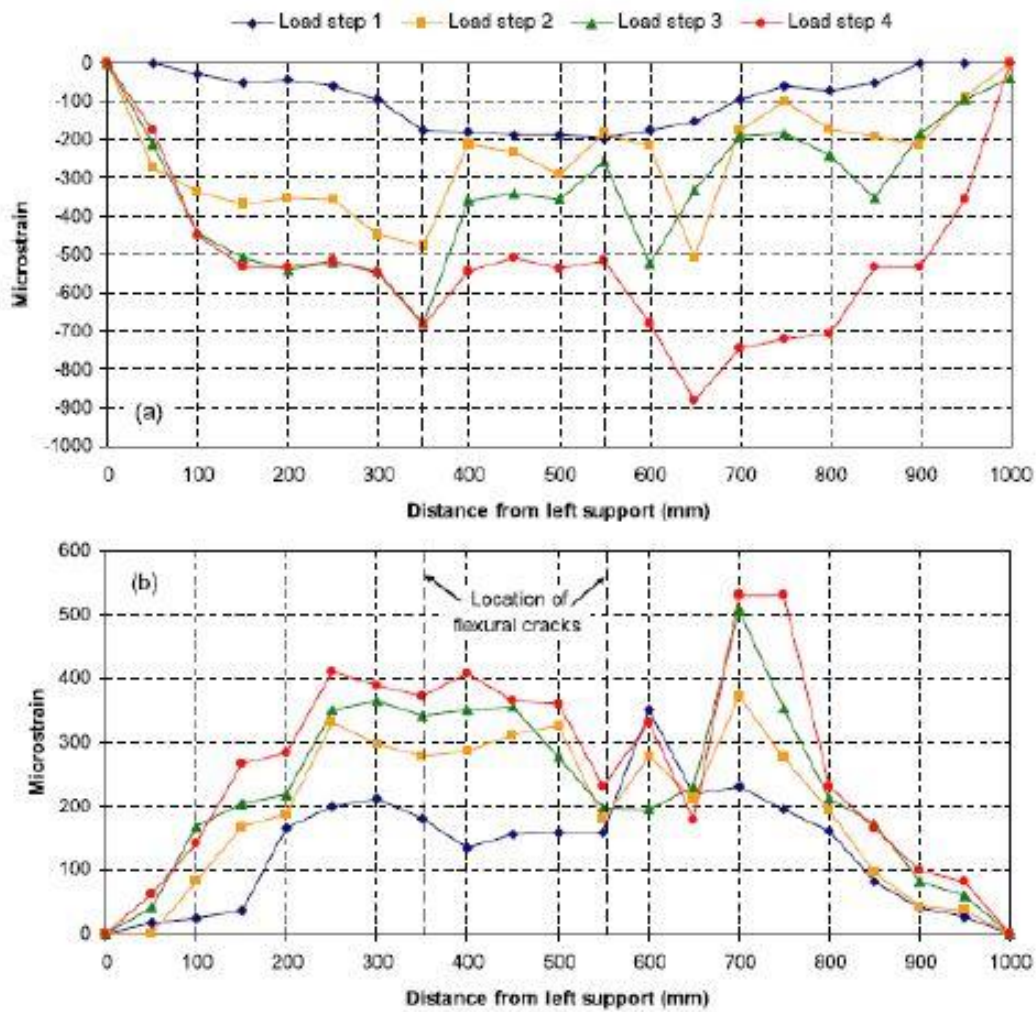


Figura 24. Distribució de les tensions a compressió (a) i tracció (b) mesurades amb sensors distribuïts de Brillouin

D'altra banda, Zhang *et al.* va investigar el desenvolupament d'un sistema de monitorització de salut estructural (SHM) que combinava un BOTDR amb tècniques multiplexades de FBG amb la intenció d'implementar-lo en ponts de formigó rehabilitats (Zhang, 2006). En la Figura 25 es mostra la configuració descrita. En la prova es van executar una sèrie de proves de càrrega estàtica i dinàmica en una biga de formigó armat amb perfil T simplement recolzada reforçada externament amb tendons postensionats.

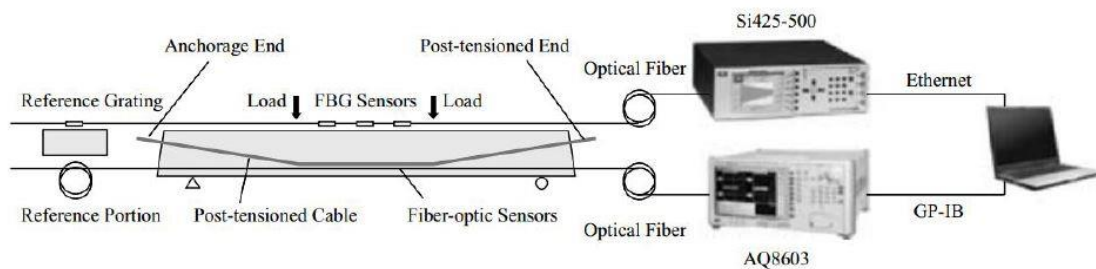


Figura 25. Configuració del SHM proposat

Aquest sistema SHM desenvolupat va provar una gran eficiència en identificar correctament el rellevant estat estructural per a cada cas de càrrega.

Amb l'objectiu d'explorar les capacitats de detecció d'esquerdes en elements de formigó, Villalba i Cases van instrumentar una llosa de formigó amb DOFS basats en l'Optical Backscattered Reflectometer (OBR), enganxats a les superfícies inferior i superior, que va estar sotmesa a una prova de càrrega (Villalba, 2013). La llosa es va instrumentar també amb més sensors elèctrics convencionals, com ara galgues i LVDTs. Per a la protecció de la fibra es va usar un revestiment de polímer, concretament poliamida. Aquest sistema va permetre, a més de detectar les localitzacions d'esquerdes, realitzar mesures en sistemes de càrrega que produeixen fissures de l'ordre d'1 mm.

Aquest grup també va implementar una nova tècnica en bigues de formigó parcialment pretesat (PPC) amb sensors OBR a fi de detectar esquerdes de cisallament induïdes. Això és de summa rellevància ja que al contrari del que passa amb l'esquerdament per flexió, on les esquerdes apareixen de forma ortogonal a l'eix de la biga, en el cas de l'acció de tallant, la inclinació de la pauta de les fissures és desconeguda prèviament i, fins i tot, pot canviar depenent de la força de pretensat i la ubicació al llarg de l'element (Rodríguez, 2016).

Per això, es va proposar una xarxa bidimensional de DOFS que va monitoritzar l'inici, la localització, la inclinació i l'evolució de les esquerdes durant la prova de càrrega en la biga, com s'observa en la Figura 26.

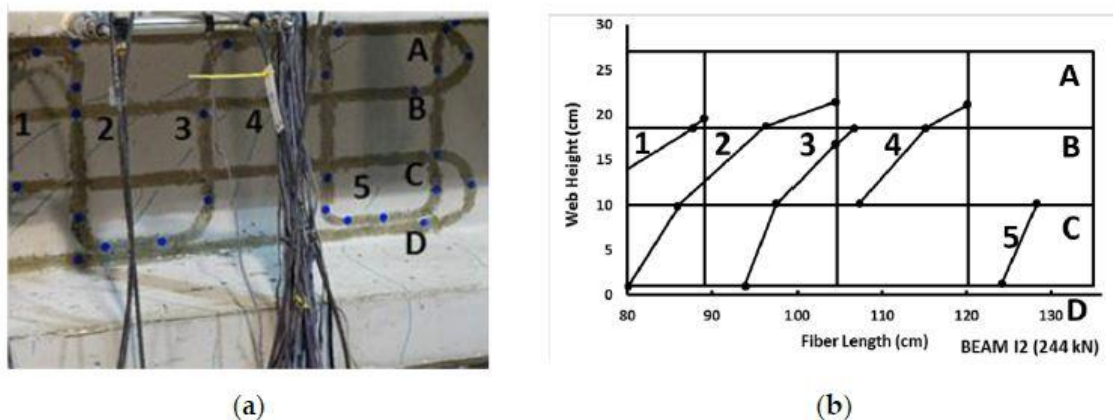
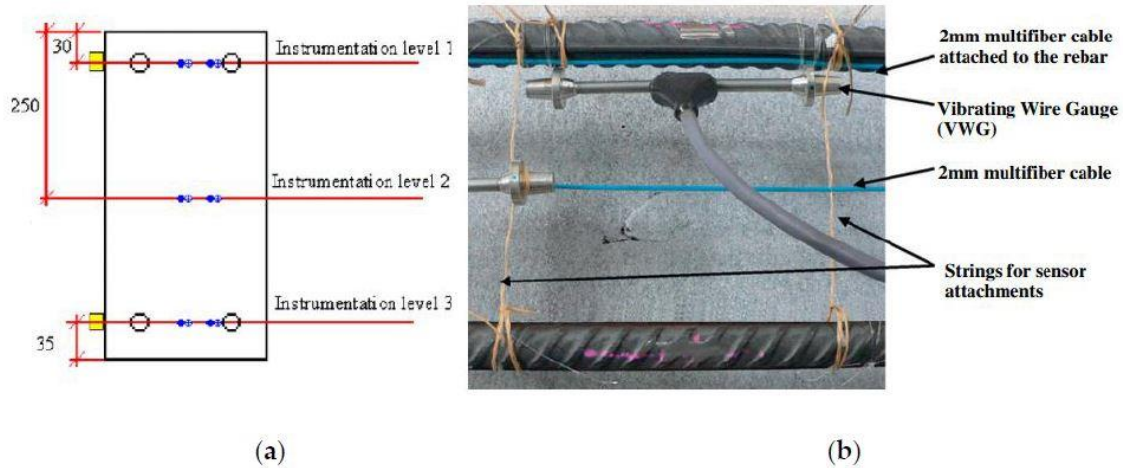


Figura 26. Comparació de la pauta real de cisallament (a) i l'obtingut per un sistema OBR (b) (adaptat d'Article 91)

Com es pot observar, els resultats obtinguts pel sistema OBR coincideixen en gran mesura amb les fissures que es poden veure en la figura. Aquests resultats es van obtenir sense coneixements previs de la zona esquerpada, conseqüentment, es va demostrar la viabilitat d'aquesta metodologia.

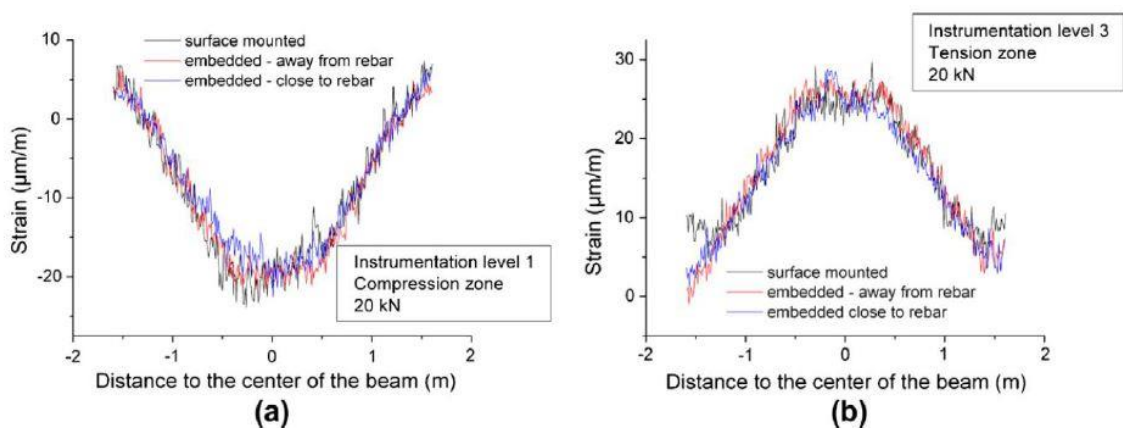
D'altra banda, el grup de recerca d'Henault *et al.* va monitoritzar una biga de formigó de 3,4 m de longitud amb una secció rectangular de 0,25x0,5 m<sup>2</sup> que es va sotmetre a un test de flexió en 4 punts utilitzant DOFS basats en la dispersió de Rayleigh

(3 nivells encastats en el formigó i dos nivells units a la superfície exterior) que es complementen amb galgues de vibració (VWG) com s'observa en la Figura 27 (Henault, 2012).



**Figura 27.** Detall de la instrumentació de la secció central del tram en mm (a) i imatge de la instrumentació de la biga abans del formigonat

La prova es va dividir en dues fases. En la primera, el nivell de la càrrega aplicada no superava la resistència a tracció del formigó per tal de comprovar el rendiment dels diferents sistemes de detecció aplicats. En aquesta part es va obtenir una conclusió important; ambdós sistemes d'instal·lació de la fibra, ja sigui encastada o unida superficialment, presentaven resultats similars tant en compressió com en tracció. En la Figura 28 es mostren els resultats obtinguts.



**Figura 28.** Lectures de deformació obtinguts amb el sistema de DOFS per a una càrrega de 20 kN: En la zona comprimida del nivell 1 (a) i en la zona traccionada del nivell 3 (b)

En la segona fase, es van induir les fissures primàries per avaluar la capacitat dels sensors DOFS de detectar-ne les localitzacions. Malgrat el fet que la biga va resultar severament malmesa per alts nivells de càrrega, els cables de fibra òptica no van mostrar cap tipus de ruptura per tracció. Com s'observa en la Figura 29, va ser possible detectar



la ubicació de les esquerdes (fins i tot abans de la inspecció visual) a partir de les dades experimentals proporcionades per DOFS i seguir-ne l'evolució.

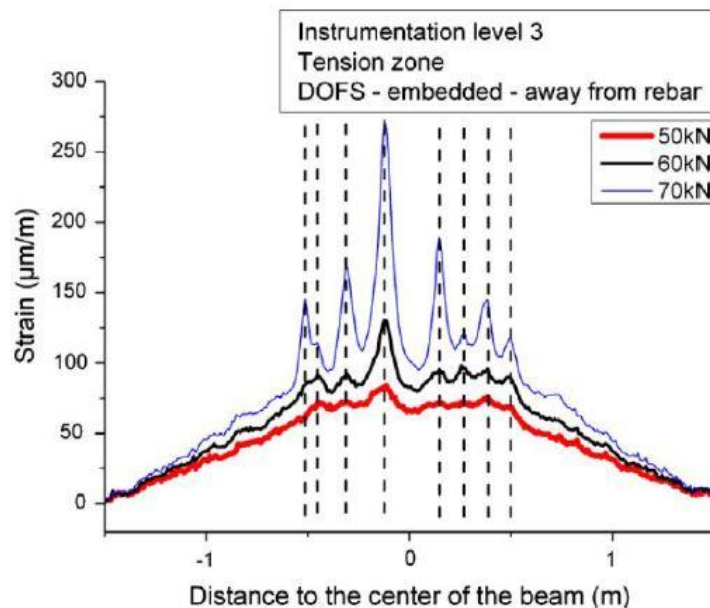


Figura 29. Lectures de deformació obtinguts amb els sistema de DOFS per a càrregues superiors a 50kN

El mateix grup d'investigació va desenvolupar un algorisme per analitzar automàticament l'evolució d'esquerdes en estructures de formigó armat (Buchoud, 2012). Aquest procés va proporcionar un mapa precís de les esquerdes amb l'evolució de les seves amplituds i es va posar a prova amb un assaig de flexió de quatre punts com l'esmentat anteriorment.

Una de les limitacions comentades dels sensors OFDR basats en la dispersió de Rayleigh és el relativament curt rang de detecció amb la finalitat d'obtenir mesures d'alta resolució espacial. No obstant, Gifford *et al.* va reportar mesures d'alta precisió amb un sistema OBR d'uns dos quilòmetres de llarg (Gifford, 2007). Els mateixos autors també van avaluar la capacitat de mesurar les deformacions amb èxit amb proves de curt (10 m) i llarg ( $\approx 1$  km) rang en un testeig d'una biga en voladís, com mostra la Figura 30.

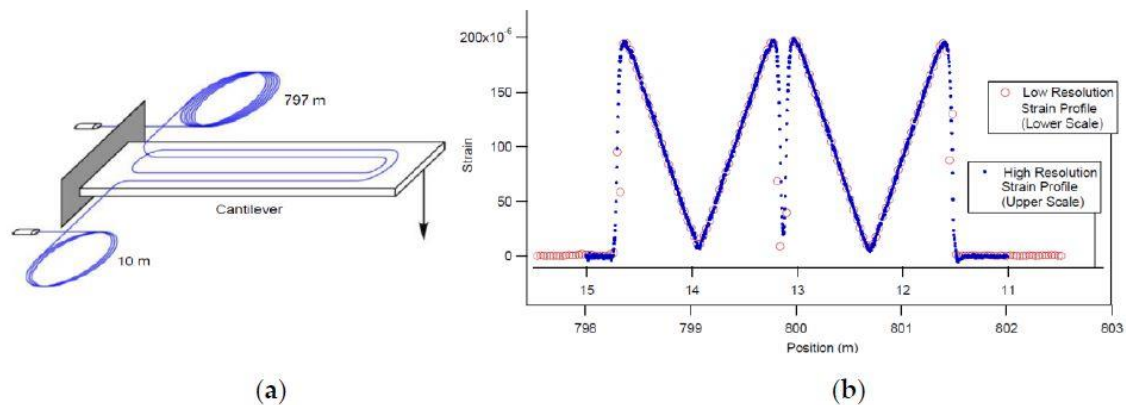


Figura 30. Diagrama de la biga en voladís (a) La fibra es va adherir a la biga dibuixant dos cicles i repartit en 10m i 797m de longitud en els dos extrems. En (b) es mostra la deformació obtinguda pel sistema

### Canonades

No només s'utilitza la tecnologia de sensors de fibra òptica en l'Enginyeria Civil, també per exemple en la indústria del petroli i el gas, on el seu ús ha patit un augment substancial en els darrers anys. Les tecnologies més usades comunament són els sensors distribuïts de Brillouin i els multiplexats FBG (López-Higuera, 2011). Els investigadors Glisic i Yao van realitzar una prova a gran escala en una canonada (Glisic, Yao, 2012). L'objectiu principal d'aquest experiment era desenvolupar un mètode per a la implementació d'un sistema de fibra òptica distribuïda i, al mateix temps, proporcionar una manera fiable de monitorització en temps real de les canonades que estaven sotmeses a desplaçaments permanents del terra induïts per terratrèmols. Així doncs, es va equipar un sensor de fibra òptica basada en la dispersió de Brillouin en una canonada de formigó de 13 m de longitud i un diàmetre exterior de 30,48 cm, com mostra la Figura 31.

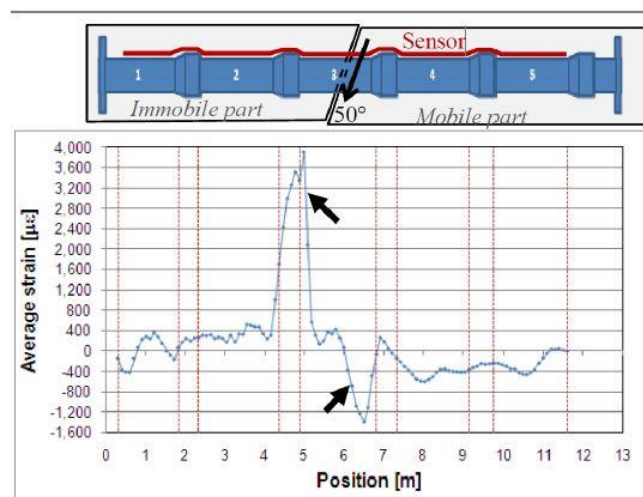


Figura 31. Resultats del test amb danys detectats (indicats amb les fletxes)

En aquest prova, es va aplicar una translació relativa amb un angle de 50° amb gats hidràulics amb la distribució que mostra la figura anterior. Com es pot observar, es

va obtenir traccions importants a prop de la junta número 2 i compressions a prop de la junta número 3. Aquests canvis de tensió van coincidir amb la ubicació dels danys en la canonada; provant així la capacitat del sistema utilitzat per a detectar fissures amb alta fiabilitat a temps real (*Glisic, Inaudi, 2012*). Altres experiments s'han realitzat amb èxit, com ara el que van realitzar Inaudi i Glisic (*Inaudi, 2006*) que van monitoritzar un gasoducte de 35 anys amb sensors basats en Brillouin a Rimini, Itàlia.

### Estructures Geotècniques

Per a la instrumentació d'estructures geotècniques, els DOFS s'estan convertint en una tecnologia molt atractiva gràcies a les capacitats de llarg abast que té. Fins ara, els mètodes de monitorització més usats havien estat sensors discrets com ara inclinòmetres, detectors d'esquerdes i mesuradors de desplaçament; tanmateix, d'aquesta manera no s'aconsegueix el comportament global del terreny de manera senzilla. Per empitjorar-ho, aquest tipus d'instrumentació no és compatible amb la deformació del sòl, i converteix a aquesta en una solució poc òptica degut a les complicacions que es poden produir en el procediment d'instal·lació en situacions complicades. Shi *et al.* va provar la viabilitat de l'aplicació d'un sistema de sensors distribuïts BOTDR en talussos, com mostra la Figura 32 (*Shi, 2006*).

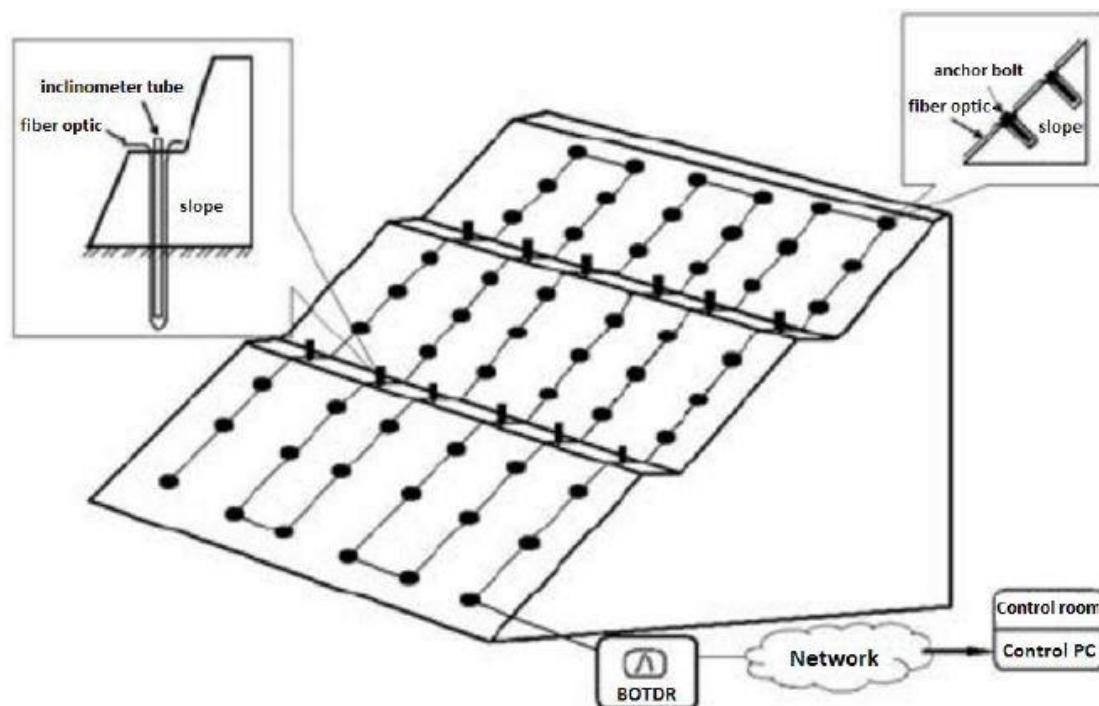


Figura 32. Diagrama del BOTDR per a pendents

Es van fer proves durant el període comprès entre el gener i el juliol de 2005, i es va estudiar l'augment de la deformació, especialment a prop de la part superior de l'ancoratge. En la Figura 33 es mostren els resultats obtinguts, i es pot observar com es relaciona la fluència del talús associada amb l'estació plujosa.

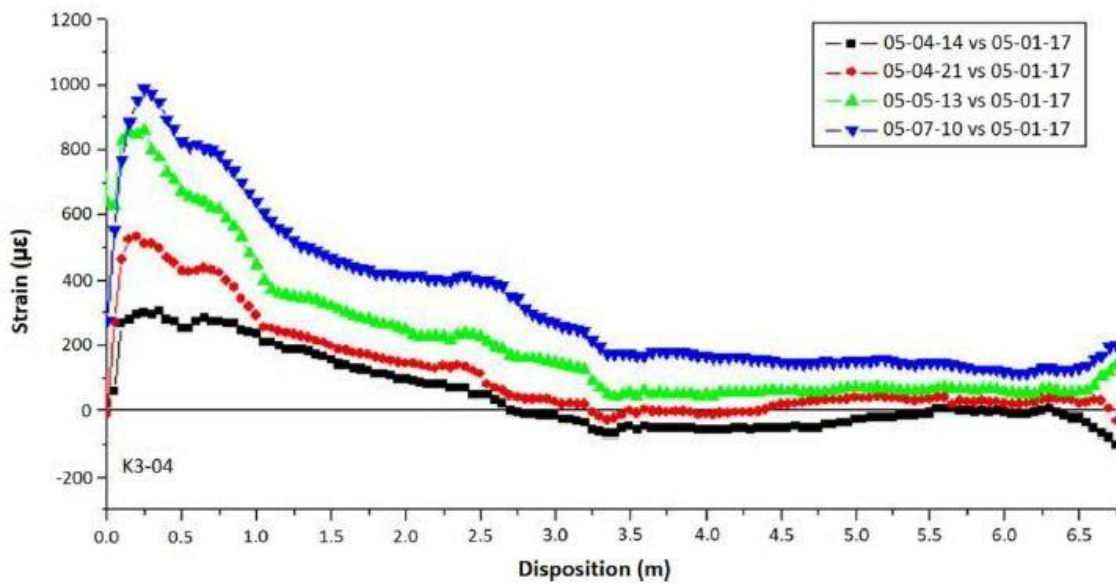


Figura 33. Història de la distribució de les deformacions al llarg de l'eix de l'ancoratge K3-04

Més recentment, Zhu *et al.* va construir un model de mida mitjana clavat en un talús en laboratori per tal d'avaluar l'eficiència de monitoritzar els problemes d'estabilitat en talussos mitjançant l'ús de tecnologia BOTDA (Zhu, 2014). La Figura 34 en mostra la configuració.

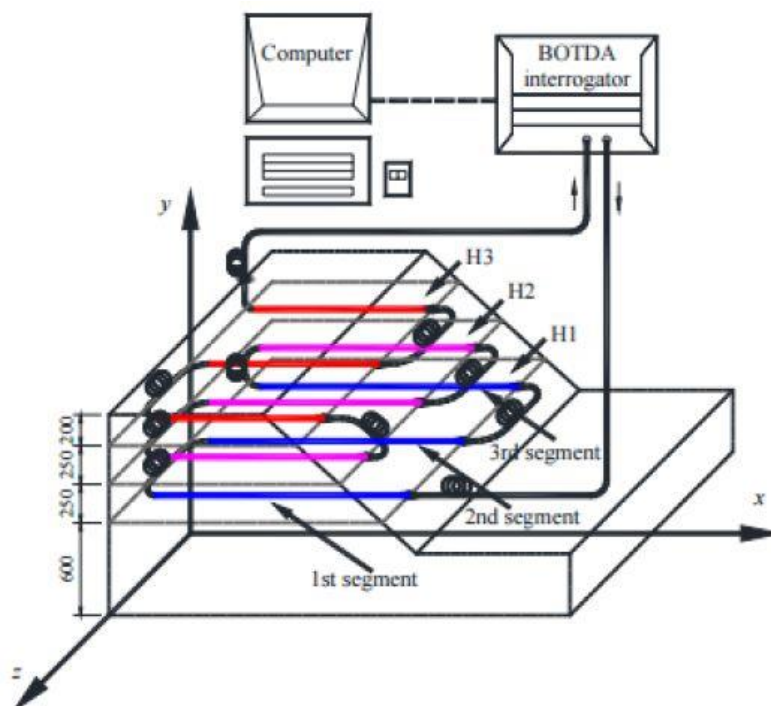


Figura 34. Configuració del BOTDA en el model (unitats en mm)

El model mostrat es va sotmetre a una prova de sobrecàrrega. Els resultats van demostrar la viabilitat de mesurar les distribucions de les deformacions horitzontals en un talús obtenint el patró de deformacions que es pot usar per determinar amb precisió

la superfície potencial de lliscament del talús. A més a més, es va concloure que els resultats obtinguts es poden utilitzar per estimar les condicions d'estabilitat del talús gràcies a la relació empírica que tenen les característiques de la deformació màxima i el factor de seguretat del talús.

Un altre experiment que s'ha realitzar és el que van dur a terme Klar *et al.*, que van provar les capacitats de monitorització de desplaçaments induïts en el terreny dels sistemes BOTDA i de Rayleigh scattering en túnels (Klar, 2014). Aquest estudi es va basar en la idea que una fibra òptica instal·lada en el sòl es deformaria de forma similar al mateix sòl; aquesta idea va estar comprovada per Klar *et al.* en un altre estudi (Klar, 2010).

Per últim, alguns estudis que demostren la viabilitat de l'ús de BOTDR són els realitzats per Shi *et al.* (Shi, 2003), (Rajeev, 2013) i (Gue, 2015).

## Ponts

S'han comentat diverses aplicacions de sensors distribuïts de fibra òptica (DOFS) en diversos camps, però evidentment l'ús d'aquests sistemes és un recurs molt freqüent en la monitorització de ponts. Un exemple és el pont de Götaälv (Figura 35) a Gothenburg, Suècia, de 1000 m de longitud, format per una llosa de formigó recolzada en nou bigues d'acer que es recolzen, a la seva vegada, en més de 50 columnes (Glisic, Inaudi, 2012), (Thévenaz, 1999), (Glisic, 2003).



Figura 35. Pont de Götaälv a Gothenburg, Suècia

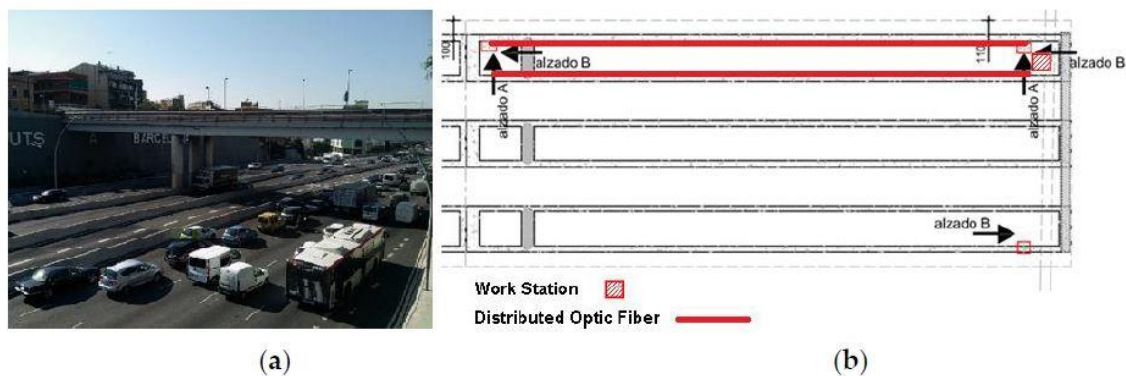
Després de l'aparició de fissures en l'estructura, les autoritats pertinents van decidir monitoritzar el pont i així controlar-ne la seguretat. Degut a la llarga longitud del pont, i la rellevància de detectar la totalitat de les esquerdes que haguessin pogut aparèixer, els sensors de tipus distribuït foren l'opció més òptima. Alguns estudis es van dur a terme amb DOFS basats en la dispersió de Brillouin (Ravet, 2009), (Glisic, 2007). L'SHM d'aquest pont continua en funcionament, convertint-lo en la instrumentalització més longeva en una estructura real.

Glisic *et al.* van implementar també una monitorització de llarga durada (Glisic, 2011). En aquest cas es van encastar DOFS en el formigó durant l'execució del pont de Streicker, a la Universitat de Princeton, obtenint doncs les dades relacionades amb el rendiment global de l'estructura, des del comportament inicial del formigó fins a la identificació dels danys.



L'any 2010, Villalba *et al.* van implementar un sistema OBR en la superfície inferior de la llosa d'un viaducte sobre una autopista a Barcelona. Es va instal·lar durant la seva execució, i va permetre monitoritzar la prova de càrrega, convertint-se així en el primer cop que s'usava un mètode de detecció distribuït amb una resolució espacial mil·limètrica en un pont de formigó real (Villalba, 2012), (Casas, 2014).

Més recentment, Rodríguez *et al.* van instrumentar un tram d'un pont a Barcelona amb un altre sistema OBR, enganxat sense revestiment protector a la superfície interna de la biga tipus llosa del pont. El procés de monitorització es va dur a terme durant el procés d'engrandir el tauler del pont. Com que el procediment es va dur a terme en un llarg període de temps, d'uns quants mesos, l'afectació de la temperatura era rellevant (Barrias, 2016). Amb el sistema implementat va ser possible controlar la variació de les deformacions del tauler durant tots els processos d'ampliament, assegurant així la seguretat estructural. La Figura 36 en mostra els esquemes.



**Figura 36.** Pont de Sarajevo a Barcelona (a) i esquema general de la monitorització amb DOFS (b)

## Preses

S'ha comentat que els DOFS són una opció molt recomanable per a grans estructures com són els ponts. Les preses i els dics també entrarien dins d'aquest sector. Thévenaz *et al.* va ser un dels primers a avaluar l'aplicació de sensors distribuïts de Brillouin per a la monitorització d'una presa (Thévenaz, 1999). L'estudi es va realitzar en les obres dutes a terme a la presa de Luzzone, als Alps suïssos, que permetrien incrementar la generació d'energia en la planta hidroelèctrica. L'obra consistia en l'execució de lloes de formigó de 3 m de gruix i una superfície de 15x10 m. Els sensors es van col·locar durant el procés de formigonat per així proporcionar una distribució 2D de la temperatura en la llosa. La instrumentació esmentada va permetre identificar un esdeveniment que des de les capes externes passava desapercbut. Mentre que en aquestes capes superficials el procés exotèrmic es va refredar ràpidament, en les capes instrumentades, les internes, el refredament es molt més lent i pot arribar a temperatures de fins a 50°C. A més a més, es va poder demostrar també que aquest sistema de monitorització ofereix dades fiables inclòs en condicions extremes com ara neu, pols i grans variacions de temperatura.

D'altra banda, un altre exemple és la implementació duta a terme pel Ministeri Federal Alemany d'Educació i Recerca d'un programa nacional de recerca anomenat "Risk Management of Extreme Flood Events" (RIMAX). Aquest programa afavoria la invenció de sistemes de monitorització intel·ligent per a detectar efectes incipients de fallida d'estructures hidràuliques a raó d'evitar situacions similars a dues inundacions extremes de dos rius alemanys (l'Oder en el 1997 i l'Elbe en el 2002). La idea principal era integrar FOS en geosintètics que s'aplicarien en l'estabilització d'estructures geotècniques com ara preses o dics com s'observa en la Figura 37.

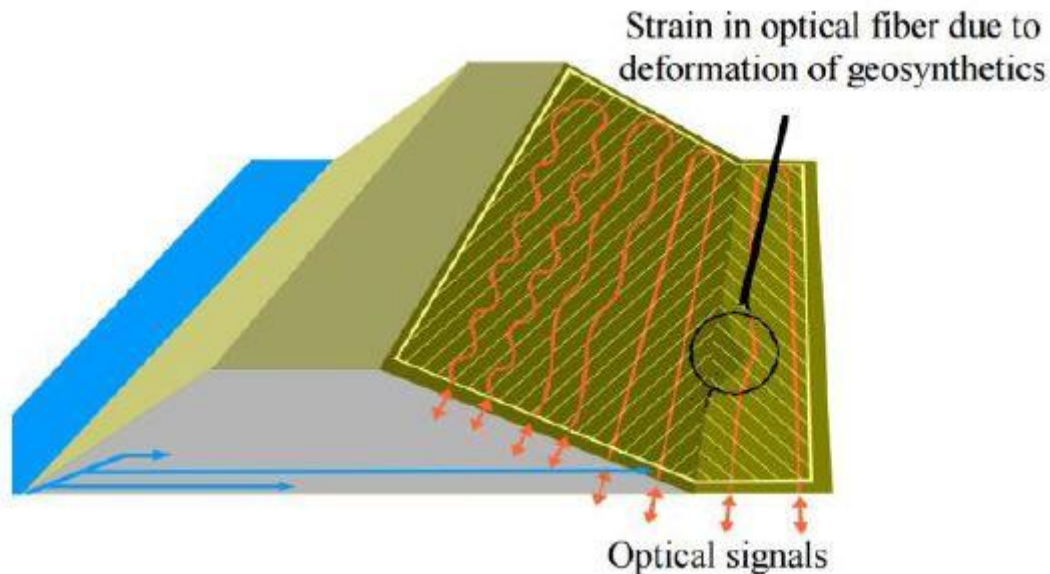


Figura 37. Esquema dels sensors en un dic de riu

Finalment, es pot destacar també l'exemple de monitorització que van realitzar Inaudi i Glisic usant tecnologia BOTDA en la presa de Plavinu a Letònia.

### Exemples en Altres Camps

La rellevància que està obtenir aquesta tecnologia es pot comprovar per la quantitat d'estudis i proves de laboratori que es realitzen; en els apartats anteriors se n'ha fet un petit tast. Tanmateix, la seva aplicació no es limita simplement a obres d'enginyeria civil, també es monitoritzen altres estructures i monuments com ara edificis històrics, d'alt valor cultural i social. És cert que en aquests altres camps els sensors discrets acostumen a ser l'opció escollida, no obstant en alguns casos s'ha preferit la implementació de sistemes DOFS (*Bastianini, 2005*), (*Barrias, 2016*).

Un altre estudi destacable és el que van realitzar *Casas et al.*, on es va monitoritzar una torre de refrigeració a Espanya amb un sistema OBR (*Casas, 2014*). En aquesta torre van aparèixer dues esquerdes verticals considerables i es va optar per instrumentar l'estructura amb un sistema DOFS, enganxats a la seva superfície, per observar el comportament d'aquesta abans i després de la reparació. La implementació esmentada va permetre l'augment de la vida útil de l'estructura identificant les causes de l'aparició d'esquerdes i la proposta de les reparacions adequades.

## METODOLOGIA PER A L'OBTENCIÓ DE FLETXES A PARTIR DE DOFS

Després de dedicar una part del document a introduir el concepte de Salut Estructural, la monitorització d'aquesta, el funcionament dels sensors de fibra òptica, aprofundint en els sensors de tipus distribuït, i finalment, enumerant alguns exemples en què s'han usat DOFS, es pot donar pas al desenvolupament pràctic d'aquest document.

Com s'ha comentat prèviament en la introducció, la funció principal d'aquesta tesina és definir una estratègia a seguir en la utilització de DOFS, en l'obtenció i l'anàlisi dels resultats que ofereix aquesta tipologia d'instrumentació. A més a més, com en tots els altres estudis realitzats en aquest camp, aquest treball té la funció implícita de comprovar el correcte funcionament dels sensors distribuïts de fibra òptica, en una prova de laboratori en aquest cas.

### Descripció de la prova

El test de laboratori que es realitzarà a continuació es durà a terme en una biga simplement recolzada d'una longitud total de 8 metres, amb una distància entre recolzaments de 5,7 m. Com s'observa en la Figura 38, la biga ha estat reforçada amb armadura de postesat. La distribució és la següent:

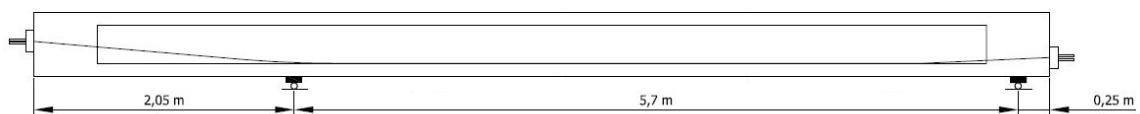


Figura 38. Esquema de les dimensions de la biga

Mentre que la secció de la biga, de tipus I, es mostra en la Figura 39.

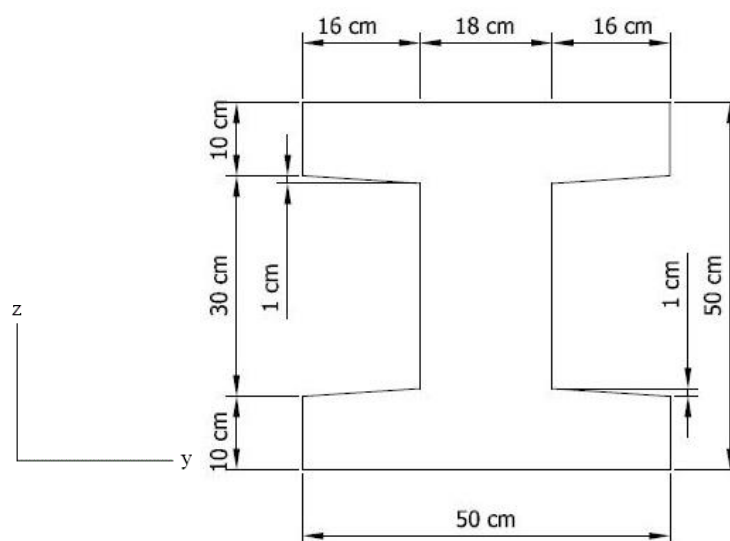


Figura 39. Secció tipus acotada



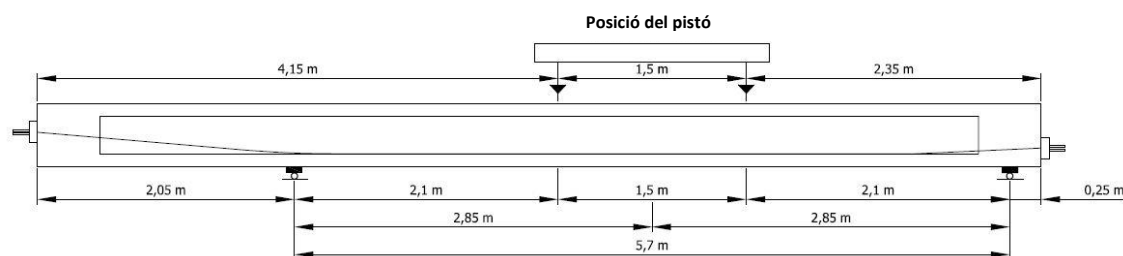
Aquesta biga es va realitzar en laboratori per a sotmetre-la a diverses proves, com ara varis assaigs per estudiar les tensions tangencials o la prova que es descriurà a continuació. En fer-se a laboratori, es pot concloure que les característiques calculades per la geometria són força similars a les reals. A continuació es mostrarà una taula amb les característiques geomètriques de la secció tipus.

**Taula 3.** Característiques geomètriques de la secció tipus

Àrea (A)	0,1572 m <sup>2</sup>
Moment d'inèrcia en y (I <sub>y</sub> )	4,557·10 <sup>-3</sup> m <sup>4</sup>
Moment d'inèrcia en z (I <sub>z</sub> )	2,299·10 <sup>-3</sup> m <sup>4</sup>
Mòdul d'inèrcia en y (W <sub>y</sub> )	0,0182 m <sup>3</sup>
Mòdul d'inèrcia en z (W <sub>z</sub> )	9,198·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>

Pel que fa a les característiques mecàniques i resistents, alguns valors rellevants com ara el mòdul elàstic, o mòdul de Young (E) per ara ens són desconeguts. No obstant, amb els resultats que s'obtinguin del sistema DOFS es podrà aconseguir-ne un valor força proper a la realitat.

Una vegada s'ha descrit l'estructura, ja es pot identificar el sistema de càrregues a la que se sotmetrà aquesta. En la Figura 40 se'n descriu la distribució.



**Figura 40.** Distribució de les càrregues en l'estructura

S'aplicaran dues càrregues de manera simètrica amb els recolzaments, a 0,75 m del centre del tram cadascuna, o bé també a 2,1 m de cada recolzament. Aquestes càrregues seran sempre idèntiques ja que s'aplicaran mitjançant un pistó i un sistema que divideix la força que exerceix aquest. L'estudi dut a terme és més complex que el que es mostrarà aquí, aquest només és una part del conjunt; l'estructura se sotmetrà a unes càrregues que s'aniran incrementant de forma continua fins a un valor de 294,5kN i sense abandonar mai la zona elàstica, és a dir, la càrrega mai arribarà al valor del límit elàstic de l'estructura, a partir del qual aquesta es comportarà de forma plàstica. En la Figura 41 es mostra el diagrama de la càrrega aplicada en funció del temps.

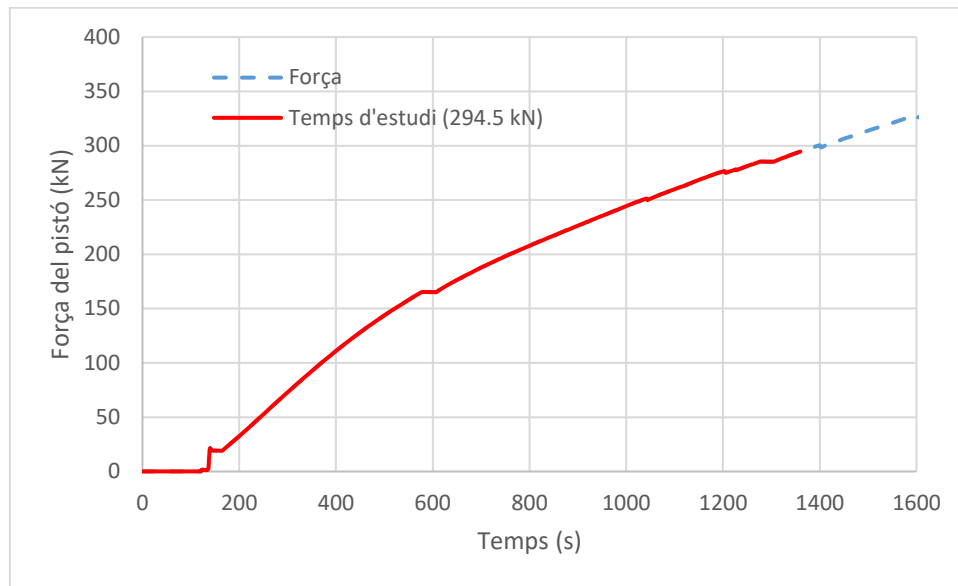


Figura 41. Diagrama de la càrrega aplicada

La tipologia de sensors de fibra òptica que s'usarà en aquest estudi és un DOFS basat en la retrodispersió de Rayleigh, un OBR. Aquest tipus de sensors destaquen per la seva alta precisió i se n'obté el màxim rendiment en estructures amb un rang de longitud intermig. En el cas que ens afecta, s'enganxa la fibra òptica a l'estructura en les superfícies superior i inferior, polides prèviament per a una correcta adhesió, amb una longitud total del cable de 20,30 metres. La instrumentació es realitza de manera que es formin 4 trams, com mostra la Figura 42.

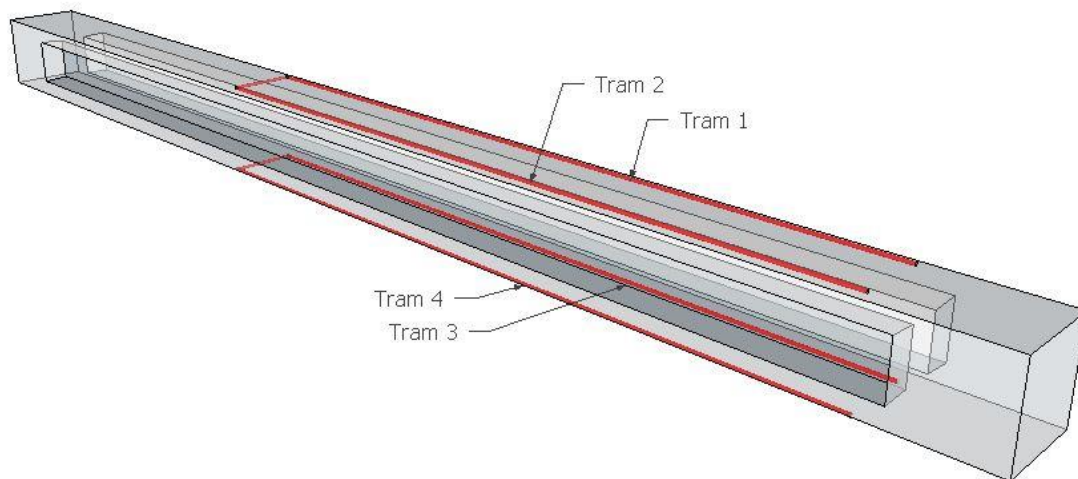
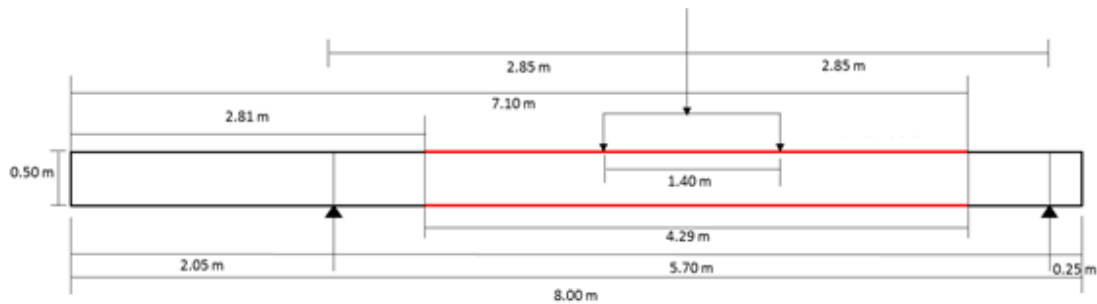


Figura 42. Distribució de la fibra òptica en la biga

Cada tram té una longitud de 4,29 metres i s'ha instal·lat la fibra òptica de manera que el làser que s'emetrà seguirà l'ordre numèric dels trams fins acabar en la punta del tram 4. L'extrem dret de cada tram es distancia 0,65 metres del recolzament dret i, per tant, els extrems esquerres disten 0,76 metres del recolzament esquerre. En la Figura 43 es detalla l'esquema descrit.



**Figura 43.** Esquema de la instrumentació amb fibra òptica OBR

Després de la descripció de la biga, de la càrrega a la que es sotmetrà i, finalment, la distribució de la fibra òptica ja es pot dur a terme la prova de laboratori.

### Obtenció de les deformacions

Com s'ha comentat en apartats anteriors, la fibra òptica mesura les elongacions que pateix per concomitància amb les deformacions de la biga, és a dir, les lectures que se n'obtenen identifiquen quant s'allarga o es comprimeix la fibra òptica en aquell punt. Aquest estudi s'ha realitzat amb una resolució d'1 cm i una precisió de microdeformacions ( $\mu\epsilon$ ). En la Figura 41 es mostra que l'increment de les càrregues es realitza de forma progressiva i continua, no obstant, per a una completa comprensió del comportament estructural de la biga en cada instant, s'han discretitzat les lectures en 11 instants, són els següents:

**Taula 4.** Instants que es tindran en compte en l'estudi

<b>Temps (s)</b>	0	135	140	220	270	370
<b>Càrrega total (kN)</b>	0	1,84	21,5	40,5	61	100

<b>Temps (s)</b>	440	550	760	1035	1345
<b>Càrrega total (kN)</b>	125	150	200	250	300

Si, mitjançant el punt longitudinal, s'identifica a quin tram pertany cada lectura, representar les microdeformacions obtingudes amb el sistema OBR és un procés senzill, com mostra la Figura 44.

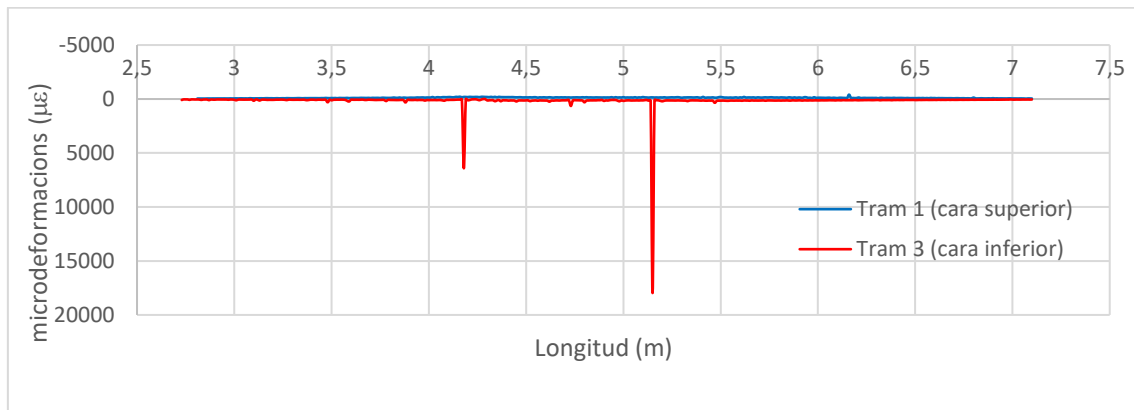


Figura 44. Dades obtingudes amb un OBR per a una càrrega total de 100kN

La gràfica està representada considerant les coordenades longitudinals de la biga per a l'eix d'abscisses. Com es pot observar, les dades obtingudes de les microdeformacions són de valors força reduït, excepte alguns pics puntuals que poden ser produïts per l'aparició de fissures o errors en la lectura de la fibra òptica. Anteriorment s'ha comentat que la biga havia format part de diverses proves i tests, així que es desconeix a quins estats de càrrega s'havia sotmès l'estructura prèviament. Tanmateix, l'objectiu d'aquest estudi no inclou la identificació d'esquerdes, sinó marcar una estratègia a seguir en la utilització d'un sistema OBR, per tant, els valors que ens són rellevants són els que descriuen o previsualitzen la deformació de la biga, és a dir, el conjunt dels valors sense fixar-se en algun en concret. En la Figura 45 es mostra la representació del conjunt de valors amb un "zoom" a la zona d'interès.

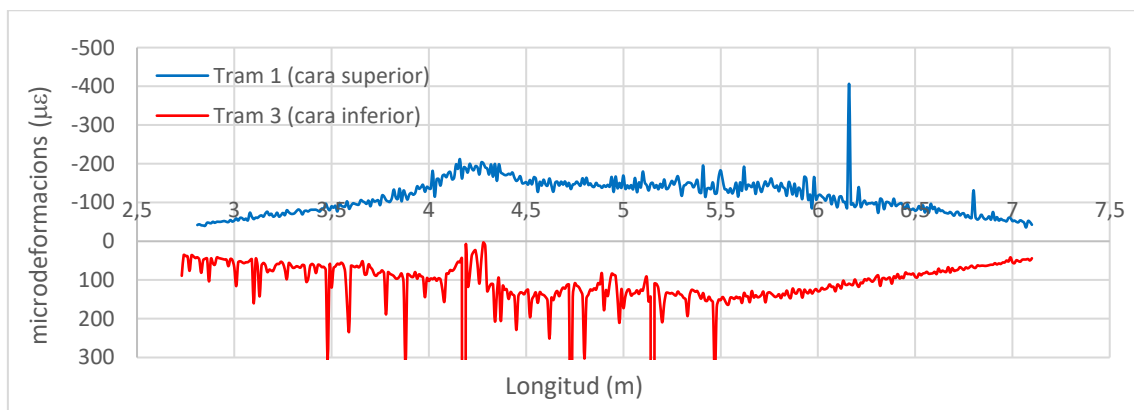


Figura 45. Lectures d'interès per a una càrrega total de 100kN

A primer cop d'ull es pot deduir que els resultats són els esperats, valors de signe contrari entre el tram 1 i 3, ja que estan situats en la cara superior i inferior respectivament. A més a més, també s'observa una certa simetria entre ells, cosa que es podria considerar lògica assumint que les lectures són correctes. Finalment, per a aquest sistema de càrregues, uns 50kN cadascuna, fent un total de 100kN (força exercida pel pistó), els valors que s'obtenen en el centre del tram oscil·len entre les 100 i 200 microdeformacions. Aquests valors, per suposat, aniran variant depenent de les càrregues a les que es sotmeti l'estructura.

Així doncs, l'últim procediment que s'hauria de dur a terme abans de començar a treballar amb les dades obtingudes és filtrar aquells valors excepcionals obtinguts per fissures o errors en la lectura. D'aquesta manera aquest valors no interferiran en el càlcul d'altres paràmetres.

### Càlcul de la curvatura

A partir de les dades de les deformacions de la fibra òptica i combinant els resultats pertinents entre trams, es pot obtenir la curvatura de l'estructura al llarg de la seva longitud. En aquest estudi es combinaran els trams 1 i 3 i els trams 2 i 4, obtenint així dues lectures de curvatures per a cada punt de manera que es puguin comparar els valors i comprovar-ne doncs, la precisió. L'expressió que determinarà el valor de la curvatura en cada cas és el següent:

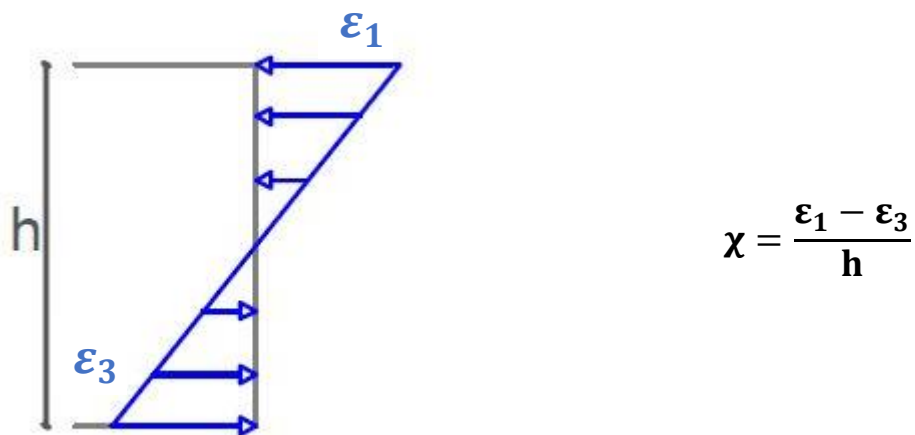
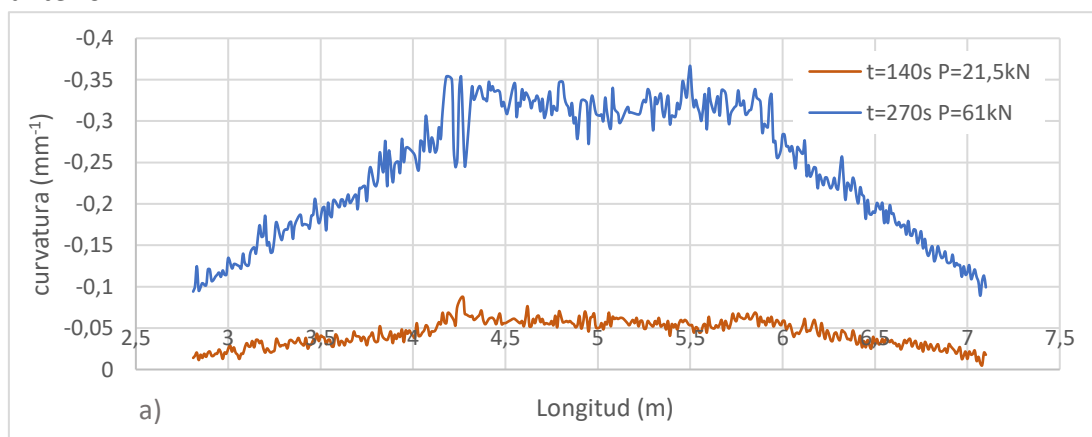
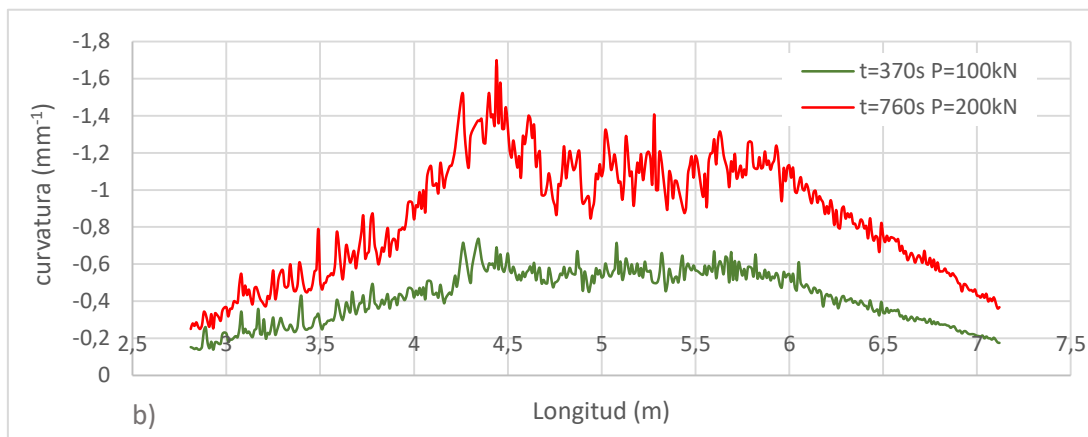


Figura 46. Expressió per al càlcul de les curvatures

On  $\chi$  és la curvatura de l'estructura en un punt,  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_3$  són les deformacions dels trams 1 i 3 respectivament en aquell punt i  $h$  és el cantell de la biga (0,5 m). En la Figura 47 es mostren un parell d'exemples de les curvatures que se n'obtenen del càlcul anterior.



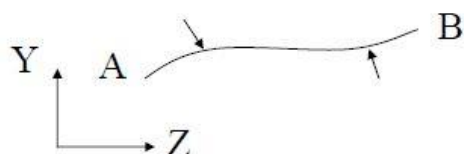


**Figura 47.** Curvatures obtingudes amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 21,5kN i 61kN (a) i curvatures obtingudes amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 100kN i 200kN (b)

En ambdós casos el resultat que s'obté és l'esperat, les curvatures màximes apareixen en el centre del tram, on la flexió és màxima. En canvi, en els extrems, on la deformació és mínima, la curvatura és també propera a zero. Per últim, si es focalitza la atenció en les zones dels extrems, es pot observar que cap de les lectures arriba mai a un valor nul; això es deu al fet que la fibra òptica està situada en la majoria de la longitud del tram, però no en els punts on estan situats els recolzaments, en aquests els valors haurien de ser iguals a 0. Per la tendència que s'intueix en la Figura 47 l'estructura es comportaria de forma esperada.

### Obtenció dels girs

La curvatura és un valor útil i rellevant de l'estructura, però no és un valor que visualment ofereixi una gran quantitat d'informació. Tanmateix, mitjançant la curvatura es poden obtenir els girs als quals està sotmesa la biga. El càlcul dels girs no és un procés tan senzill com el de la curvatura, s'usaran les fórmules de Navier-Bresse. Per al cas del gir l'expressió que s'utilitzarà és la següent:



$$\vec{\theta}_B = \vec{\theta}_A + \int_A^B d\vec{\theta}$$

On  $\vec{\theta}_i$  és el gir produït en el punt i. L'expressió bé formada per dos components, el primer és la contribució del gir d'un sòlid rígid en el punt anterior mentre que el segon component contempla la suma de girs que es produeixen entre el punt anterior i l'actual. L'expressió anterior també es pot mostrar de la següent manera.

$$\theta_B = \theta_A + \int_A^B \frac{M}{EI} ds = \theta_A + \int_A^B \chi ds$$

En la següent figura s'il·lustra la contribució de cada component.

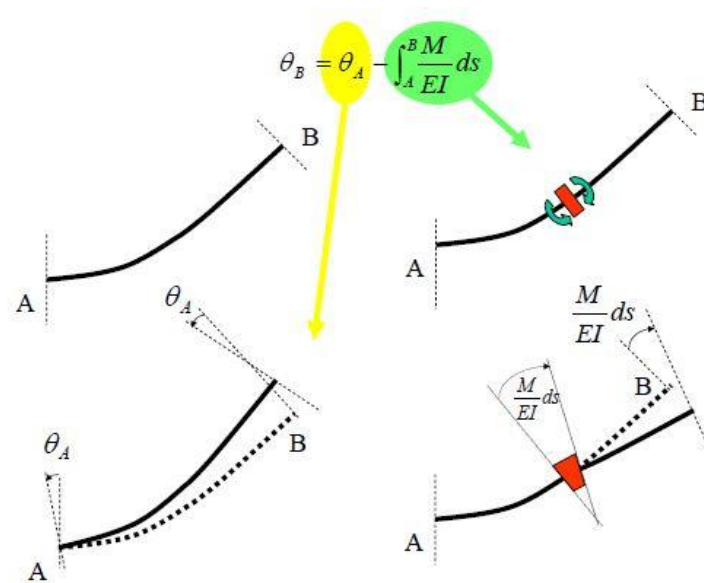


Figura 48. Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de girs

Tanmateix, en les expressions anteriors es parteix de la idea que es coneix la llei de moments i tallants, juntament amb les propietats i característiques de la biga. En el cas que s'estudia es satisfà el primer requeriment, però no es compleix el segon. Afortunadament, es disposa de la curvatura que s'ha calculat prèviament.

### Interpolació amb funció quadràtica

Per a la integració d'aquesta, degut a que es desconeix la funció exacta de la curvatura, hi ha dos mètodes que es poden usar. Un d'ells és la interpolació d'una funció quadràtica a partir de les dades de la curvatura.

Existeixen diversos procediments manuals per a realitzar la interpolació d'una funció quadràtica, aquests comporten normalment una càrrega de càlcul força important quan el nombre de dades amb les quals es treballa és gran. Afortunadament, actualment existeixen procediments computacionals que permeten l'estalvi considerable de temps i probablement ofereixen més precisió que els procediments manuals.

Així doncs, utilitzant les eines informàtiques de les que es disposa habitualment (programes com el Microsoft Excel en són exemples) s'ha realitzat la interpolació quadràtica a la que es feia referència. En la Figura 49 és mostren alguns exemples de les funcions de segon grau.

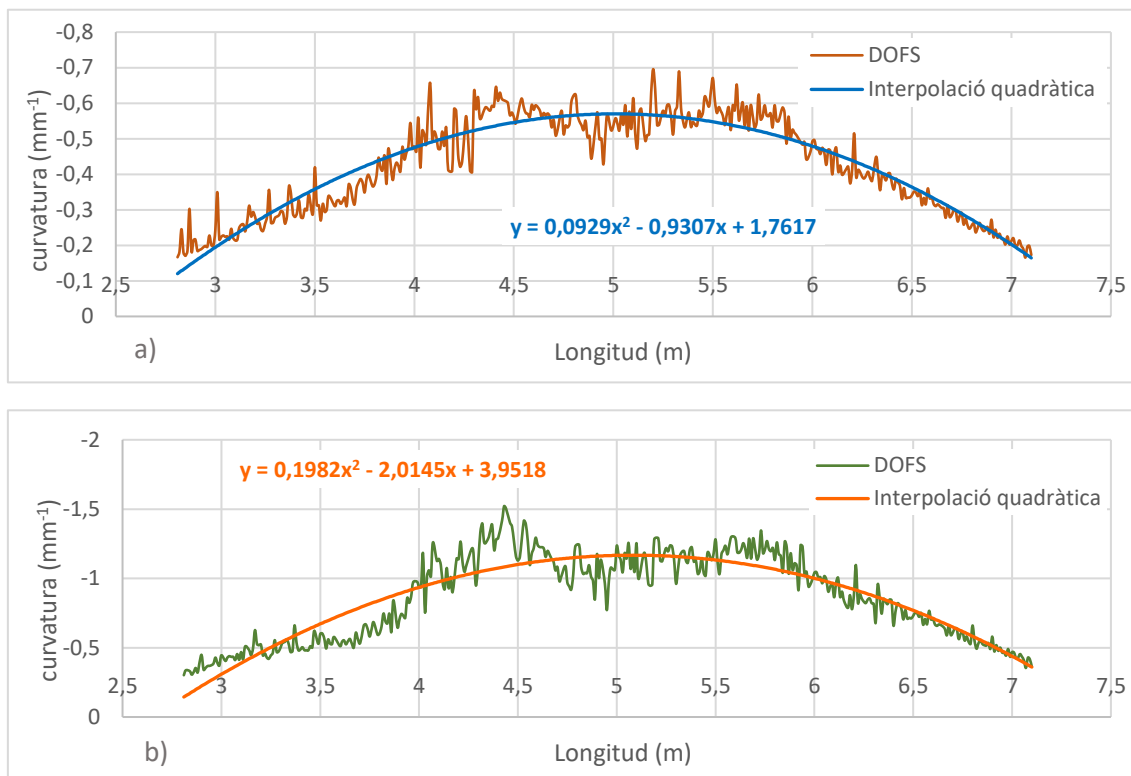


Figura 49. Funcions obtingudes amb la interpolació quadràtica de la curvatura per als casos de 100kN (a) i 200kN (b)

Amb la funció que se n'obté es pot operar l'expressió anterior i aconseguir així els valors del gir desitjats. En la Figura 51 es mostren els resultats comparant-los amb el mètode que es desenvoluparà a continuació.

#### Aproximació amb la Regla del Trapezi

D'altra banda, el mètode complementari a la interpolació quadràtica és l'aproximació amb la Regla del Trapezi, que com més resolució tingui la fibra òptica, més exacta és.

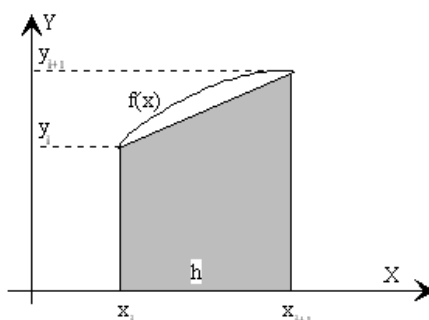


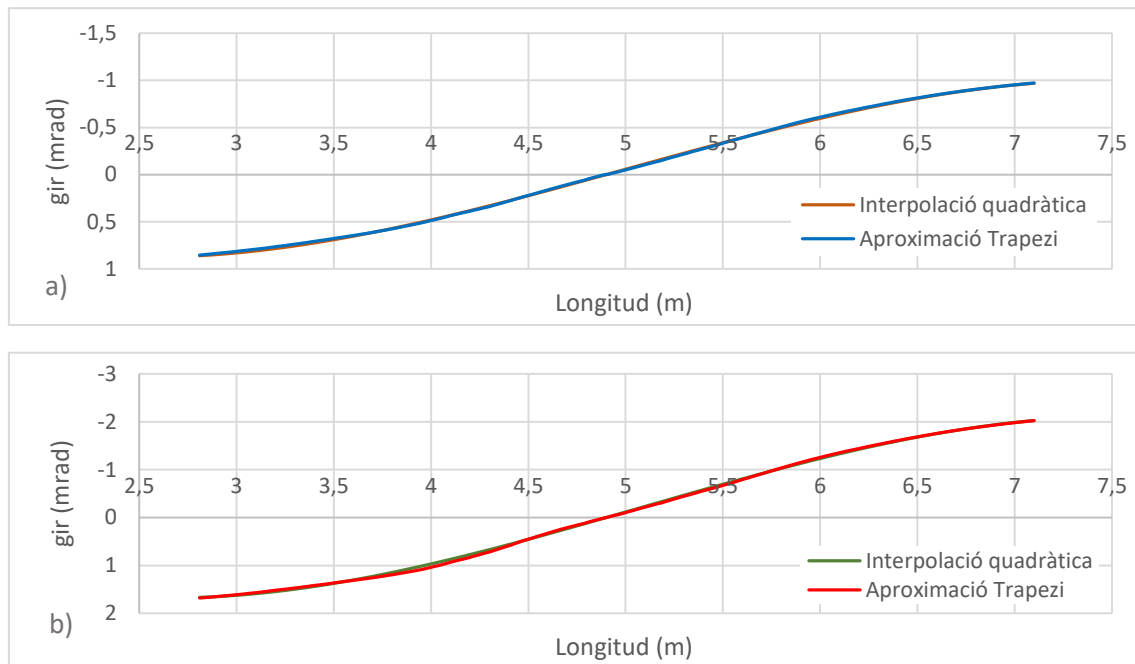
Figura 50. Integració per la regla del trapezi

Aquesta aproximació té la característica que requereix un valor conegut, una condició, per a poder iniciar el procediment; es considerarà un gir nul en el centre del tram ( $x = 4,9\text{m}$ ) per la simetria de les càrregues i estructura. Aplicant doncs la regla del trapezi, l'expressió que s'usarà per al càlcul dels girs és la que es mostra a continuació:



$$\theta_i = \theta_{i-1} + \left[ \left( \frac{x_i + x_{i-1}}{2} \right) \cdot (x_i - x_{i-1}) \right]$$

Una vegada desenvolupats els dos mètodes utilitzables per a l'obtenció dels girs que es produeixen en l'estructura, es pot realitzar una comparació d'ambdós procediments per a veure si existeix gaire diferències entre ells. En la Figura 51 es mostren els resultats.

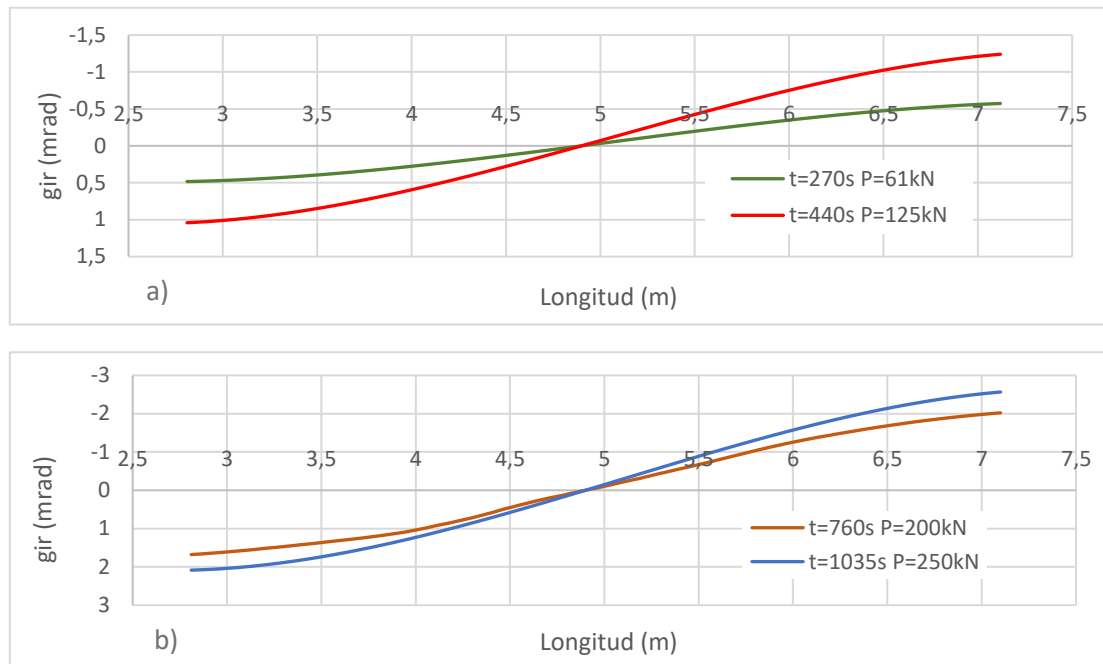


**Figura 51.** Comparació dels girs obtinguts amb els dos mètodes, interpolació quadràtica i aproximació amb la regla del trapezi per als casos de càrrega de 100kN (a) i 200kN (b)

Com es pot observar, ambdós mètodes presenten els mateixos resultats, sense diferències perceptibles, per tant, és indiferent el criteri que s'utilitzi si només es té en compte la precisió del procés. Per a la realització d'aquesta tesina s'ha utilitzat el segon mètode, l'aproximació de la integració mitjançant la regla del trapezi, ja que només és necessària una expressió per a la computació dels resultats, mentre que la interpolació requereix una funció diferent per a cadascun dels casos de càrrega.

### Càlcul dels girs

Així doncs, ja es pot realitzar el càlcul dels girs en tota la longitud de la fibra òptica, i per tant, de la biga, per als 11 casos de càrrega. Els resultats que se n'obtenen es mostren en la Figura 52.



**Figura 52.** Girs obtinguts amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 61kN i 125kN (a) i girs obtinguts amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 200kN i 250kN (b)

Els resultats obtinguts en el càlcul dels girs, igual que els de curvatura, tenen sentit. Al imposar un gir nul en la coordenada  $x=4,9m$  el gir augmenta i disminueix a partir d'aquest punt. Si s'observa la primera de les figures, es pot identificar una certa proporció, ja que una sèrie té valors propers a la meitat de l'altra sèrie, degut a que la càrrega aplicada de la primera també és de la meitat de la segona. Amb una altra proporció, però en la segona de les figures també té lloc aquest incident.

### Càlcul de les fletxes

De la mateixa manera que passava amb la curvatura, el càlcul dels girs és útil i rellevant, però tampoc ofereix informació visual vital per a identificar el comportament de l'estructura. No obstant, repetint un procediment semblant al realitzat per al càlcul dels girs, és possible obtenir les fletxes o deformacions verticals que patirà l'estructura al sotmetre-la a les càrregues esmentades. L'expressió per al càlcul de les fletxes també se la identifica com a equació de Navier-Bresse, és la següent:

$$\vec{u}_B = \vec{u}_A + \vec{\theta}_A \wedge \vec{r}_{AB} + \int_A^B d\vec{u} + \int_A^B d\vec{\theta} \wedge \vec{r}$$

On  $\vec{u}_i$  és el desplaçament vertical produït en el punt  $i$  i  $\vec{r}_{AB}$  és la distància que separa els punts A i B. En aquest cas, l'expressió està formada per la combinació de quatre components; els dos primers representen la contribució d'un sòlid rígid en la fletxa del punt on es calcula, el tercer component afegeix la contribució del desplaçament vertical induït de la pròpia porció  $i$ , finalment, el quart i últim component contempla la fletxa induïda pels girs que puguin tenir lloc en la pròpia porció. Si es

desenvolupa l'expressió i prenent de referència els eixos de l'expressió anterior es pot arribar a aquesta altra.

$$\vec{u}_B = \vec{u}_A + \vec{\theta}_A (Z_B - Z_A) + \int_A^B \left( \frac{N}{E\Omega} dY + \frac{Q}{G\Omega_c} dZ \right) + \int_A^B \chi (Z_B - Z) ds$$

En les següents figures es mostrarà gràficament la contribució de cadascun dels components.

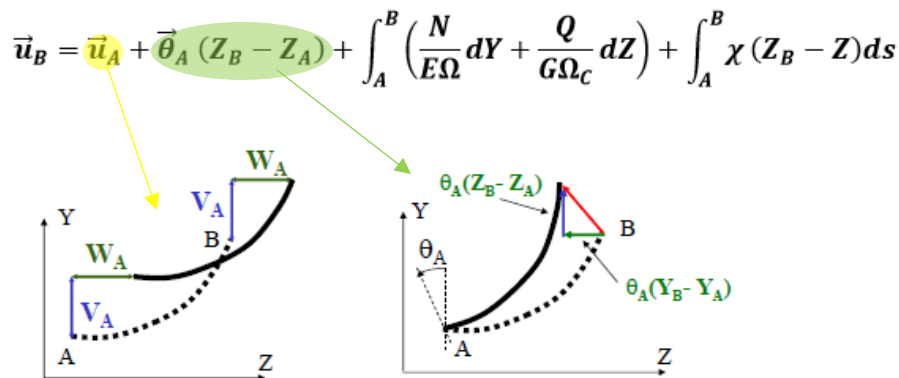


Figura 53. Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de desplaçaments verticals (dos primers components)

En la Figura 53 és mostren els desplaçaments que es poden produir en un sòlid rígid, la translació induïda pel punt anterior i la rotació d'aquest. El tercer component descriu l'afectació que pot tenir l'aparició d'axils i tallants en l'estructura. En el nostre estudi, les càrregues que s'apliquen no deriven en esforços axils així que el primer sub-component de la primera integral s'anul·la. Pel que fa al segon sub-component, el que representa la interacció dels tallants en l'estructura, diverses tesis i estudis determinen que, excepte casos on la peça que s'estudia és curta (relació llum/cantell petita), la seva contribució al valor total és força reduïda, negligible, per tant, també s'ometrà (Canet, 2012).

Així doncs, només resta la contribució de l'últim component, el que contempla l'efecte de girs que es puguin produir en la porció que s'estudia. En la Figura 54 s'il·lustra aquest incident.

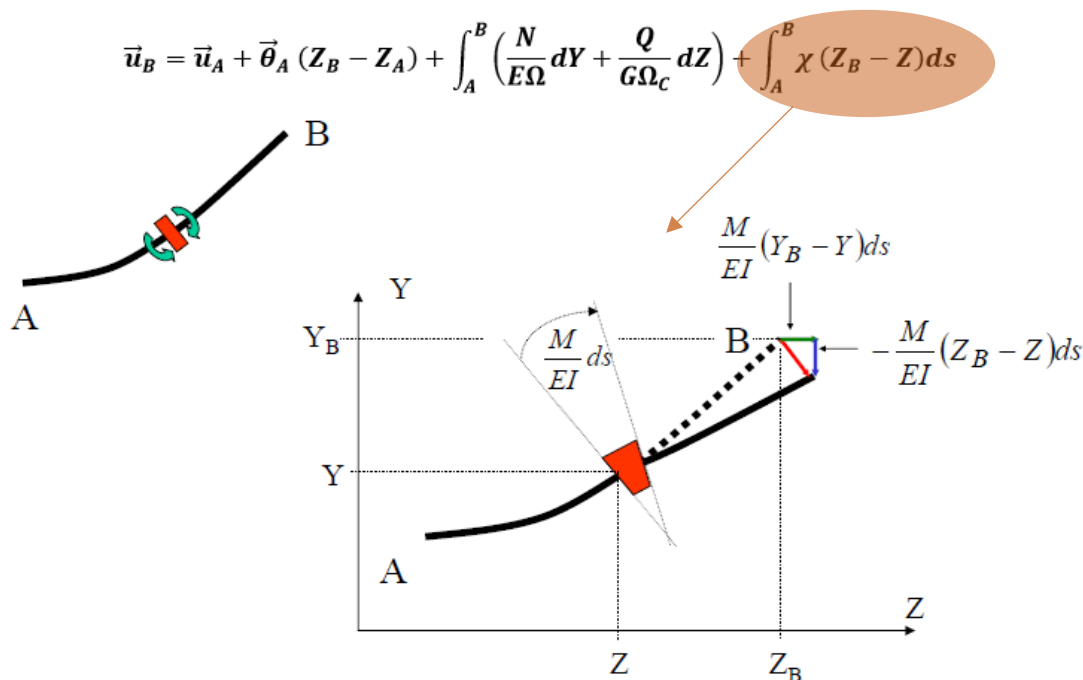


Figura 54. Expressió de Navier-Bresse per al càlcul de desplaçaments verticals (quart component)

Es pot observar que, quan es produeix una flexió en la porció mateixa, es crea una rotació que repercuteix en la posició final del punt que es calcula. Així doncs, una vegada s'han definit tots els components de l'expressió, es pot procedir en el càlcul del desplaçament vertical. Tanmateix, en aquest càlcul sorgeix el mateix problema que en el càlcul dels girs, es desconeixen les propietats de la biga, cosa que impossibilita el procediment descrit. Es realitzarà l'aproximació de la integració mitjançant la regla del trapezi altre cop. De nou caldria destacar que una alta resolució del sistema permetria realitzar una aproximació força exacta als resultats reals.

$$u_i = u_{i-1} + \theta_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + \left[ \left( \frac{\chi_i + \chi_{i-1}}{2} \right) (x_i - x_{i-1})^2 \right]$$

En aquest cas, s'usarà una condició de contorn per a la integració que es pot deduir incorrecta però que, no obstant, permetrà obtenir resultats representatius. Es suposarà que en la coordenada  $x$  on s'inicia el tram 1 del sistema de fibra òptica ( $x = 7,1\text{m}$ ) el desplaçament vertical és nul. Aquesta condició seria certa si en aquest punt ( $x = 7,1\text{m}$ ) hi hagués ubicat un recolzament; tanmateix aquest punt dista  $0,65\text{m}$  del recolzament més proper així que, en cas que la biga es sotmeti a qualsevol tipus de càrrega vertical, la fletxa en aquesta coordenada no serà 0. Aquesta condició implicarà una translació de la llei de fletxes com indica la Figura 55. Per a evitar aquest inconvenient la solució s'aplicaria en la instal·lació del DOFS, iniciant el tram en un dels recolzaments, assegurant-se així el valor exacte d'una condició de contorn.

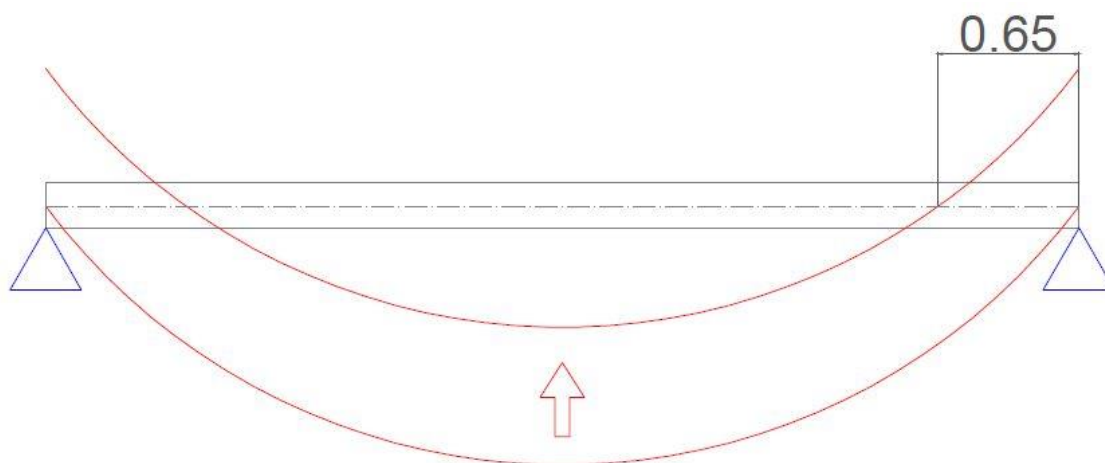


Figura 55. Translació de la llei de desplaçaments verticals

Així doncs, amb aquest càlcul no s'obté el valor exacte de les fletxes, però sí una gràfica representativa que serà totalment útil en la realització d'aquest estudi. En la següent figura es mostra un exemple dels resultats obtinguts.

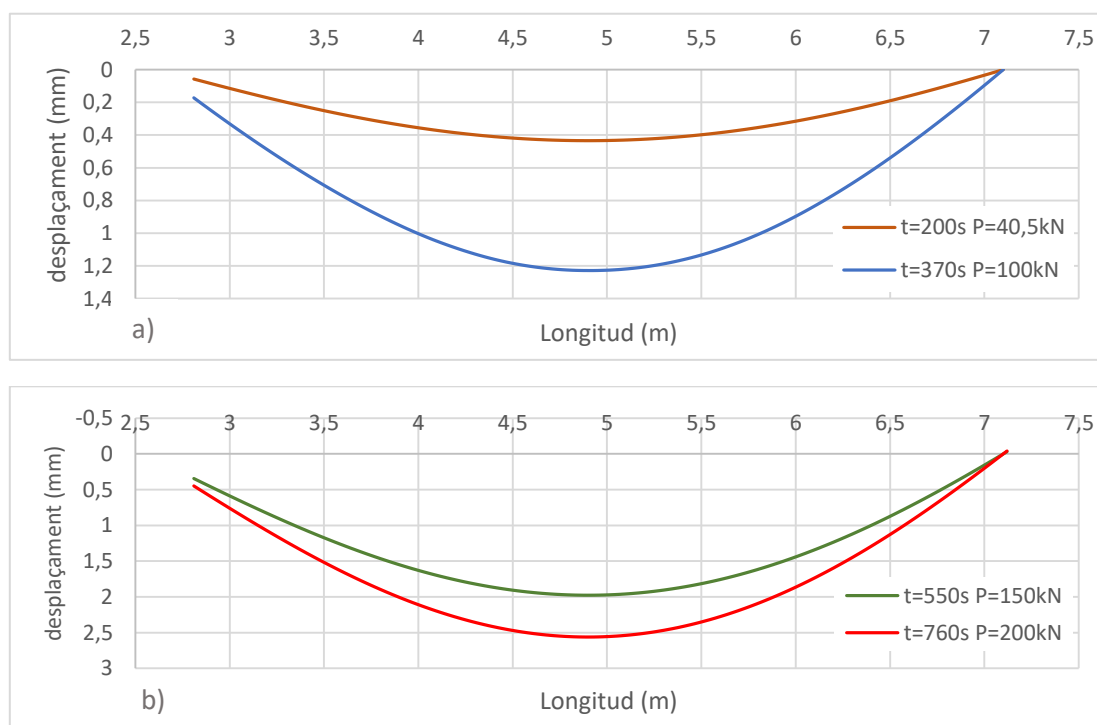


Figura 56. Fletxes obtingudes amb els trams 1 i 3 i unes càrregues del pistó de 40,5kN i 100kN (a) i fletxes obtingudes amb els trams 2 i 4 i unes càrregues del pistó de 150kN i 200kN (b)

Com es pot observar, en totes les sèries s'aplica la condició de contorn imposada, amb desplaçament vertical nul en la coordenada  $x = 7,1m$ . També es podria destacar que, en l'altre extrem, la representació no finalitzi en un valor nul. Si la distància que separés una punta del sistema OBR amb un recolzament fos la mateixa que en l'altre cas, aquest valor hauria de tenir un valor molt proper a 0 si no aquest mateix; no obstant la separació en aquest cas és de 0,76m mentre que en l'extrem on s'aplica la condició és

de només 0,65m. Aquesta diferència de 11cm produeix que la representació que s'observa en la Figura 56 no sigui totalment simètrica.

### Obtenció de les propietats mecàniques de l'estructura

En els apartats anteriors s'ha comentat que, a l'hora de realitzar l'estudi, es coneixien les propietats geomètriques de la biga gràcies a plànols que es van subministrar per part d'altres departaments que també feien ús de l'estructura. Tanmateix, les propietats mecàniques eren desconegudes. En els procediments anteriorment realitzats, el coneixement d'aquests paràmetres no era necessari, ja que es partia de les lectures que ha proporcionat el sistema de sensors distribuïts de fibra òptica. No obstant, si es desitja comparar els resultats amb els obtinguts mitjançant un model teòric, s'han de realitzar una sèrie de processos per obtenir les propietats mecàniques necessàries per al correcte disseny d'aquest.

L'única característica mecànica desconeguda necessària és el mòdul d'elasticitat ( $E$ ), altrament anomenat mòdul de Young, que caracteritza el comportament d'un material elàstic. Aquest té un valor constant i es pot trobar empíricament mitjançant proves de compressió del material.

Tanmateix, en aquesta tesi es realitzarà un altre tipus de procediment, matemàtic i aproximat, per a determinar el valor del mòdul d'elasticitat. Es partirà de la següent expressió:

$$M = \chi \cdot EI$$

On  $\chi$  és la curvatura que s'ha obtingut amb el sistema OBR,  $EI$  representa la relació combinada del mòdul d'elasticitat  $E$  i el moment d'inèrcia  $I$ , finalment  $M$  és el moment que hi ha en cada punt de l'estructura. Aquest moment s'obté mitjançant el cas d'una biga simplement recolzada amb dues càrregues iguals situades de forma simètrica.

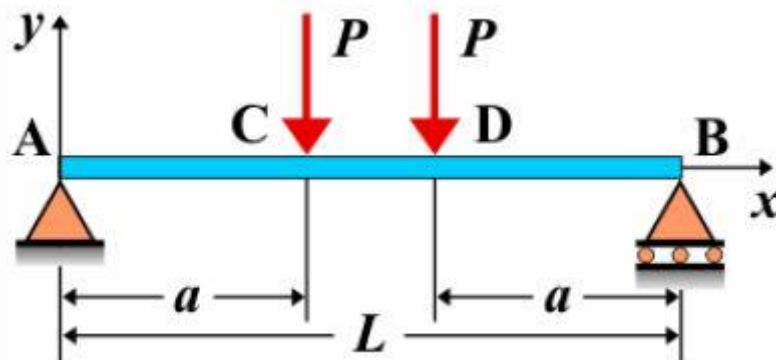


Figura 57. Esquema d'una biga birrecolzada amb dues càrregues iguals i simètriques

La llei de moment que se n'obté es divideix en tres trams (AC, CD i DB). Les expressions que determinen el moment en cada punt per a cada tram són les següents:

$$M_{AC} = Px$$

$$M_{CD} = Pa$$

$$M_{DB} = P(L - x)$$

Així doncs, si es computa el càlcul amb les curvatures obtingudes i els moments de cada tram s'obté un núvol de punts que determinarà un valor aproximat de la relació  $EI$ , que permetrà el disseny d'un model teòric. En la Figura 58 es mostren els resultats obtinguts en alguns dels casos.

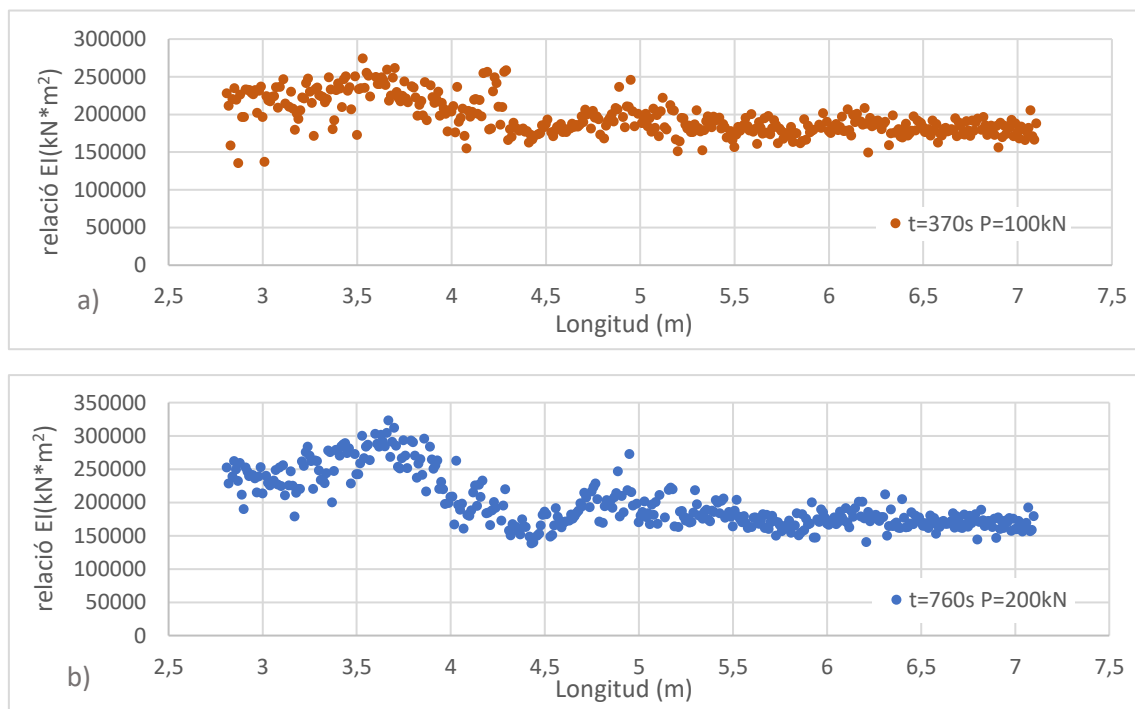


Figura 58. Resultats obtinguts de la relació  $EI$

Visualment hi ha poca informació que se'n pugui extreure de la Figura 58, només un valor aproximat de la relació  $EI$ . En un terme poc precís, aquest valor seria proper als  $200.000\text{kNm}^2$ , que es traduiria en un valor de  $E$  proper als  $44\text{GPa}$ . Aquest valor indicaria que el formigó usat per a l'execució de la biga és d'alta resistència, característica que coincidiria amb les informacions que s'havien transmès entre els diversos departaments que utilitzaven l'estructura per a diversos estudis. No obstant, s'ha observat que en els diferents casos de càrrega que s'han realitzat aquest valor pot variar considerablement, de l'ordre de  $4\text{GPa}$ . Aquest és un marge massa gran per considerar un valor mitjà, per tant, es realitzaran una sèrie de càlculs i comprovacions per apropar-nos a un error molt més reduït.

L'estudi que s'ha realitzat contemplava la comprovació dels resultats obtinguts pel sistema de sensors de fibra òptica amb els resultats obtinguts d'un model teòric dissenyat en un programa informàtic. Tanmateix, a arrel de la poca precisió obtinguda en la determinació de les propietats mecàniques de l'estructura, aquesta tesina inclourà

també variacions en el model teòric esmentat que permetran aproximar-nos en l'obtenció d'un valor més precís i exacte. En la secció posterior de Resultats i Discussió es desenvoluparà àmpliament el procés esmentat.

## Model Teòric

Així doncs, per a comprovar que les lectures subministrades pel sistema OBR s'adeqüen a la realitat, s'ha dimensionat un model teòric que permetrà l'obtenció de valors exactes o, si més no, molt propers a la realitat. Aquest model s'ha realitzat amb el programa informàtic SAP2000. Com s'ha comentat també, no s'ha realitzat un sol model amb tots els sistemes de càrrega considerats, sinó que s'ha dissenyat un model per a cadascun dels casos de càrrega a causa de la desconeixença d'un valor exacte del mòdul d'elasticitat. Més endavant se'n donaran més detalls.

En primer lloc, s'ha definit la geometria de la estructura. Evidentment, aquest pas serà idèntic per a tots els models.

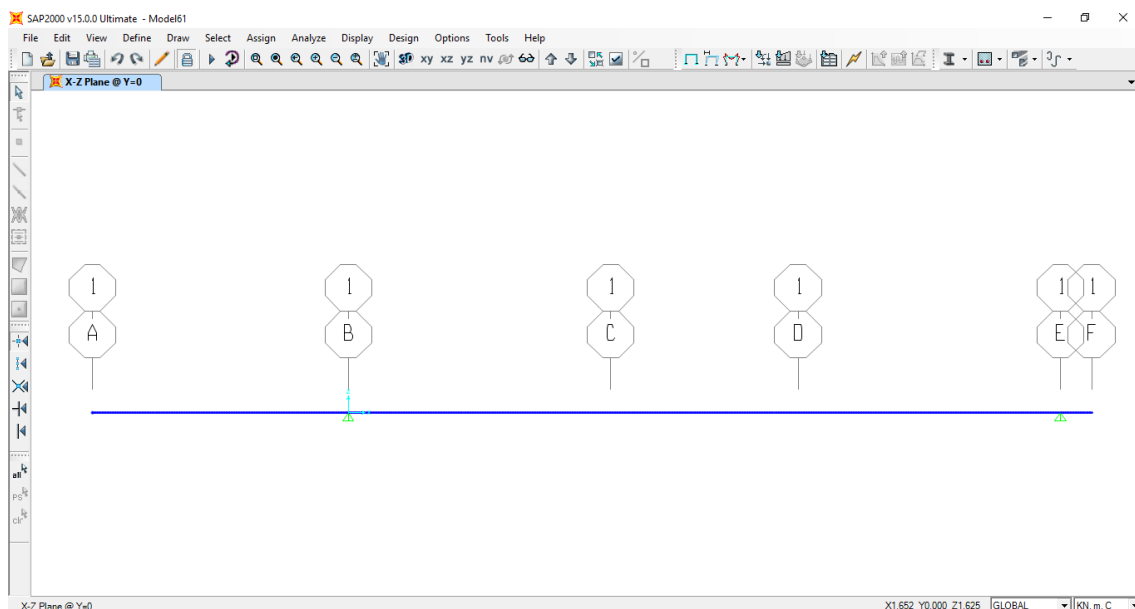


Figura 59. Esquema del model dissenyat amb el programa SAP2000

Com es pot suposar, les dimensions utilitzades en el disseny són les mateixes a les mostrades anteriorment, en les Figures 38 i 40. Els trams AB i EF, degut al fet que no estan sotmesos a cap càrrega, podrien ser omesos. No obstant, per a mantenir la familiaritat i l'esquema utilitzat fins ara, s'ha decidit mantenir-los. A més a més, en cas que en un futur es volgués fer ús d'aquest model, amb un sistema de càrregues amb una ubicació diferent, és més pràctic un model dissenyat amb la totalitat dels trams de la biga. La secció de la biga utilitzada és la que es mostra en la Figura 39.

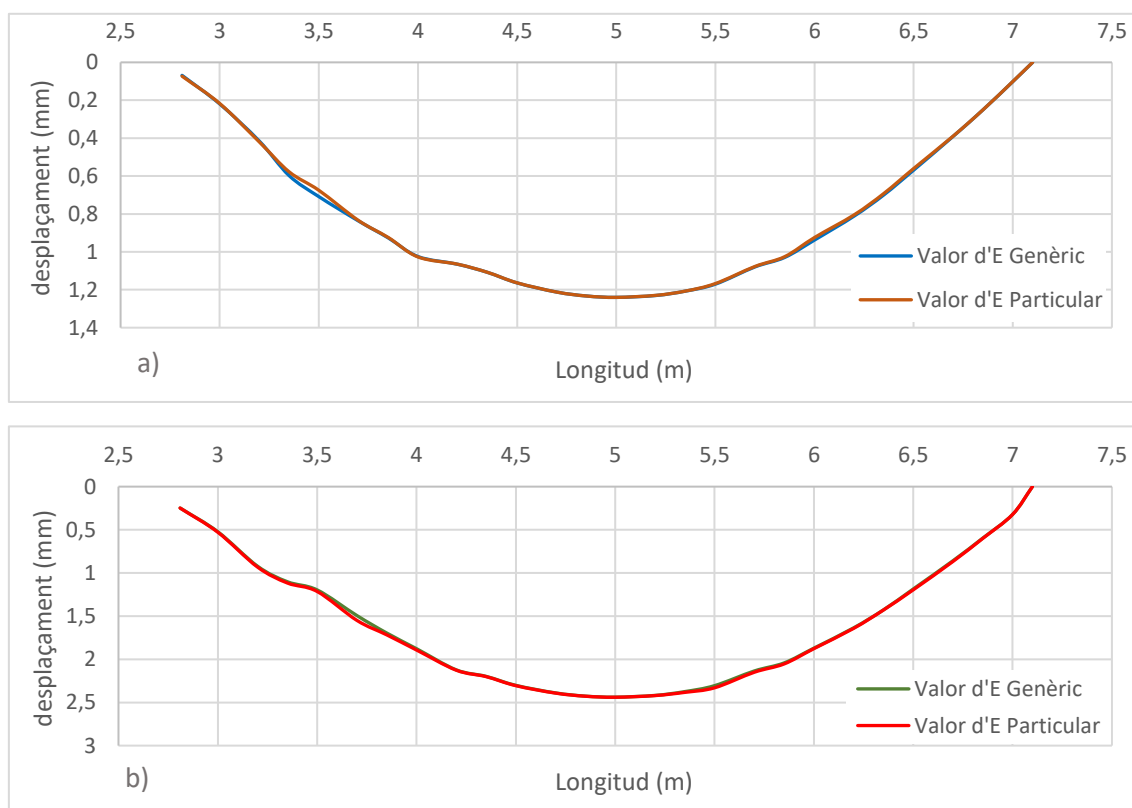
El paràmetre que variarà respecte cada model dissenyat és, a part del valor de la càrrega a la que es sotmetrà la biga, el valor del mòdul d'elasticitat que se li introduirà a l'estructura. Aquest valor és el que s'obté mitjançant el procés desenvolupat en l'apartat anterior (Obtenció de les propietats mecàniques de l'estructura). S'han



considerat dues hipòtesis per maximitzar la precisió del procediment. La primera hipòtesi és la d'introduir un únic valor genèric de mòdul d'elasticitat a tota la biga; consistiria en obtenir per a cada cas de càrrega un valor mitjà i aplicar-lo en el model.

La segona hipòtesi, en canvi, és un procés més prolongat. Com s'ha comentat anteriorment, el sistema OBR utilitzat té una precisió d'1cm al llarg de tota la fibra; per tant, cada centímetre de fibra òptica obtindrà una lectura, que permetrà el càlcul del mòdul d'elasticitat en aquella secció. Així doncs, es pot aplicar un valor d' $E$  per a cada llesca de biga d'1cm d'ample en el model teòric.

Aquestes dues hipòtesis permetran confirmar si es produeix gaire variació en els resultats si es considera un valor genèric del mòdul d'elasticitat o és preferible discretitzar aquest valor per a totes les seccions. En la Figura 60 es mostren un parell d'exemples dels resultats obtinguts amb ambdues hipòtesis.



**Figura 60.** Resultats obtinguts amb les dues hipòtesis per a la configuració del mòdul d'elasticitat amb un sistema de càrrega de 100kN del pistó (a) i 200kN del pistó (b)

Com es pot observar, els valors obtinguts són pràcticament idèntics, derivant així a la conclusió de què qualsevol de les dues hipòtesis produirien resultats correctes i útils per a la comparació dels resultats obtinguts amb el sistema OBR.

Degut a la semblança d'ambdues hipòtesis, el criteri per triar un mètode o l'altre és irrellevant, així que s'ha optat per la simplicitat de la primera, amb un valor genèric i únic per a tota la biga. D'aquesta manera, s'obté un valor del mòdul d'elasticitat per a cada cas de càrrega i s'introduirà en el model adequat.

No obstant, no calen grans coneixements en estructures i resistència de materials per observar que els valors que s'introduiran no haurien de distar gaire entre ells. És més, hauria de determinar-se un únic valor per a tots els models ja que el mòdul d'elasticitat és independent de les càrregues a les quals està sotmesa la biga si aquestes càrregues són instantànies, tal com es pot considerar en el cas de l'assaig. Aquest és un valor constant que depèn exclusivament del material utilitzat en l'execució de l'estructura. Tot i així, per a una comparació variada dels resultats és contemplaran les dues opcions, diferenciant entre casos de càlcul i amb un valor constant d' $E$ . En la secció de Resultats i Discussió es desenvoluparan àmpliament ambdós mètodes.

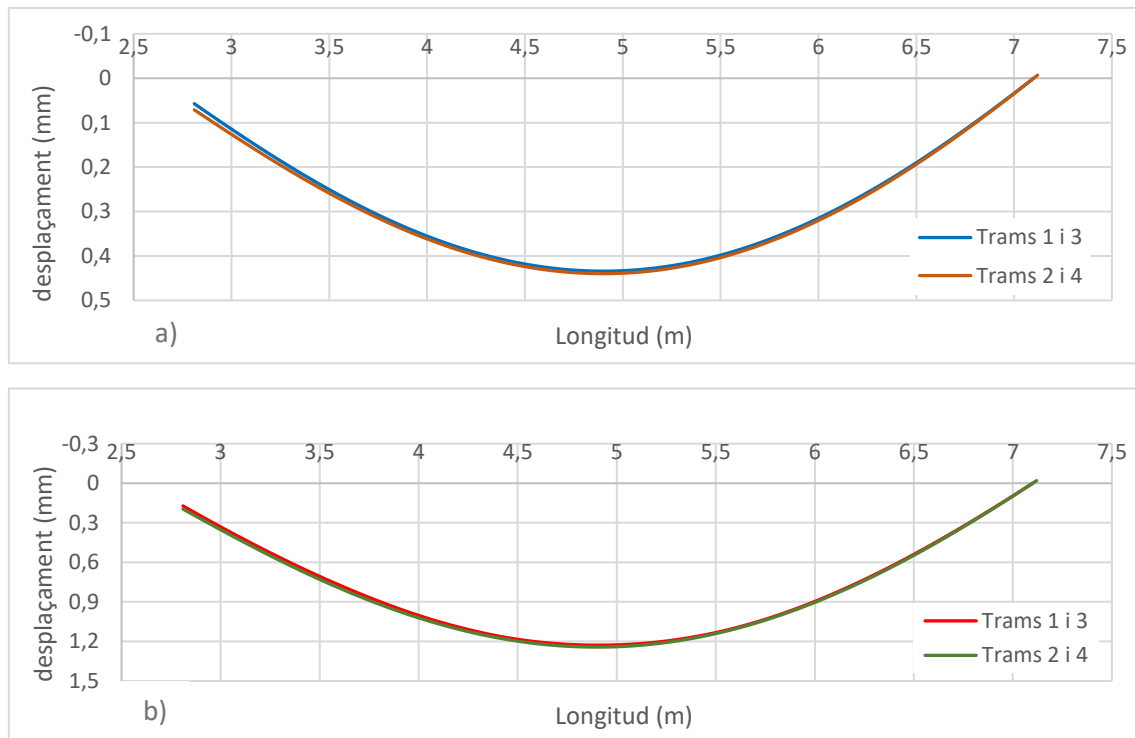
## RESULTATS I DISCUSSIÓ

Per tant, una vegada s'han descrit i desenvolupat el conjunt de procediments i càlculs que es realitzaran en aquesta tesina, es pot avançar i presentar els resultats obtinguts, juntament amb una discussió d'aquests per així extreure'n unes determinades conclusions.

### Comparació entre trams

En primer lloc, es realitzarà una breu comparació dels desplaçaments verticals (fletxes) que s'obtenen operant amb els trams 1 i 3 i els trams 2 i 4. Si els resultats que s'obtenen són notablement similars és comprovarà que lectures errònies puntuals no afecten la identificació del comportament global, així com també permetrà confirmar la correcció d'aquest últim, ja que dos càlculs independents resultaran idèntics.

Per tant, a continuació es mostra la Figura 61 que conté la comprovació esmentada per a diversos casos de càrrega.



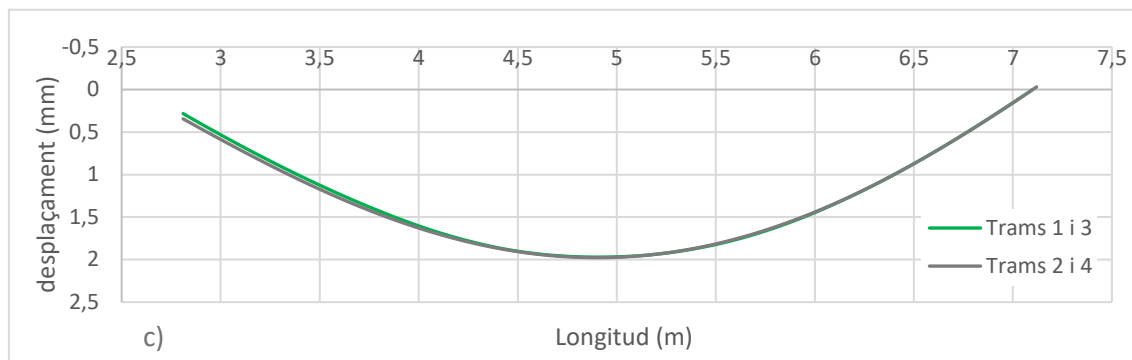


Figura 61. Comparació dels resultats entre els trams 1 i 3 i trams 2 i 4 per a càrregues de 40,5kN (a), 100kN (b) i 150kN (c)

Efectivament, els resultats són molt similars, pràcticament idèntics. Aquesta figura mostra clarament l'error del procediment utilitzat en el càlcul dels desplaçaments, la integració per la regla del trapezi; es pot observar com no hi ha error on comença el càlcul, en la coordenada  $x = 7,1\text{m}$ , i aquest es va incrementant a mesura que se n'allunya. Amb tot, s'ha pogut comprovar la correcció de les lectures, obtenint un comportament global idèntic en ambdós casos.

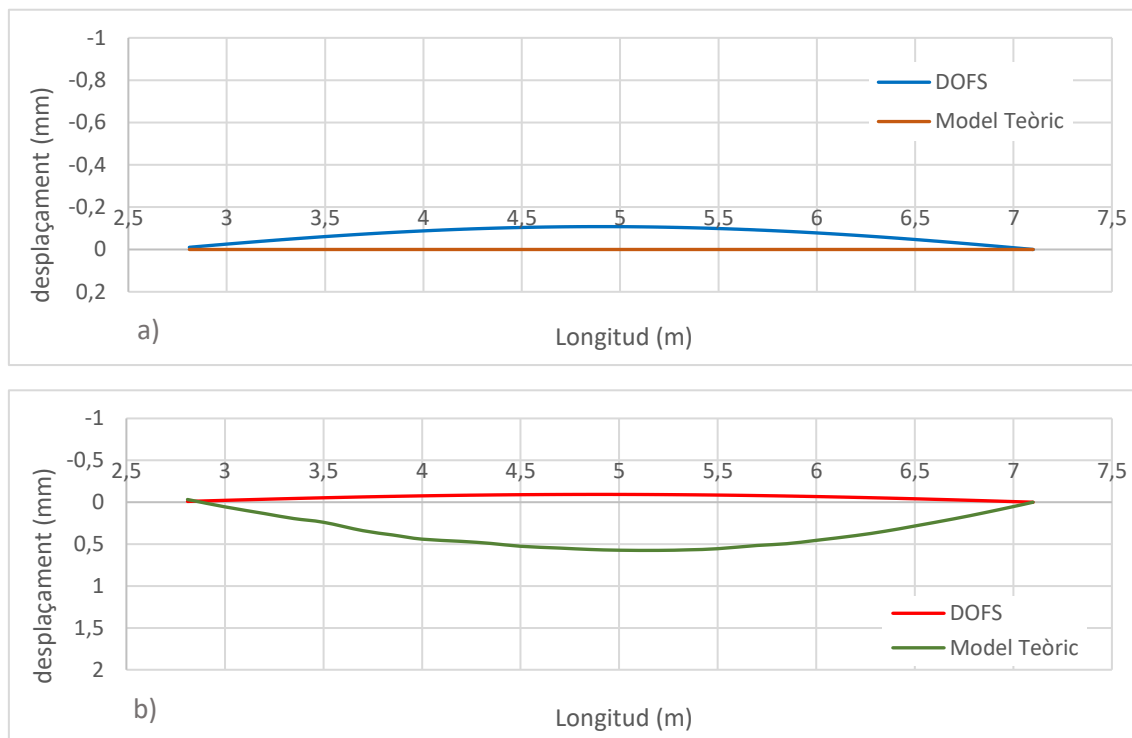
Així doncs, a partir d'aquest apartat no s'especificarà en les figures que es mostraran de quins trams s'han extret les lectures ja que seria una informació irrellevant.

### Comprovació dels resultats amb el model teòric

Una vegada s'ha comprovat la semblança de les lectures entre els trams 1 i 3 i els trams 2 i 4, s'avaluaran els resultats que s'han obtingut amb els sensors distribuïts de fibra òptica OBR comparant-los amb els resultats que s'extreuen del model teòric. Prèviament ja se n'ha pogut fer un breu anàlisi visual, observant el comportament de l'estructura que faciliten les lectures. D'aquest anàlisi només es poden obtenir conclusions qualitatives positives, ja que les deformacions de la biga tenen la forma esperada.

No obstant, una vegada s'ha executat el model teòric ja és possible comprovar-ne la fiabilitat. Abans de mostrar la comparació cal remarcar la modificació dels resultats que s'ha realitzat en el model teòric a causa de la condició de contorn aplicada en l'obtenció de les deformacions a partir de les lectures del sistema OBR. S'ha imposat com a condició de contorn un desplaçament vertical nul en la coordenada  $x = 7,1\text{m}$ , així que la llei de desplaçaments verticals estarà reduïda (com mostra la Figura 55). Per tant, per a una comparació més senzilla, i tenint en compte que d'aquesta manera els resultats que es representen no són els reals, també s'aplicarà l'esmentada translació en els desplaçaments verticals del model teòric.

Així doncs, a continuació es mostraran els resultats obtinguts pels sensors de fibra òptica comparats amb els valors que ha calculat el model amb el programa informàtic.



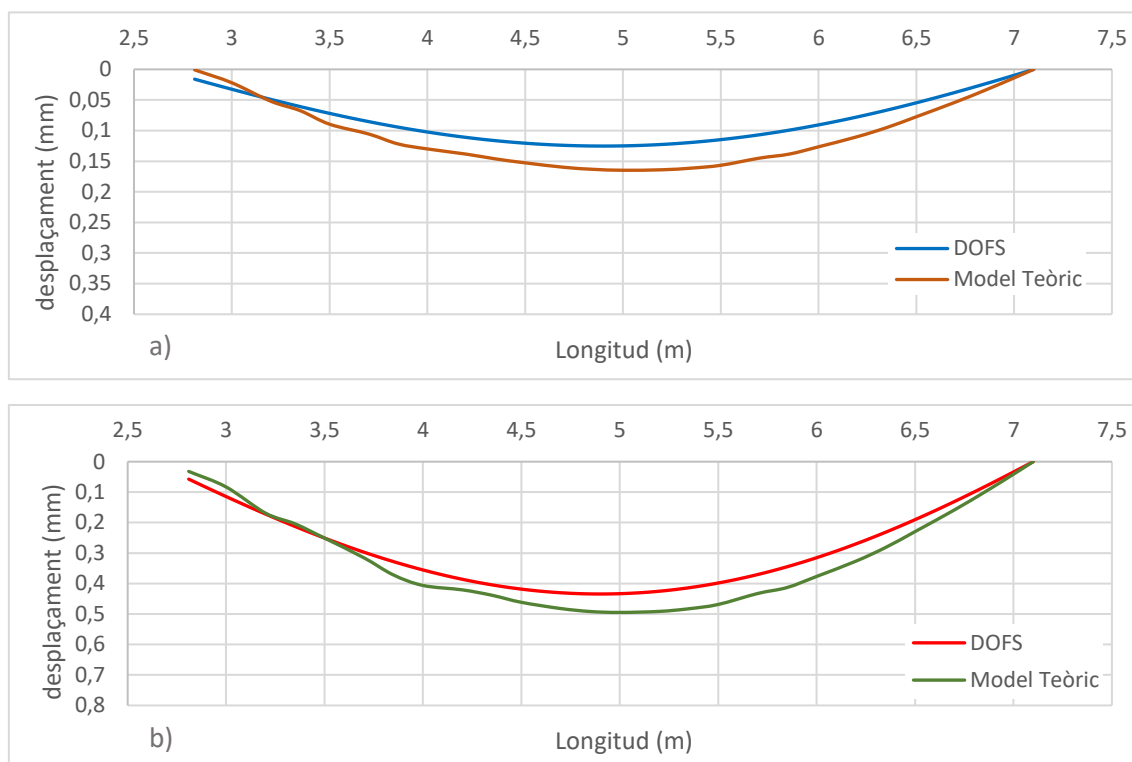
**Figura 62.** Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 0kN (a) i 1,84kN (b)

En aquesta figura, igual que en totes les altres que es mostren en aquest document, un desplaçament positiu indica un moviment on les fibres inferiors de la biga es traccionen, és a dir, la deformació que produiria el pes propi de l'estructura. També cal mencionar que s'ha introduït el valor del mòdul d'elasticitat particular de cada cas de càrrega en el model teòric.

En els primers casos de càrrega, els que es mostren en la Figura 62, les lectures que produeix el sistema de sensors OBR no s'adequa amb exactitud al comportament dels desplaçaments verticals. Això és degut a la calibració de l'aparell i els sensors, així com el procediment de col·locació i instal·lació del sistema DOFS. En els casos on no hi ha càrrega, o aquesta és molt petita, com que la deformació que ha de detectar el sensor és nul·la o pràcticament inexistent, el marge de precisió del sensor supera el mateix valor a detectar.

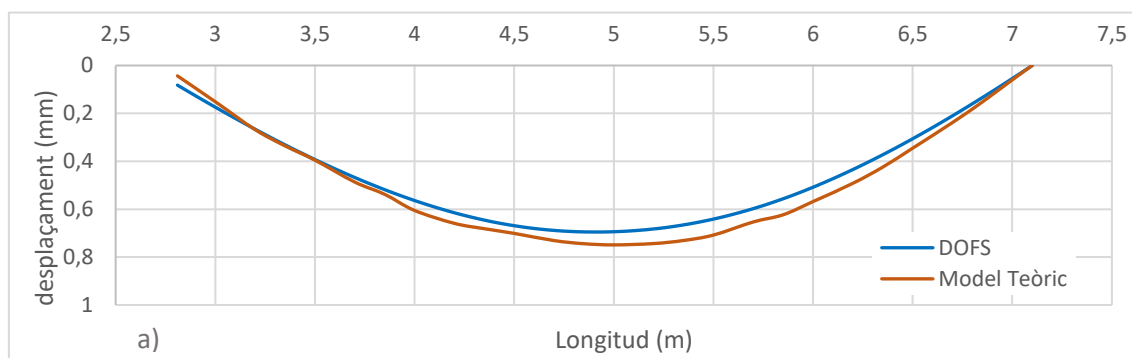
En el cas que es vulguin detectar deformacions molt petites, de l'ordre de micròmetres ( $\mu\text{m}$ ), seria més adequat l'ús de galgues extensiomètriques o sensors puntuals, encara que aquesta tipologia no descriu tan bé el comportament global de l'estructura. A més a més, el procediment matemàtic utilitzat per a l'obtenció dels desplaçaments a partir de les curvatures, les fórmules de Navier-Bresse, contenen també un petit error de càlcul que, mentre per a valors elevats o mitjans pot ser imperceptible, per a valors petits com els que s'han obtingut pot causar diferències notables.

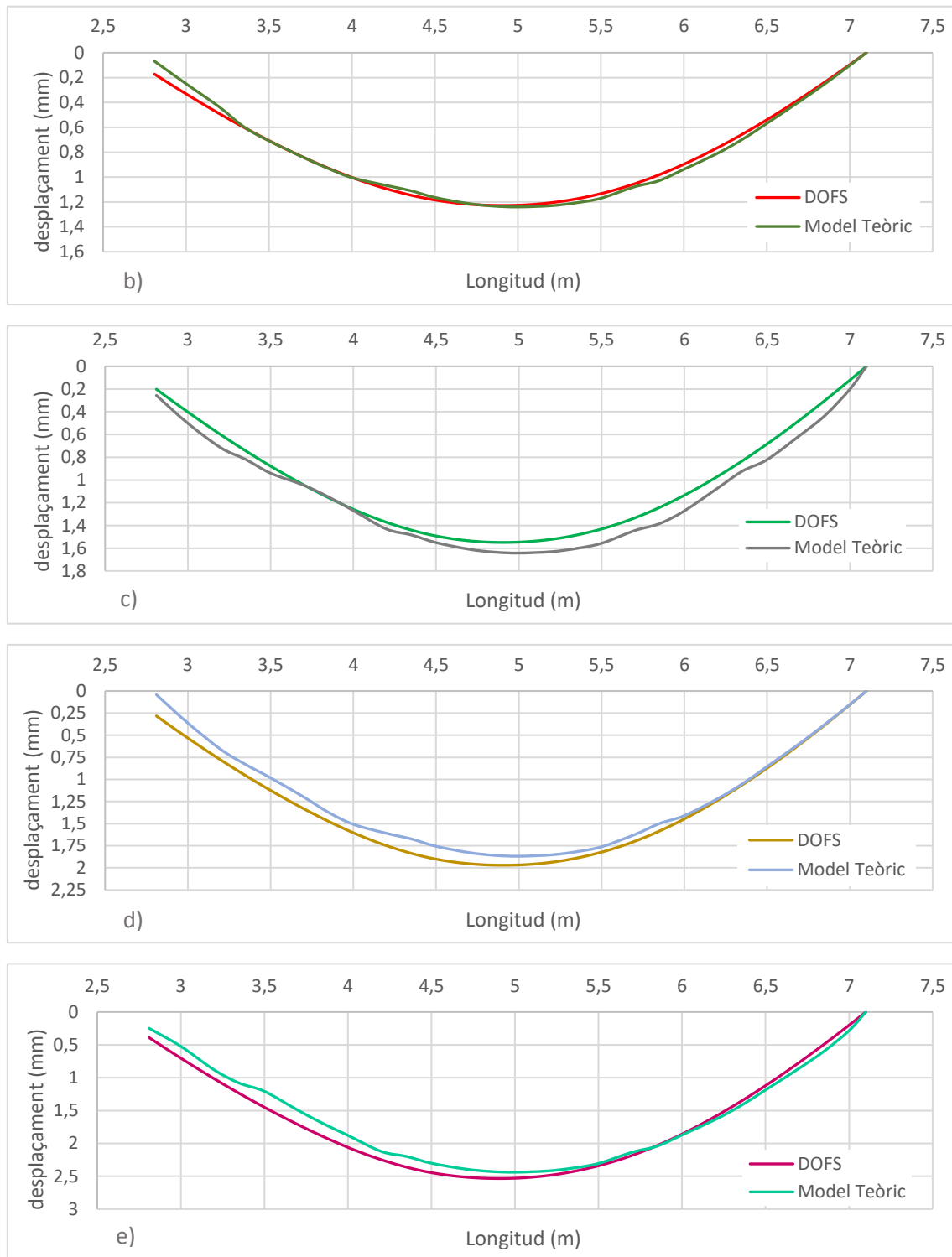
A continuació, es mostraran en la Figura 63 els dos següents casos de càrrega. En aquests casos la diferència dels casos anteriors es redueix considerablement.



**Figura 63.** Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 21,5kN (a) i 40,5kN (b)

Quan les càrregues ja són perceptibles a efectes de deformació, les lectures que se n'obtenen ja resulten força més semblants als valors obtinguts per el model teòric. Es pot observar que encara es manté una lleugera variació d'entre 0,05-0,1mm on la diferència és màxima per motius semblants als que s'han descrit anteriorment; la precisió mateixa dels sensors i els petits errors matemàtics de la integració per la regla del trapezi. Aquest precís comportament es manté quan la càrrega incrementa encara més, arribant a valors de fins a 200kN, on les lectures dels sensors no tenen diferències pràcticament amb els valors obtinguts pel model teòric, com s'observa en la Figura 64.



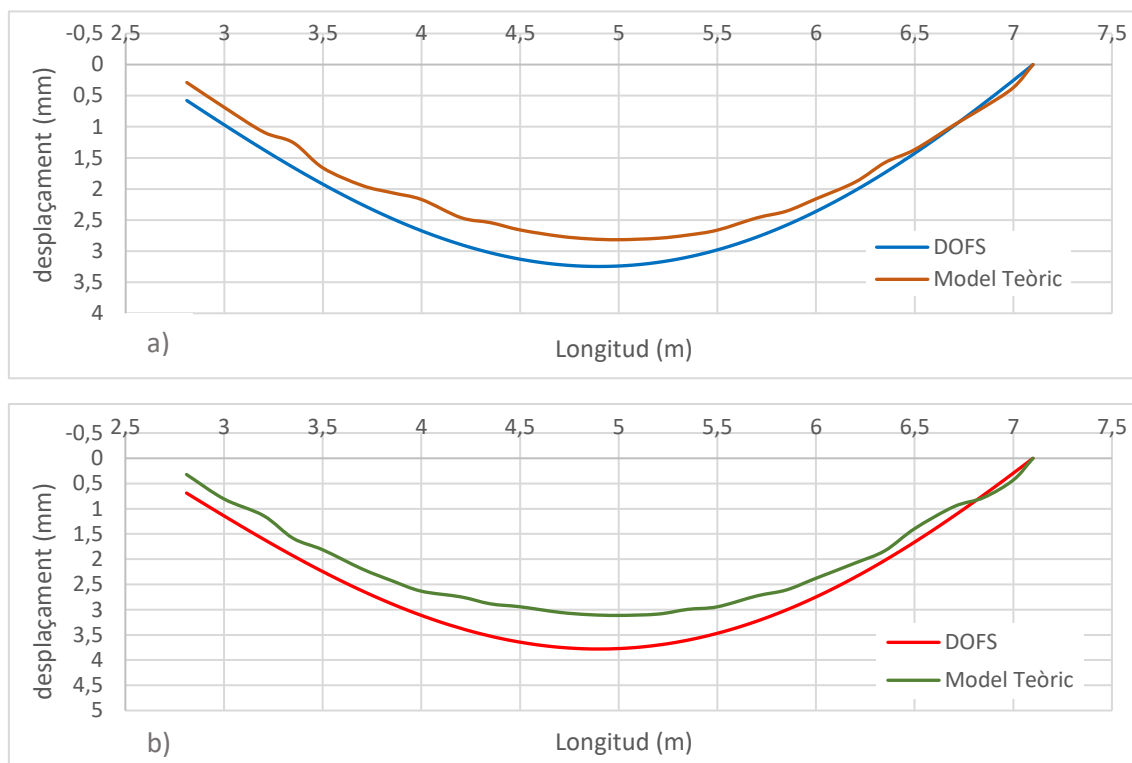


**Figura 64.** Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 61kN (a), 100kN (b), 125kN (c), 150kN (d) i 200kN (e)

Com s'observa en la Figura 64 els resultats que s'obtenen dels sensors OBR són molt semblants als del model teòric, amb una diferència màxima de 0,25mm. D'aquests resultats se'n pot extreure una valoració força positiva perquè ofereix una solució òptima per a l'anàlisi de deformacions en estructures per a situacions on aquesta mantingui un comportament elàstic.



Quan el sistema de càrregues al qual es sotmet l'estructura és major, proper al límit elàstic del material, poden aparèixer fissures que malmetrien el procés d'obtenció de dades del sistema OBR. Cal remarcar també que aquesta biga en concret s'havia sotmès prèviament a diverses proves de tallant i altres esforços, de manera que aquestes sol·licitacions podrien haver provocat algunes esquerdes que, amb les càrregues actuals, afectarien a la resistència de l'estructura. En la Figura 65 es representen els resultats obtinguts per aquestes càrregues que provoquen esforços propers al límit elàstic.



**Figura 65.** Comparació de les lectures del OBR amb el model teòric per a un sistema de càrregues de 250kN (a) i 300kN (b)

Les lectures que proporciona el sistema OBR no tenen tanta precisió com els resultats de la Figura 64, tanmateix la diferència no és excessiva, arriba a uns màxims de 0,5-0,75mm respecte els resultats que proporcionen els models teòrics.

Així doncs, es poden diferenciar tres grups depenent dels resultats obtinguts. En primer lloc, quan la càrrega aplicada és molt baixa, pràcticament nul·la, la deformació també ho és i això pot causar imprecisions en les lectures dels sensors. Tanmateix, les diferències també poden ser degudes a que inicialment el sistema de càrrega i els recolzaments s'acomoden a la aplicació de les primeres càrregues. En segon lloc, quan els esforços circulen per la branca elàstica, abans de que les seccions fissurin s'ha pogut comprovar la correcció i precisió dels resultats. I, finalment, en el cas on les càrregues deriven en esforços propers al moment de fissuració de l'estructura, baixa lleugerament la precisió del sistema OBR.

A partir d'aquest punt, l'estudi es focalitzarà en el grup on els resultats han sigut més precisos i/o semblants als del model teòric, concretament els casos de càrrega de 61kN, 100kN, 125kN, 150kN i 200kN . No obstant, aquest resultats s'han obtingut introduint el mòdul d'elasticitat particular de cada cas de càrrega quan, com és de suposar, aquest no hauria de variar pas entre casos. Per això, en el següent apartat s'intentarà conèixer la causa d'aquestes variacions.

### Anàlisi de la relació EI

En apartats anteriors s'han mostrat figures amb la distribució dels resultats obtinguts de la combinació de moments teòrics del cas de càrrega particular i les curvatures que proporcionen els sensors de fibra òptica (Figura 58). A continuació s'exposaran els mateixos resultats amb la funció de regressió lineal de cada sèrie de dades.

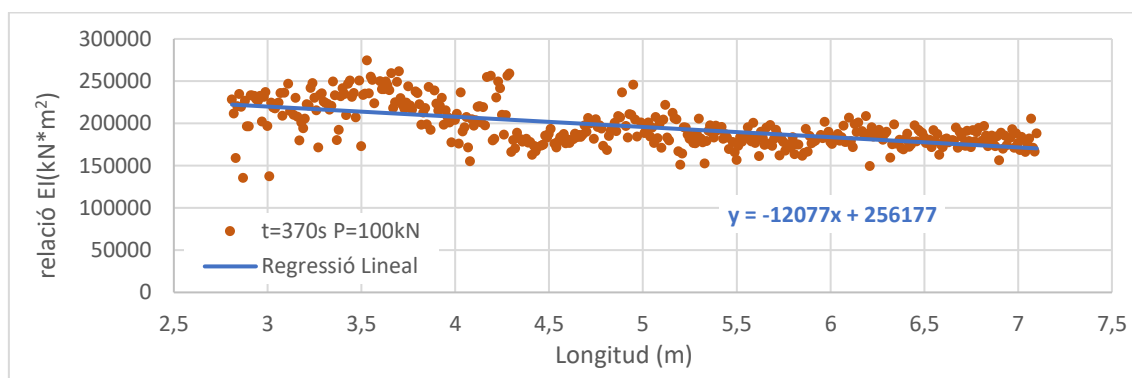


Figura 66. Resultats obtinguts de la relació EI per al cas de càrrega de 100kN

En la Figura 66 es pot observar com la funció de regressió lineal d'aquest cas de càrrega està lleugerament inclinada, quan les lleis i normes de resistència de materials determinen que ni el mòdul d'elasticitat ni el moment d'inèrcia varien al llarg de l'estructura si no hi ha cap canvi en el material d'execució ni en la secció respectivament. S'ha comentat ja, i s'ha comprovat, que la secció de la biga és invariable, per tant aquesta variació que s'observa ha de ser provocada per algun canvi o afectació en el mòdul de Young.

El test es va dur a terme a laboratori, i es va executar amb la cura adequada per a aquest tipus de proves. Les càrregues es van aplicar a la biga mitjançant un pistó que, a la vegada, feia ús d'un mecanisme senzill, una llosa i un parell de taulons, per a la divisió de la força en dues càrregues com mostren els esquemes anteriors. Tanmateix, tot i les precaucions per a maximitzar la precisió del test, és possible que aquest mecanisme no fos executat exactament com fou dissenyat. En aquest apartat es desenvoluparà una hipòtesi que comprovarà si el problema ve causat per la mala execució del mecanisme o si, en canvi, l'error es produeix per una altra causa.

Es pot assegurar amb rotunditat que les càrregues a les quals es sotmet l'estructura tenen una separació d'exactament 1,5m. Així doncs, es contemplarà l'opció de que el mecanisme no estigues col·locat en la ubicació de disseny, sinó que desplaçés

les càrregues cap a un dels recolzaments. En aquest cas de càrrega la funció determina una major rigidesa en la meitat esquerra de la biga, és a dir, que hi pateix menors deformacions; aquest incident seria causat per un desplaçament de les càrregues cap al recolzament dret. Per tant, si es variés l'esquema predeterminat amb un lleuger desplaçament de les càrregues cap a la dreta, la funció patiria una estabilització, arribant a obtenir un valor constant.

Realitzant el canvi esmentat, la llei de moments pateix una variació en el seu esquema, essent la que es mostra en la Figura 67 la nova configuració d'una biga simplement recolzada amb dues càrregues iguals situades de forma asimètrica.

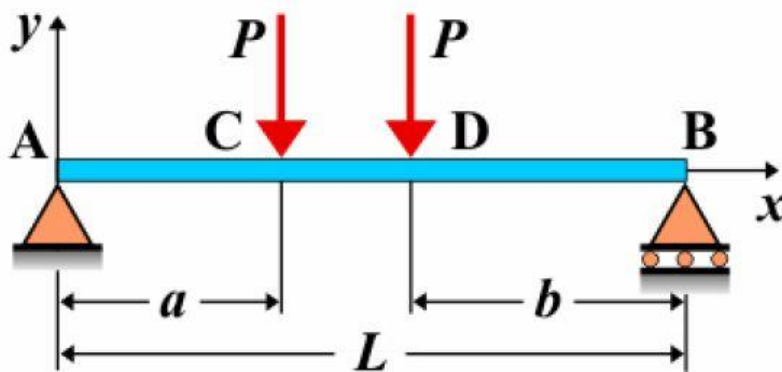


Figura 67. Esquema d'una biga birrecolzada amb dues càrregues iguals i asimètriques

Abans del càlcul de la llei de moments, es necessària l'obtenció de les reaccions verticals d'ambdós recolzaments. A continuació es detallen les expressions necessàries.

$$R_A = \frac{P(L - a + b)}{L}$$

$$R_B = \frac{P(L - b + a)}{L}$$

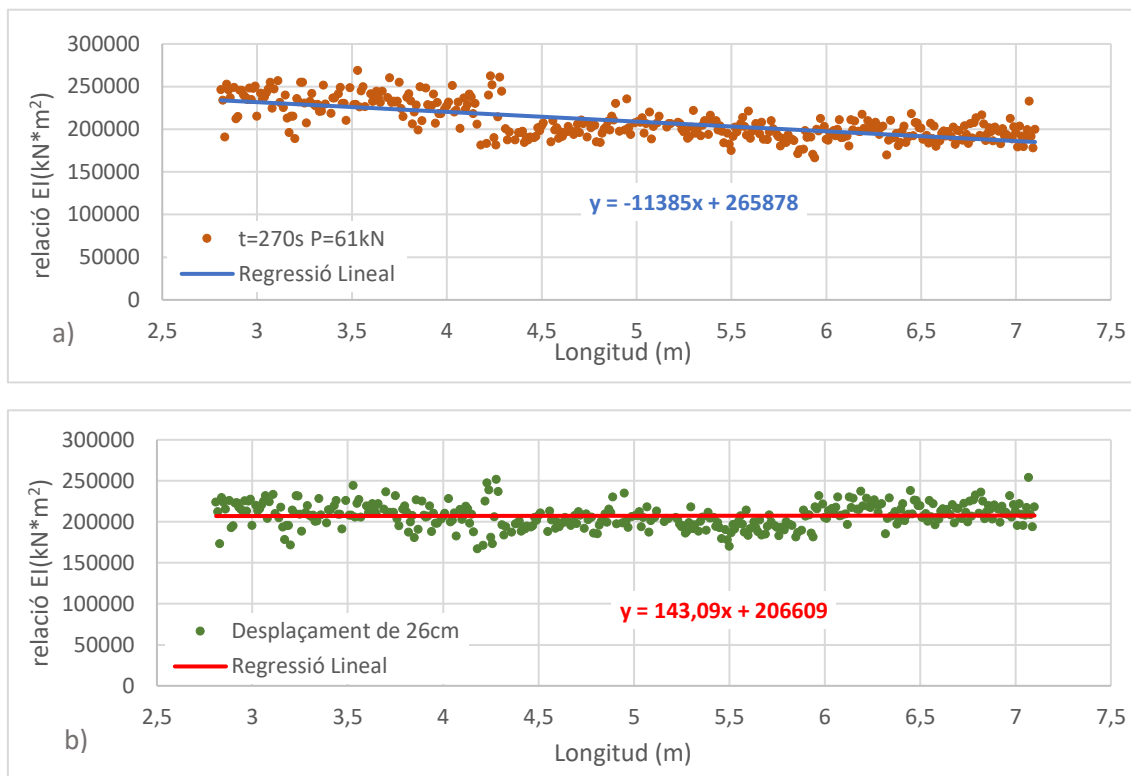
Ara doncs ja es pot procedir en el càlcul de la llei de moments, aquestes són les expressions per a la seva obtenció.

$$M_{AC} = R_A x$$

$$M_{CD} = R_A x - P(x - a)$$

$$M_{DB} = R_B(L - x)$$

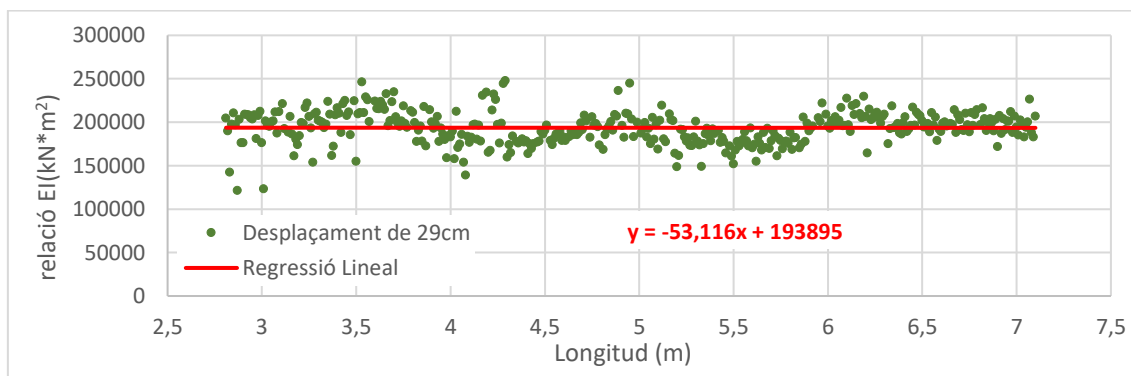
Per tant, amb el càlcul ja detallat de la relació  $EI$  i el pertinent desplaçament de les càrregues, es pot comprovar ja si la raó de les variacions del mòdul d'elasticitat és la no simetria de les càrregues. En la Figura 68 es mostren els resultats del cas de càrrega de 61kN centrats i desplaçats a la dreta.



**Figura 68.** Resultats obtinguts de la relació  $EI$  per al cas de càrrega de 61kN centrats (a) i desplaçats 26cm a la dreta (b)

Com s'observa en la figura, quan es desplacen les càrregues una determinada distància acostant-les al recolzament de la dreta, uns 26cm en aquest cas, la funció de regressió lineal s'estabilitza fent-se gairebé constant; el paràmetre que determina el pendent de la funció es redueix molt considerablement. Si es trobes la distància exacta aquest valor passaria a anul·lar-se.

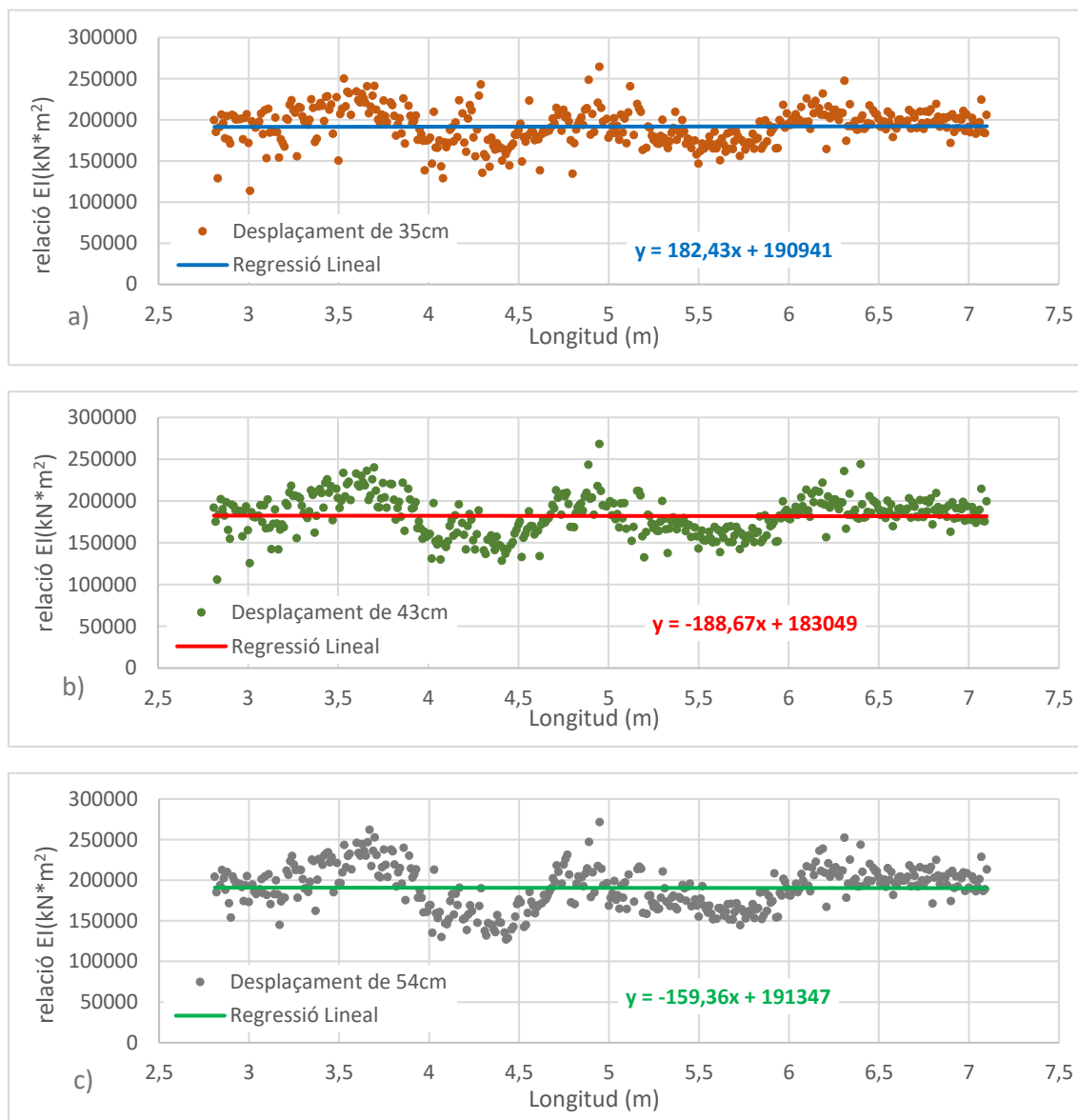
Estudiant els altres casos de càrrega s'obtidran els desplaçaments que estabilitzarien les funcions de cada cas i, si la raó de la variació de la relació  $EI$  fos la asimetria esmentada, aquests serien iguals en tots els casos. A continuació es mostren els resultats per al cas de càrrega de 100kN. Per a una correcta comprensió, s'hauria d'estudiar la Figura 69 juntament amb la Figura 66 mostrada prèviament.



**Figura 69.** Resultats obtinguts de la relació  $EI$  per al cas de càrrega de 100kN desplaçats 29cm a la dreta

Per al cas de 100kN la màxima estabilitat de la funció s'aconsegueix quan es desplacen les càrregues 29cm cap a la dreta en el càlcul. En aquest punt seria possible concloure que el desplaçament oscil·larà entre aquests dos valors (26 i 29cm). La resta de casos permetrà comprovar si aquesta és la causa de la variació d'EI o si, en canvi, la causa és una altra.

En la següent figura es mostren els desplaçaments requerits en cada cas de càrrega per a l'estabilització de les funcions de regressió lineal.



**Figura 70.** Resultats obtinguts de la relació EI per als casos de càrrega de 125kN desplaçats 35cm (a), 150kN desplaçats 43cm (b) i 200kN desplaçats 54cm (c)

Per tant, es pot observar com a mesura que s'incrementen les càrregues també augmenta la distància necessària per estabilitzar la funció de regressió. Això elimina l'opció de que la causa de la variació d'EI sigui el desplaçament de les càrregues cap a la

dreta. Es pot confirmar, doncs, que la prova de laboratori es va dur a terme de la manera que s'havia dissenyat, sense errors humans destacables.

Tanmateix, queda per determinar encara un valor únic del mòdul d'elasticitat que completarà la identificació de les propietats mecàniques de l'estructura. Tot i que els valors obtinguts fins ara varien entre ells, és cert també que en aquest grup de 5 casos de càrrega que presenta resultats més precisos els valors d'E que en resulten són similars entre ells, patint lleugeres desviacions, de manera que seria possible l'obtenció d'un sol valor que no presenti errors gaire destacables respecte el valor que s'interpreta de les lectures dels sensors.

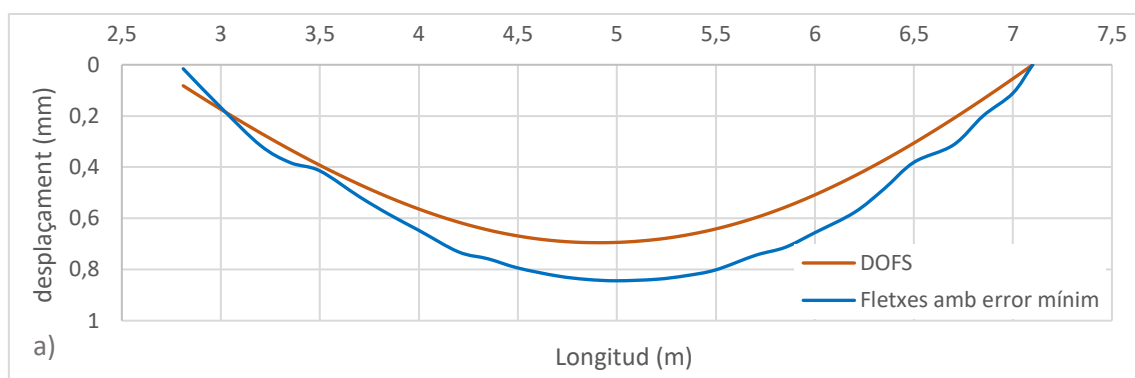
### Obtenció del mòdul d'elasticitat

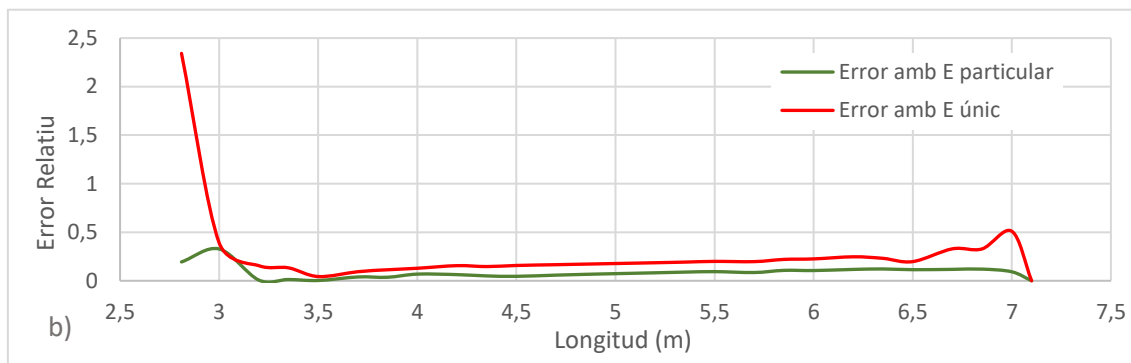
Així doncs, gràcies a la poca diferència entre els valors d'E que s'obtenen combinant el moments de l'esquema de la biga amb la curvatura que s'extreu de les lectures, és possible introduir en el model teòric un valor únic per a tots els casos de càrrega que representi amb precisió el valor real. És a dir, amb aquest valor únic, el model teòric hauria de proporcionar uns desplaçaments verticals que no distin en escreix de les fletxes que s'obtenen gràcies al sistema OBR per a tots els valors de càrrega introduïts.

Després de diverses proves, s'ha aconseguit un valor del mòdul d'elasticitat que compleix amb la condició anterior.

$$E = 44,3\text{GPa}$$

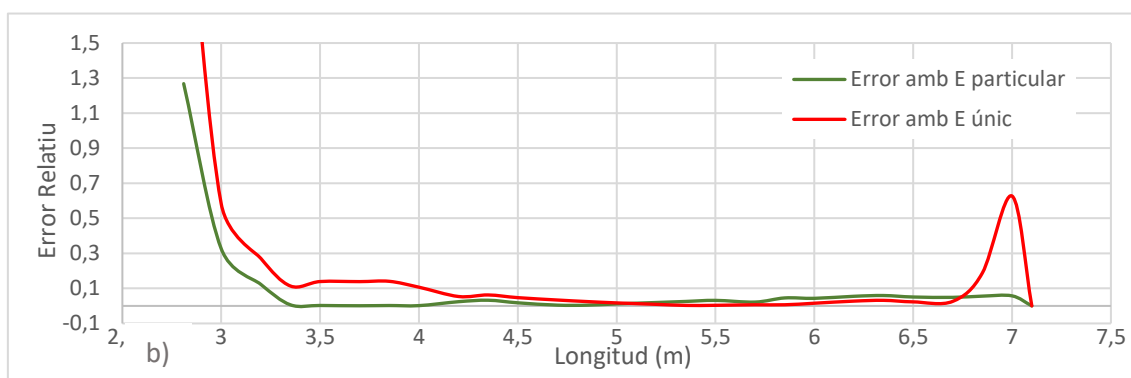
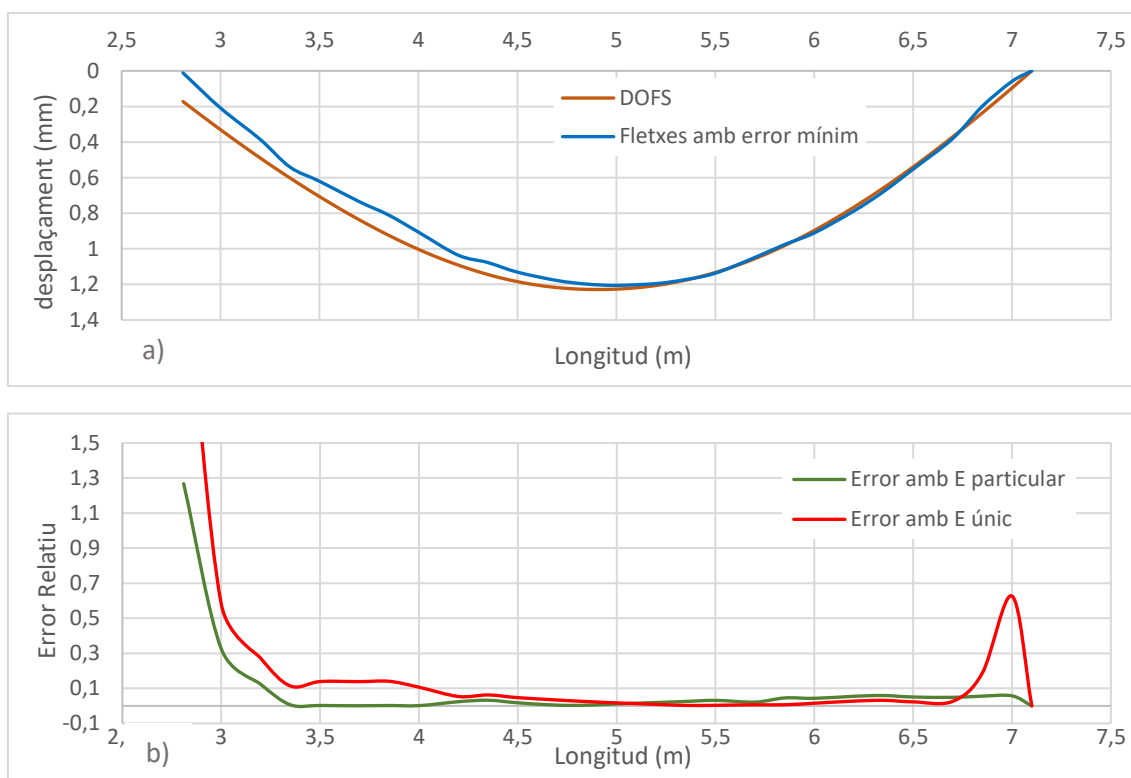
A continuació es compararan els resultats proporcionats pel model teòric amb aquest valor únic d'E amb els desplaçaments verticals dels sensors, i es mostrarà l'error relatiu que hi té lloc en cada cas, prenent el valor que ofereix el model teòric com a l'exacte. En primer lloc, en la Figura 71, es mostren els resultats del cas de 61kN.





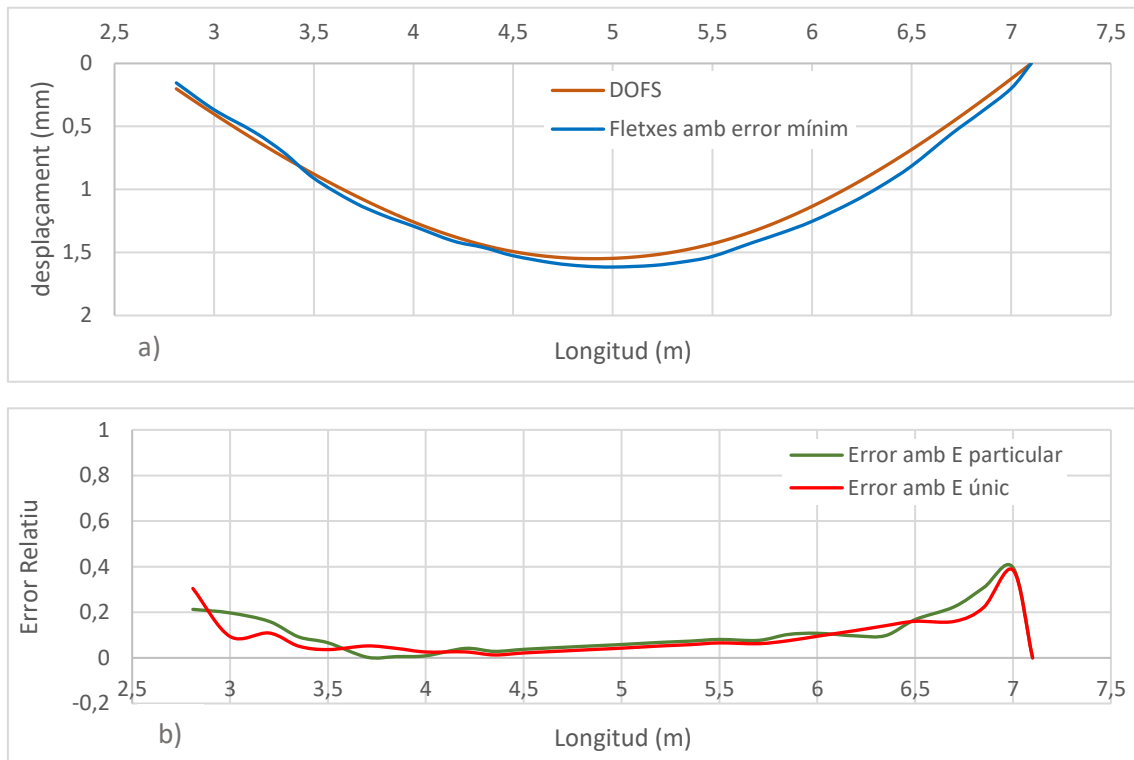
**Figura 71.** Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures (a) i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic (b) per al cas de 61kN

Aquests cas de càrrega és en el que majors errors s'obté. El valor del mòdul d'elasticitat únic és més petit que el mòdul particular d'aquest cas i això causa uns desplaçaments verticals d'uns 0,2mm majors. Amb tot, l'error que es produeix no és major al 25% en la part central del tram. Com que en els extrems els valors de les fletxes són molt propers a 0, qualsevol variació respecte aquest valor dispara l'error molt notablement. En la Figura 72 es presenten els resultats del cas de 100kN de càrrega.



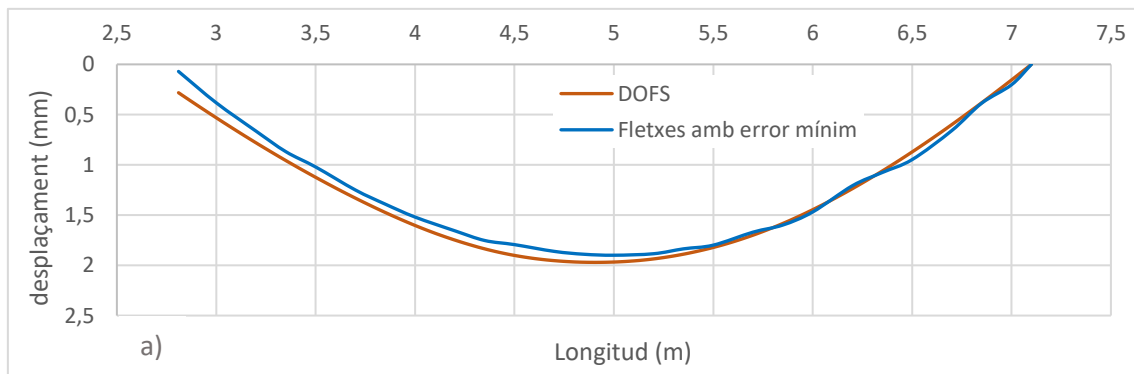
**Figura 72.** Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures (a) i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic (b) per al cas de 100kN

En el cas de 100kN la diferència, i l'error, es redueixen considerablement. En el tram central de la biga s'observa un error gairebé nul, de com a màxim un 10%. Uns resultats semblants als que s'obtenen en el cas de 125kN, com mostra la Figura 73.

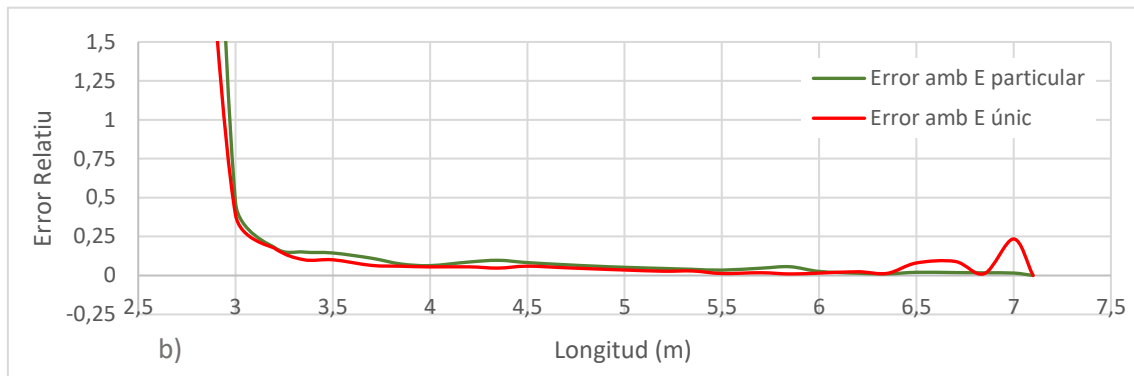


**Figura 73.** Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures (a) i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic (b) per al cas de 125kN

Amb una càrrega total de 125kN i un mòdul d'elasticitat de 44,3GPa, l'error relatiu obtingut és també força baix, assolint només en els extrems valors del 20%.

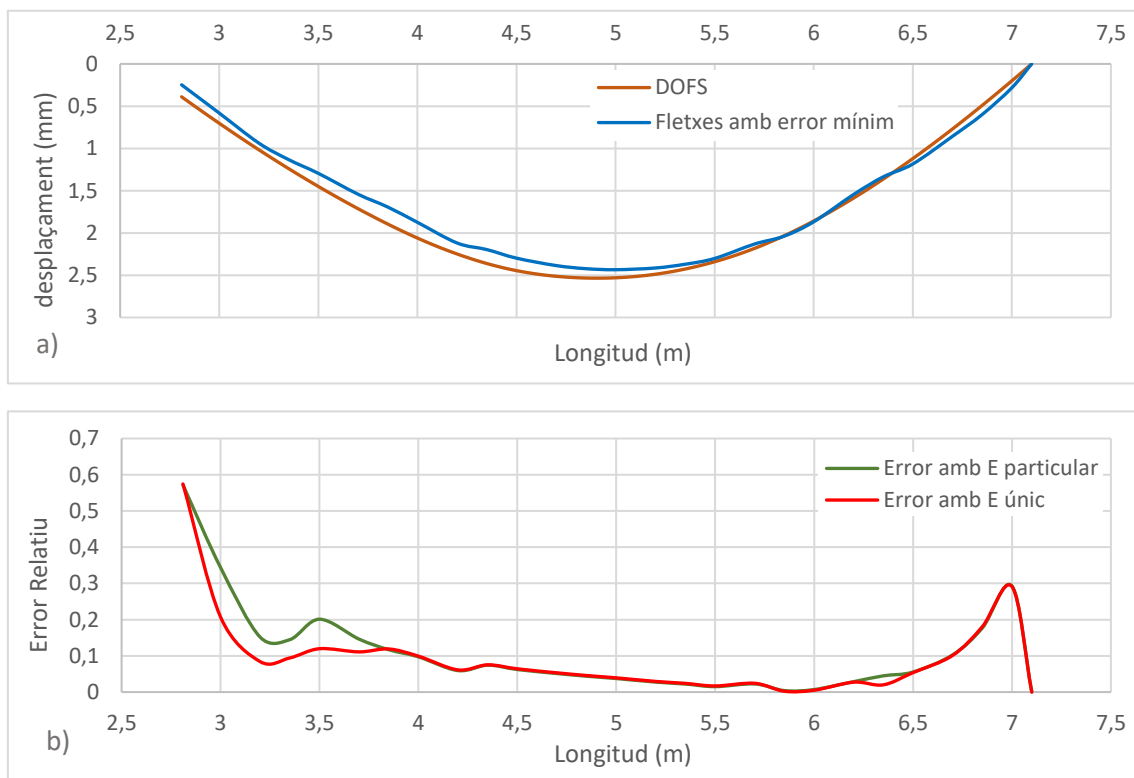






**Figura 74.** Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures (a) i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic (b) per al cas de 150kN

En la Figura 74 es mostren els resultats del cas de càrrega de 150kN. L'error que es produeix en aquest cas amb prou feines arriba al 10% en la part central de la biga i només en els extrems l'error creix considerablement. Finalment, l'últim cas de 200kN es mostra en la Figura 75; els resultats són positius altre cop, assolint un màxim del 10% d'error en la part central.



**Figura 75.** Desplaçaments verticals amb un valor únic d'E comparats amb les lectures (a) i errors relatius amb el mòdul particular d'aquest cas i mòdul únic (b) per al cas de 200kN

Per tant, el rang dels errors relatius en el qual es mouen els resultats, oscil·lant entre el 15-20%, ofereix unes conclusions positives del procediment utilitzat en l'obtenció d'un únic mòdul d'elasticitat, de 44,3GPa, que definirà l'estructura.

### Comparació amb un estudi amb sensors puntuals

Finalment, aquest estudi es complementa amb els resultats obtinguts pel que fa als desplaçaments verticals mesurats amb transductor de desplaçament. Els objectius globals en la prova experimental que es va realitzar eren diferents als que es plantegen en aquest treball de Màster, no obstant, la instrumentació que varen utilitzar permet la comparació dels resultats obtinguts. En la monitorització estàndard de la biga es van utilitzar sensors puntuals repartits per tota la longitud. Alguns d'aquests sensors puntuals són transductors de desplaçament, que es distribueixen de la forma que es mostra en la Figura 76.

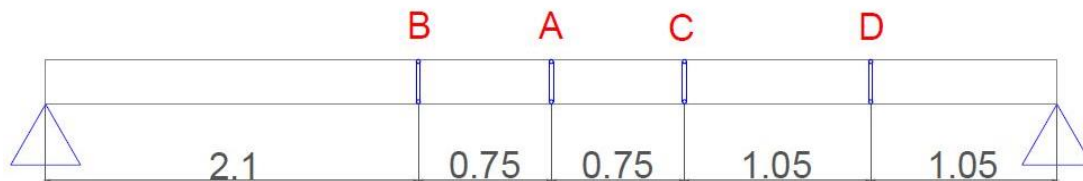


Figura 76. Esquema de la distribució dels transductors de desplaçament en la biga

S'observa que la localització d'aquest transductors és estratègica. El transductor A, anomenat *càrrega*, està situat en el centre del tram de la biga, que coincideix amb el punt on exerceix la força el pistó. Els transductors B i C, anomenats *Neoprè Esquerre* i *Neoprè Dret*, representen els punts on s'apliquen les càrregues. I, per últim, el transductor D, anomenat *Dret Intermig*, està situat en el punt mig del tram comprès entre la càrrega dreta, o Neoprè Dret, i el recolzament dret. En la Figura 77 es mostren els desplaçaments verticals que obtenen els transductors en funció del temps.

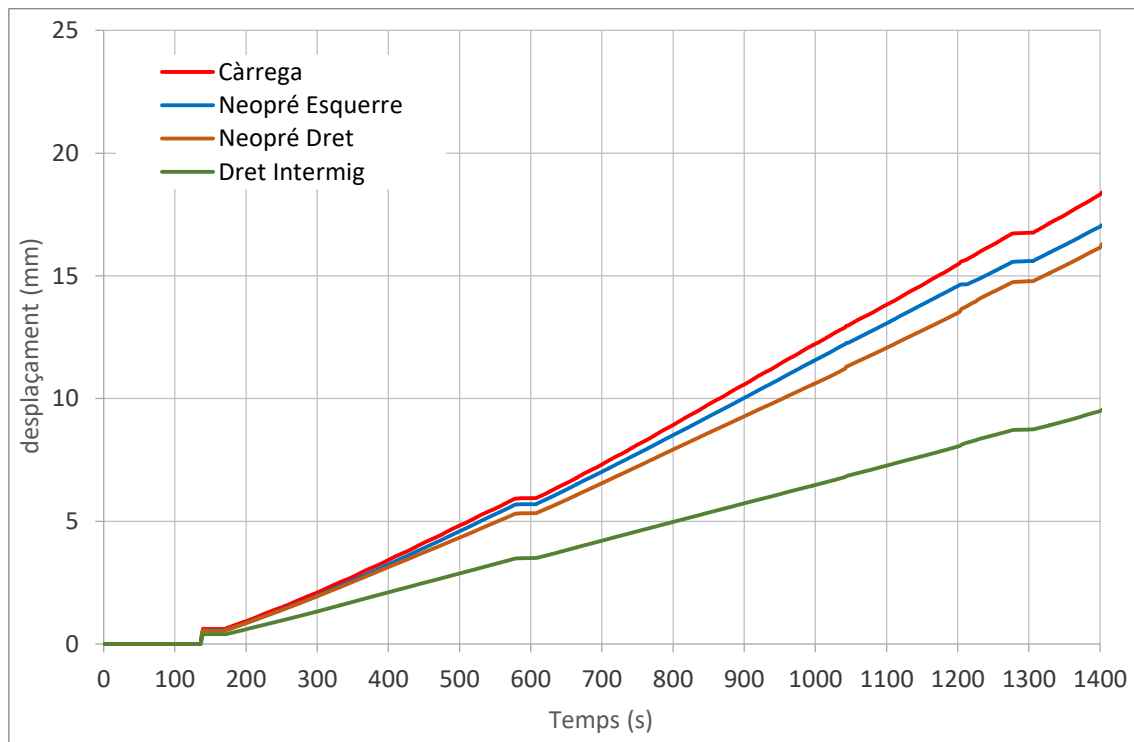


Figura 77. Lectures dels transductors de desplaçament en funció del temps

La figura que es mostra comprèn el període de temps d'interès per aquest estudi, de l'inici de la prova fins als 1400s on es supera per poc l'última càrrega considerada. Per a la comparació d'aquests resultats amb les lectures del sistema OBR es mostra la Taula 5. Cal destacar que en la figura anterior es mostren els desplaçaments reals que tenen lloc; en la taula en canvi, s'han reduït els valors corresponents per tenir en compte la translació que s'ha aplicat com a condició de contorn per al càlcul de les fletxes, de manera que la comparació sigui en igualtat de condicions. Es a dir, es considera que el punt de fletxa zero és el punt on s'acaba el transductor de fibra òptica.

**Taula 5.** Comparació dels resultats dels transductors amb els dels DOFS

	<b>Càrrega</b>	<b>DOFS</b>	<b>Neoprè Esquerre</b>	<b>DOFS</b>
<b>61kN</b>	1,2993	0,6952	1,1724	0,6032
<b>100kN</b>	2,2434	1,2285	2,0688	1,0709
<b>125kN</b>	3,1576	1,5493	2,9571	1,3458
<b>150kN</b>	4,5325	1,9706	4,303	1,7155
<b>200kN</b>	6,9264	2,5345	6,5556	2,2051

	<b>Neoprè Dret</b>	<b>DOFS</b>	<b>Dret Intermig</b>	<b>DOFS</b>
<b>61kN</b>	1,1596	0,6097	0,6588	0,2101
<b>100kN</b>	1,992	1,0772	1,0941	0,3709
<b>125kN</b>	2,7922	1,3608	1,5967	0,4693
<b>150kN</b>	3,9707	1,7339	2,279	0,5993
<b>200kN</b>	6,0241	2,2275	3,3251	0,7704

Desafortunadament, a primer cop d'ull s'observa que els resultats no són ni de bon tros satisfactoris. La diferència és molt notable, superant en alguns dels casos un error del 200-300%, una variació que determina que una de les dues instrumentacions ha patit algun problema. Com que els resultats que s'han determinat de les lectures dels DOFS s'han comprovat satisfactòriament amb un model teòric, és probable que l'error es produeixi en la mesura dels transductors. Una altra opció a considerar seria la possible deformació vertical que puguin haver patit els aparells de recolzament, ja que aquest tipus de deformació afectaria les lectures dels transductors, que prenen lectures del comportament global de l'estructura, mentre que no afectaria els resultats dels DOFS, que mesuren les deformacions relatives, sense tenir en compte els desplaçaments que pugui patir la estructura sencera. En tot cas, aquest incident hauria de ser estudiat i analitzat més àmpliament en investigacions futures.

## CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

Així doncs, una vegada s'ha realitzat una àmplia revisió bibliogràfica dels sistemes d'instrumentació, fent un especial focus en els sensors distribuïts de fibra òptica, i s'han analitzat els resultats obtinguts en la prova executada en el Laboratori de Tecnologia d'Estructures, es pot arribar a una sèrie de conclusions. Amb aquestes conclusions es pretén donar resposta als objectius plantejats inicialment.

En primer lloc, s'ha detallat la extrema importància de la monitorització per a millorar la vida estructural i reduir els recursos que s'haurien d'invertir si no es realitza la instrumentació esmentada; en aquest aspecte tenen especial rellevància els sensors de fibra òptica. Aquesta tipologia de sensors tenen diverses característiques i poden ésser classificats segons diferents criteris, no obstant, són els sensors distribuïts de fibra òptica els que ofereixen una bona precisió i efectivitat per als casos on no només es prengui especial atenció en la identificació del comportament global de l'estructura sinó també en la detecció de possibles esquerdes o fissures. S'han mostrat diversos estudis que corroboren la conclusió esmentada. Tanmateix, com passa amb qualsevol tipus de monitorització amb fibra òptica, s'afronten diversos reptes. El repte que major preocupació crea és el de la fragilitat de la mateixa fibra, ja que pot ésser malmesa durant el procés d'instal·lació o de recollida de dades. Per a la protecció de la fibra, es mostren diversos estudis amb els avantatges i inconvenients de la utilització de revestiments gruixuts, que ofereixen més protecció però perden precisió, o, amb un efecte invers, la utilització de revestiments primers.

Pel que fa a l'objectiu principal, la determinació d'una metodologia per a obtenir els desplaçaments verticals a partir de les lectures de deformació que proporcionen els sensors, s'han plantejat diverses hipòtesis en el transcurs del document i s'han anat discernint les opcions més òptimes. Per començar, s'han detallat els processos matemàtics que s'han de dur a terme per obtenir, a partir de les deformacions, les fletxes que es produeixen en la estructura. En el càlcul particular dels girs i els mateixos desplaçaments verticals, es proposen dos mètodes viables, la interpolació quadràtica i l'aproximació amb la regla del trapezi. A priori, la interpolació quadràtica de la curvatura ofereix una major precisió en casos generals, no obstant, gràcies a l'alta resolució del sistema OBR que s'ha usat, els resultats de l'aproximació amb la regla del trapezi ofereixen una precisió igual de bona, fent que la elecció entre ambdós mètodes sigui irrellevant.

Posteriorment, una vegada s'han obtingut els desplaçaments verticals, es comparen amb els resultats obtinguts mitjançant un model teòric dissenyat amb el programa de càlcul d'estructures SAP2000. Amb la comparació, s'obtenen tres grups de resultats diferents. En l'inici de la prova, quan la càrrega aplicada és molt petita, apareixen imprecisions en les lectures que poden ser degudes a l'acomodació del sistema de càrrega i els recolzaments a l'aplicació de les primeres càrregues. Després, quan els esforços circulen per la branca elàstica, abans de que les seccions fissurin, s'obtenen precisions molt altes amb errors màxims de 0,25mm, un 10% d'error relatiu. I, per últim, quan les càrregues deriven en esforços propers al moment de fissuració de

l'estructura, la precisió del sistema OBR es redueix obtenint errors de 0,5-0,75mm, un 18% d'error relatiu.

A més a més, de manera secundària s'ha volgut determinar el mòdul d'elasticitat de la biga, que prèviament era desconegut o solament conegut de manera aproximada mercès a les provetes de formigó trencades prèviament a les que es va a portar a terme un assaig d'obtenció del mòdul de deformació. Primerament s'ha obtingut un valor del mòdul per a cada cas de càrrega estudiat combinant els moments calculats de forma teòrica, amb les curvatures del sistema OBR. No obstant, cada cas oferiria un valor diferent per a un paràmetre que hauria de ser constant, amb l'afegit de que cada cas donava una distribució variable al llarg de la longitud de l'estructura. Així doncs, s'han volgut comprovar les raons d'aquesta variabilitat. S'ha considerat la hipòtesi de que les càrregues s'havien desplaçat cap a un costat, tanmateix els resultats obtinguts descarten aquesta consideració. Per tant, s'ha determinat el valor del mòdul d'elasticitat del segon grup de resultats, que oferiria una alta precisió. Per aconseguir aquest objectiu s'ha buscat el valor que oferiria un error més petit en tots els casos, de càrrega obtenint finalment una valor d' $E = 44,3\text{GPa}$ , en la hipòtesi de que la inèrcia real a cada secció és la calculada segons els plànols.

Conseqüentment, en aquest Treball Final de Màster ha estat possible la confirmació de la precisió i efectivitat del sistema de sensors distribuïts de fibra òptica, així com l'objectiu principal, dissenyar una metodologia que permeti l'obtenció de desplaçaments verticals a partir de les deformacions de la fibra de manera correcta. D'aquesta manera s'aconsegueix resoldre el problema de medició de fletxes directament amb transductors de desplaçament quan les condicions externes (molta alçada de la estructura, presència de tràfic en el cas d'un pont, creuament d'un riu, etc.) ho fan inviable o molt complicat, amb una metodologia molt més senzilla i que no requereix d'una base de referència fixa.

No obstant, encara hi ha moltes aplicacions dels sensors distribuïts a estudiar i desenvolupar per a establir aquesta tecnologia com a una solució viable en la monitorització de l'enginyeria civil. L'augment de la resolució d'alguns tipus de sensors i la identificació dels revestiments adequats i mètodes d'instal·lació són objectius en els quals s'ha de continuar treballant en el futur. Pel que fa al cas concret estudiat en aquest document, es proposa l'estudi en la millora de la precisió en casos no tan favorables, casos on el rendiment exigít sigui força alt; per exemple, casos on es treballi amb esforços propers o majors al moment de fissuració de l'estructura.

## BIBLIOGRAFIA

Ansari, F. *Theory and Applications of Integrated Fiber Optic Sensors in Structures. Intelligent Civil Engineering Materials and Structures*. Ed. Farhad Ansari. New York: ASCE, **1997**. 2-28.

Avantek, "*Design with GPD Amplifiers, 3rd. ed.*", Santa Clara, California, **1980**

Bao, X.; Chen, L. *Recent progress in distributed fiber optic sensors*. *Sensors* **2012**, 12, 8601–8639.

Barrias, A.; Casas, J.R.; Villalba, S.; Rodriguez, G., *Health Monitoring of real structures by distributed optical fiber*. In Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE'16, Delft, The Netherlands, 16–19 October **2016**.

Bastianini, F.; Corradi, M.; Borri, A.; di Tommaso, A., *Retrofit and monitoring of an historical building using "Smart" CFRP with embedded fibre optic Brillouin sensors*. *Constr. Build. Mater.* **2005**, 19, 525–535.

Buchoud, E.; Henault, J. M.; D'Urso, G.; Girard, A.; Blairon, S.; Mars, J.; Vrabie, V., *Development of an automatic algorithm to analyze the cracks evolution in a reinforced concrete structure from strain measurements performed by an Optical Backscatter Reflectometer*. In Proceedings of the 4th Workshop on Civil Structural Health Monitoring, Berlin, Germany, 23 November **2012**.

Canet, J. M., *Resistencia de Materiales y Estructuras*, Ediciones CIMNE, **2012**.

Casas, J.; Villalba, S.; Villalba, V., *Management and safety of existing concrete structures via optical fiber distributed sensing*. In Maintenance and Safety of Aging Infrastructure: Structures and Infrastructures Book Series; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2014**; Volume 10, pp. 217–245.

Deif, A.; Martín-Pérez, B.; Cousin, B.; Zhang, C.; Bao, X.; Li, W., *Detection of cracks in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors*. *Smart Mater. Struct.* **2010**, 19, 055014.

Dong, Y.; Chen, L.; Bao, X., *Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis combining frequency-division multiplexing and in-line EDFAs*. *J. Lightwave Technol.* **2012**, 30, 1161–1167.

Dong, Y.; Zhang, H.; Chen, L.; Bao, X., *2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair*. *Appl. Opt.* **2012**, 51, 1229–1235.

Doornink, J.D., Phares, B.M., Abu-Hawash, A., Wipf, T.J., Hemphill, D.J., and Greimann, L.F., "*Remote Health Monitoring of a High Performance Steel Bridge using Fiber Optic Technology*", Bridge Engineering Center, Iowa State University, **2004**

Eickhoff, W., and Ulrich, R., "*Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber*", Appl. Phys. Lett 39 693-695, **1981**

Ferdinand, P. *The evolution of optical fiber sensors technologies during the 35 last years and their Applications in structure health monitoring*. In Proceedings of the 7th European Workshop Structure Health Monitoring (EWSHM), Nantes, France, 8–11 July **2014**.

Froggatt, M., "*Distributed measurement of the complex modulation of a photoinduced Bragg grating in an Optical fiber*", Appl. Opt. 35 5162-5164 **1996**.

Froggatt, M. and Moore, J., "*High resolution strain measurement in Optical fiber with Rayleigh scatter*", Appl. Opt. 37, 1735-1740, **1998**.

Froggatt, M.; Moore, J., *High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter*. Appl. Opt. **1998**, 37, 1735–1740.

Froggatt, M., Erdogan, T., Moore, J., and Shenk, S., "*Optical frequency domain characterization (OFDC) of dispersion in optical fiber Bragg gratings*", in *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC, **1999**), paper FF2

Fuhr, Peter. "*Thermal Considerations for Fiber-Optic Sensor Components Part 1: Introduction to Fiber Optic Sensing*" 18 July **2004**.

Gholamzadeh, B.; Nabovati, H. *Fiber optic sensors*. Int. J. Electr. Comput. Energy Electron. Commun. Eng. **2008**, 2, 1107–1117.

Gifford, D.K.; Froggatt, M.E.; Wolfe, M.S.; Kreger, S.T.; Soller, B.J., *Millimeter resolution reflectometry over two kilometers*. In Proceedings of the IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, Victoria, BC, USA, 2–5 October, **2007**

Glisic, B.; Inaudi, D., *Sensing tape for easy integration of optical fiber sensors in composite structures*. In Proceedings of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan, 13–17 October **2003**; Volume 1, pp. 291–298.

Glisic, B.; Posenato, D.; Inaudi, D., *Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering*. In Proceedings of the 14th International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, CA, USA, 18–22 March **2007**; Volume 6531.

Glisic, B.; Chen, J.; Hubbell, D., *Streicker Bridge: A comparison between Bragg-grating long-gauge strain and temperature sensors and Brillouin scattering-based distributed strain and temperature sensors*. In Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, CA, USA, 6–10 March **2011**.

Glisic, B.; Inaudi, D., *Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors*. Struct. Health Monit. **2012**, 11, 161–171.



Glisic, B.; Yao, Y., *Fiber optic method for health assessment of pipelines subjected to earthquake-induced ground movement*. Struct. Health Monit. **2012**, 11, 696–711.

Glombitza, U. And Brinkmeyer, E., “*Coherent frequency domain reflectometry for characterization of single-mode integrated optical waveguides*”, J. Lightwave Technol. 11 1377-1384, **1993**.

Gue, C.Y.; Wilcock, M.; Alhaddad, M.M.; Elshafie, M.Z.E.B.; Soga, K.; Mair, R.J., *The monitoring of an existing cast iron tunnel with distributed fibre optic sensing (DFOS)*. J. Civ. Struct. Health Monit. **2015**, 5, 573–586.

Guo, H.; Xiao, G.; Mrad, N.; Yao, J. *Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms*. Sensors **2011**, 11, 3687–3705.

Hao, Z. and Wu, Z., “*Performance evaluation of BOTDR-based distributed fiber optic sensors for crack monitoring*”, Struct. Health Monitor, 7(2), **2008**, 143-156.

Henault, J.-M.; Quiertant, M.; Delepine-Lesoille, S.; Salin, J.; Moreau, G.; Taillade, F.; Benzarti, K., *Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system*. Constr. Build. Mater. **2012**, 37, 916–923.

Horiguchi, T., Kurashima, T. and Tateda, M., “*Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers*”, IEEE Photon. Technol. Lett., 1(5), **1989**, 107-108

Hoult, N.A.; Ekim, O.; Regier, R., *Damage/deterioration detection for steel structures using distributed fiber optic strain sensors*. J. Eng. Mech. **2014**, 140, 04014097.

Inaudi, D.; Glisic, B., *Distributed fiber optic strain and temperature sensing for structural health monitoring*. In Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, 16–19 July **2006**; pp. 963–964.

Kieckbusch, S., Knothe, Ch., and Brinkmeyer, E. “*Fast and accurate characterization of fiber Bragg gratings with high spatial resolution and spectral resolution*”, in *Optical Fiber Communication*, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC, **2003**), paper WL2

Klar, A.; Linker, R., *Feasibility study of automated detection of tunnel excavation by Brillouin optical time domain reflectometry*. Tunn. Undergr. Space Technol. **2010**, 25, 575–586.

Klar, A.; Dromy, I.; Linker, R., *Monitoring tunneling induced ground displacements using distributed fiber-optic sensing*. Tunn. Undergr. Space Technol. **2014**, 40, 141–150.

Livingston, R.A. "FHWA Research Program in Fiber Optics for Infrastructure." *Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges* Ed. Farhad Ansari. Lancaster PA: Technomic publishing Company Inc, **1998**. 3-13.



Lopez-Higuera, J.M., *'Introduction to fibre optic sensing technology'*, in Handbook of optical fibre sensing technology, J.M. Lopez-Higuera Ed, Wiley, **2002**.

López-Higuera, J.M.; Cobo, L.R.; Incera, A.Q.; Cobo, A., *Fiber optic sensors in structural health monitoring*. J. Lightwave Technol. **2011**, 29, 587–608.

Merzbacher, C., Kersey, A.D., and Friebele, E.J. "Fiber Optic Sensors in Concrete Structures: a Review" *Smart Materials and Structures* 5:2, **1996**, 196-208.

Oberson, P., B. Huttner, O. Guinnard, G. Ribordy, and N. Gisin, "Optical frequency domain reflectometry with a narrow linewidth fiber laser", *IEEE Photon. Technol. Lett* 12 867-869, **2000**.

Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M. and Shimada, A., "Industrial applications of BOTDR optical fiber strain sensor", *Opt. Fib. Tech.*, 7(1), **2001**, 45-64.

Park, J.; Bolognini, G.; Lee, D.; Kim, P.; Cho, P.; di Pasquale, F.; Park, N., *Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization*. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2006**, 18, 1879–1881.

Payne, D.N., Hartog, A.H., "Determination of the Wavelength of Zero Material Dispersion in Optical Fibers by Pulse Delay Measurements", *Electron. Lett*, 627, **1977**.

Presupuestos Generales del Estado de **2015**, Gobierno de España.

Quiertant, M.; Baby, F.; Khadour, A.; Marchand, P.; Rivillon, P.; Billo, J.; Lapeyrere, R.; Toutlemonde, F.; Simon, A.; Cordier, J., *Deformation monitoring of reinforcement bars with a distributed fiber optic sensor for the SHM of reinforced concrete structures*. *NDE* **2012**, 2012, 1–10.

Rajeev, P.; Kodikara, J.; Chiu, W.K.; Kuen, T., *Distributed optical fibre sensors and their applications in pipeline monitoring*. *Key Eng. Mater.* **2013**, 558, 424–434.

Ravet, F.; Briffod, F.; Glis̃c, B.; Nikles, M.; Inaudi, D., *Submillimeter crack detection with Brillouin-based fiber-optic sensors*. *IEEE Sens. J.* **2009**, 9, 1391–1396.

Raymond, M., *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. San Diego: Academic Press, **2001**.

Rodriguez, G.; Casas, J.R.; Villalba, S., *SHM by DOFS in civil engineering: A review*. *Struct. Monit. Maint.* **2015**, 2, 357–382.

Rodríguez, G.; Casas, J.R.; Villalba, S.; Barrias, A., *Monitoring of shear cracking in partially prestressed concrete beams by distributed optical fiber sensors*. In Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2016, São Paulo, Brazil, 26–30 June **2016**.

Satori, K., Ikeda, Y., Kurosawa, Y., Hongo, A., Takeda, N.: *Development of small diameter optical fiber sensors for damage detection in composite laminates, Sensory phenomena*

*and measurement instrumentation for smart structures and materials*, SPIE **2002**, 4328, 285-95.

Shi, B.; Xu, H.; Chen, B.; Zhang, D.; Ding, Y.; Cui, H.; Gao, J., *A feasibility study on the application of fiber-optic distributed sensors for strain measurement in the Taiwan Strait Tunnel project*. Mar. Georesour. Geotechnol. **2003**, 21, 333–343.

Shi, B.; Sui, H.; Liu, J.; Zhang, D., *The BOTDR-based distributed monitoring system for slope engineering*. In Proceedings of the 10th IAEG International Congress, Nottingham, UK, 6–10 September **2006**; pp. 1–5.

Song, K. Y. et al IEEE J. Lightwave Tech. 23 **2005**, 4140.

Sun, Y., Shi, B., Chen, S., Zhu, H., Zhang, D. and Lu, Y., *“Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR”*, Smart Struct. Syst., Int. J., 13(1), **2014**, 41-53.

Szewczyk, R., Joseph Polastre, J., Mainwaring, A., and Culler, D. *“Lessons from a Sensor Network Expedition.”* The I European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '04), Berlin, Germany, January 19-21, **2004**

Tanner, M.G.; Dyer, S.D.; Baek, B.; Hadfield, R.H.; Woo Nam, S., *High-resolution single-mode fiber-optic distributed Raman sensor for absolute temperature measurement using superconducting nanowire single-photon detectors*. Appl. Phys. Lett. **2011**, 99, 201110.

Thévenaz, L., Niklès, M., Fellay, A., Facchini, M. and Robert, P.A. (1998), *“Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers”*, Proceedings of SPIE - Smart Structures and Materials **1998**, San Diego, CA, USA, March, Volume 3330, pp. 301-314.

Thévenaz, L.; Facchini, M.; Fellay, A.; Robert, P.; Inaudi, D.; Dardel, B., *Monitoring of large structure using distributed Brillouin fibre sensing*. In Proceedings of the 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyongju, Korea, 12–16 April **1999**; pp. 5–8.

Torres Górriz, Benjamin, *Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperatura en estructuras*, Ed. Universitat Politècnica de València. València, **2014**.

VanWiggeren, G. D., Motamedi, A. R., Szafraniec, B., Tucker, R. S., and Baney, D. M., *“Single-scan polarization-resolved heterodyne Optical network analyzer”*, in Optical Fiber Communication, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC, **2002**), paper WK2.

Villalba, V.; Casas, J.R.; Villalba, S., *Application of OBR fiber optic technology in structural health monitoring of Can Fatjó Viaduct (Cerdanyola de Vallés-Spain)*. In Proceedings of

the VI International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Lake Maggiore, Italy, 8–12 July **2012**.

Villalba, S.; Casas, J.R., *Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures*. Mech. Syst. Signal Process. **2013**, 39, 441–451.

Von der Weid, J. P., R. Passy, G. Mussi, and N. Gisin, “*On the characterization of Optical fiber network components with Optical frequency domain reflectometry*”, J. Lightwave Tech. 15, 1131-1141, **1997**

Yun, S. H., Tearney, G. J., De Boer, J. F., Iftimia, N., and Bouma, B. E., “*High-speed Optical frequency-domain imaging*”, Opt. Express 11, 2953-2963, **2003**.

Zeng, X.; Bao, X.; Chhoa, C.Y.; Bremner, T.W.; Brown, A.W.; DeMerchant, M.D.; Ferrier, G.; Kalamkarov, A.L.; Georgiades, A.V., *Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars*. Appl. Opt. **2002**, 41, 5105–5114.

Zhang, W.; Gao, J.; Shi, B.; Cui, H.; Zhu, H., *Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing*. Comput. Civ. Infrastruct. Eng. **2006**, 21, 411–424.

Zhu, H.-H.; Shi, B.; Zhang, J.; Yan, J.-F.; Zhang, C.-C. *Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading*. J. Mt. Sci. **2014**, 11, 979–989.