



**EPS**

Escola Politècnica  
Superior

## **Projecte/Treball Fi de Carrera**

**Estudi:** Arquitectura Tècnica. Pla 1998

**Títol:** PROVES DE CÀRREGA AL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA

**Document:** PROJECTE FINAL DE CARRERA

**Alumne:** ÀLEX SALCEDO DESPLANS

**Director/Tutor:** Miquel Llorens Sulivera i Xavier Vinyoles Compta  
**Departament:** Arquitectura i Enginyeria de la Construcció  
**Àrea:** C.A.

**Convocatòria** (mes/any): 04/2007

<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>3</b>
1.1 SITUACIÓ DEL EDIFICI .....	3
1.2 OBJECTE DEL PROJECTE .....	6
1.3 METODOLOGIA .....	7
1.4 PEDRA DE GIRONA .....	8
1.5 ESTAT DE LES COLUMNES .....	10
1.6 HIPÒTESI DE BAIXADA DE CÀRREGUES .....	13
1.6.1 HIPÒTESI 1: ÀREES TRIBUTÀRIES .....	13
1.6.2 HIPÒTESI 2: ARC DE DESCÀRREGA .....	14
1.7 ANTECEDENTS .....	15
1.7.1 ANÀLISI DE LES COLUMNES DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA .....	15
1.7.2 PROPOSTA D'UN SISTEMA D'INSTRUMENTACIÓ COMPLERT PER A LA PROVA DE CÀRREGA DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA .....	16
1.7.3 SISTEMA PER A LA DESCÀRREGA D'UN PILAR DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA .....	18
<b>2. INSTRUMENTACIÓ</b> .....	<b>20</b>
2.1 SISTEMA D'ADQUISICIÓ DE DADES .....	20
2.1.1 ESQUEMA BÀSIC D'UN SISTEMA D'ADQUISICIÓ .....	20
2.1.2 CONDICIONADOR DE SENYAL .....	21
2.1.3 SISTEMA GENERAL D'ADQUISICIÓ DE DADES .....	22
2.2 SOFTWARE DE PROCESSAMENT DE DADES .....	23
2.3 GALGUES EXTENSOMÈTRIQUES .....	24
2.3.1 ELEMENTS DE LES GALGUES .....	25
2.3.2 COL·LOCACIÓ DE LES GALGUES .....	27
2.3.3 CABLATGE I SOLDADURA .....	30
2.4 CÈL·LULES DE CÀRREGA .....	31
2.5 TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT .....	32
2.5.1 CARACTERÍSTIQUES TÈCNIQUES .....	34
2.5.2 ESQUEMA DEL TRANSDUCTOR .....	35
2.5.3 ESQUEMA DE MUNTATGE DELS TRANSDUCTORS .....	36
2.6 CONVERGENCÍMETRE .....	37
2.6.1 ESQUEMA DE MUNTATGE DEL CONVERGENCÍMETRE .....	37
2.6.2 FUNCIONAMENT DEL CONVERGENCÍMETRE .....	38
2.7 ACCELERÒMETRES .....	40
2.7.1 CARACTERÍSTIQUES GENERALS DELS ACCELERÒMETRES .....	40
<b>3. COMPONENTS DEL SISTEMA HIDRÀULIC</b> .....	<b>42</b>
3.1 ESQUEMA DE MUNTATGE .....	42
3.1.1 MUNTATGE EN SECCIÓ .....	42
3.1.2 MUNTATGE FRONTAL .....	43
3.2 SUPORTS PER ALS TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT .....	44
3.2.1 TIPUS DE PERFIL .....	44
3.2.2 ESQUEMA DE MUNTATGE DEL CONJUNT .....	45
3.2.3 CÀLCULS DELS SUPORTS .....	46
3.2.4 CÀLCUL DELS PERNS DE SUBJECCIÓ AMB PLATINA .....	51
3.3 PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT .....	52
3.3.1 CONDICIONS DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT .....	52
3.3.2 PARTS DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT .....	52
3.3.3 ESQUEMA DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT .....	54
3.4 PUNTALS SECUNDARIS .....	55
3.4.1 ESQUEMA PUNTAL SECUNDARI .....	55
3.4.2 CÀLCULS DEL DISSENY DEL PUNTAL SECUNDARI .....	57
3.5 XINDRI METÀL·LIC .....	67
<b>4. DESCRIPCIÓ DE LA PROVA</b> .....	<b>68</b>
4.1 PROCÉS DE MUNTATGE .....	68
4.2 POSADA APUNT DEL SISTEMA .....	79
4.3 CONDICIONS DE FINALITZACIÓ .....	80
4.4 RESUM DE L'EXECUCIÓ DE LES PROVES .....	81
4.5 INCIDÈNCIES DURANT L'EXECUCIÓ .....	82

<b>5. PRESENTACIÓ DE RESULTATS</b> .....	<b>83</b>
5.1 GRÀFIQUES DE LES PROVES .....	83
5.1.1 GRÀFIQUES: PROVA 1.....	84
5.1.2 GRÀFIQUES: PROVA 2.....	89
5.1.3 GRÀFIQUES: PROVA 3.....	94
5.1.4 RESUM DE RESULTATS .....	99
5.2 OBSERVACIONS SOBRE ELS RESULTATS .....	100
<b>6. PROPOSTA DE REPARACIÓ I SUBSTITUCIÓ</b> .....	<b>101</b>
6.2 CÀLCULS DE LA SECCIÓ ÚTIL .....	101
6.2.1 CÀLCUL MOMENT I AXIAL: COLUMNA 1 .....	102
6.2.2 CÀLCUL MOMENT I AXIAL: COLUMNA 2.....	104
6.2.3 COMPROVACIÓ DE TENSIONS .....	106
6.2.4 CÀLCUL COLUMNS A SER SUBSTITUÏDES.....	107
6.2 ELECCIÓ DE LES COLUMNS A REPARAR I SUBSTITUIR .....	109
6.2.1 DETERMINACIÓ DEL DIÀMETRE MÍNIM EQUIVALENT .....	109
6.2.2 ESQUEMA DE SITUACIÓ DE LES COLUMNS DE PEDRA DEL CLAUSTRE ....	111
6.2.3 QUADRE RESUM DE L'ESTAT DE LES COLUMNS ANALITZADES .....	112
6.2.4 ANÀLISI DETALLADA DELS DANYS DE LES COLUMNS .....	114
6.3 TRACTAMENT DE LES COLUMNS .....	118
6.3.1 SUBSTITUCIÓ .....	118
6.3.2 REPARACIÓ .....	119
<b>7. CONCLUSIONS GENERALS</b> .....	<b>120</b>
7.1 CONCLUSIONS SOBRE LES HIPÒTESIS DE CÀRREGA .....	120
7.2 CONCLUSIONS SOBRE ELS RESULTATS .....	120
7.3 CONCLUSIONS SOBRE L'EXECUCIÓ DE LA PROVA .....	120
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>121</b>

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1 SITUACIÓ DEL EDIFICI

La Catedral de Santa Maria de Girona es situa a la zona nord-oriental de la ciutat delimitada pel jardí de la Francesca, pel carrer del Bisbe Cartenyà i pel convent del Sagrat Cor de Maria. La primera documentació escrita de la Catedral data de mitjans del segle IX.

Per arribar fins la portadala principal s'ha d'ascendir per una gran escalinata barroca de finals del segle XVII. El conjunt està format per una successió d'estils. El campanar, anomenat Torre Carlemany i d'estil romànic, data del sXI i és utilitzat de contrafort per a la nau gòtica. La construcció de la Catedral, d'estil gòtic, te la nau gòtica més ample del món amb 22.98m d'amplada i 34m d'alçada. La façana és d'estil barroc igual que l'escalinata d'accés. Al nord de la Catedral i encara dins del recinte catedralici hi trobem el claustre, d'estil romànic igual que la Torre Carlemany, el qual està format per planta baixa, planta primera i plana segona.

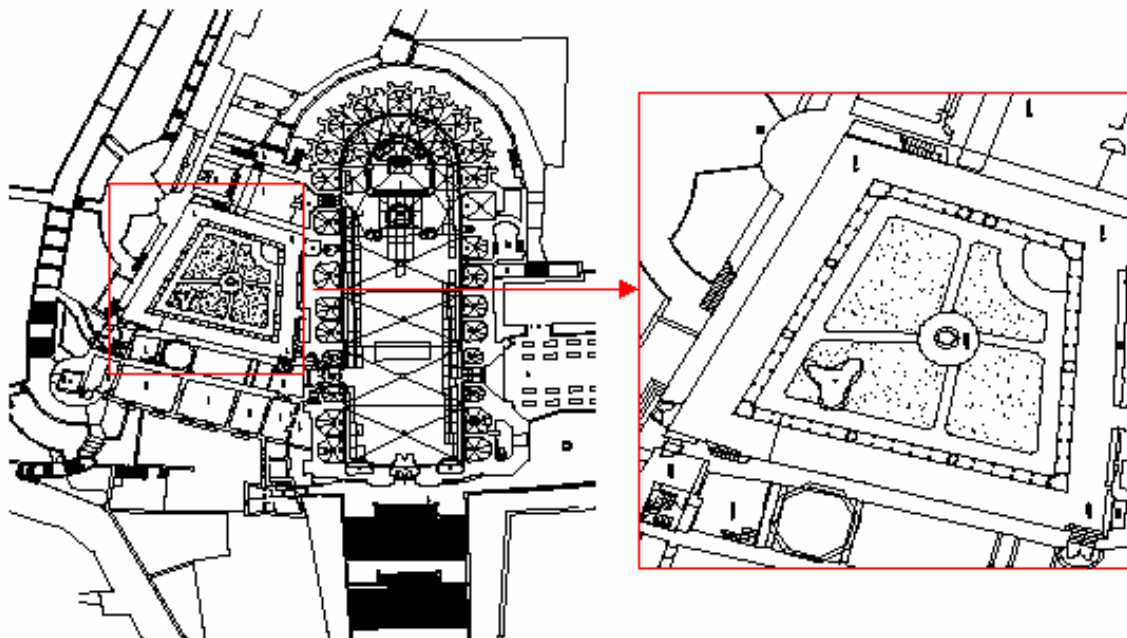


Fig. 1 Planta del Claustre de la Catedral de Girona



Fig. 2 Vista del Claustre de la Catedral de Girona

El claustre data del segle XII, i està format per una planta trapezoïdal, determinada per la muralla adossada que obliga a que la part oriental sigui menor. Els porxos del claustre estan formats per dobles columnes amb capitells historiatos amb motius corintis i gòtics. Aquestes columnes suporten gruixudes arqueries sobre les quals descansen les voltes de canó en les galeries del sector nord i voltes d'un quart de cercle en la resta de galeries. No s'ha emprat la volta de canó sencera ja que l'empenta d'aquesta hauria recaigut sobre les parets exteriors, que no haurien pogut actura de contrafort amb suficient garantia d'estabilitat. Aquesta hipòtesi és confirmada a la galeria nord, ja que no es veu afectada per les parets de la Catedral. També hi trobem uns metxons situats entre les columnes dobles. Les columnes son de secció ciruclar i fust llis.



Fig. 3 Columnes de pedra del Claustre



Fig. 4 Vista detall de les columnes del Claustre

L'estudi en concret es realitzarà a l'ala nord tal i com indica la secció A-A' i tindrà per objecte determinar si les columnes podran suportar un canvi d'ús previst a la planta primera. Planta on actualment s'hi ubica un acopi d'arxius i es vol destinar a un espai per a menjadors, comportant un augment considerable a la sobrecàrrega d'ús.

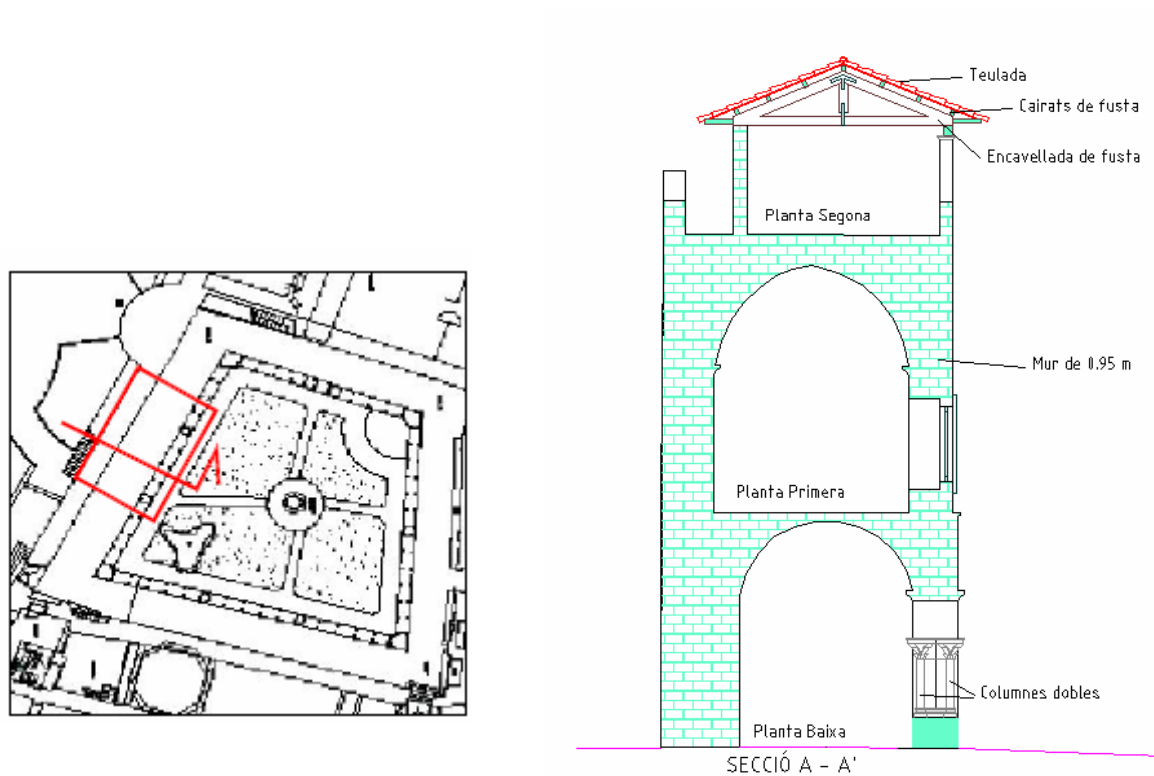


Fig. 5 Secció de la zona del Claustre a estudiar

## 1.2 OBJECTE DEL PROJECTE

Tal i com el nom indica, l'objecte del projecte es tracta de la realització de les proves de càrrega al Claustre de la Catedral de Girona. Per arribar a executar aquestes proves serà necessària l'adquisició d'una sèrie de coneixements i una sèrie d'anàlisis previs.

En primer lloc, fer un compendi de la informació sobre la instrumentació necessària per la prova, per tal de conèixer el seu funcionament i el seu paper a desenvolupar a dins del sistema. D'aquesta manera, es podrà fer una anàlisi posterior de les dades més acurat.

En segon lloc, un altre objectiu principal es conèixer la càrrega que suporten les columnes de pedra del Claustre realitzant unes proves de càrrega. Un cop coneguda aquesta càrrega, es podrà decidir si son aptes o no per al canvi d'ús previst a la planta superior i es podrà aportar una resposta definitiva a una de les dues hipotesis plantejades: si es forma o no arc de descàrrega a les columnes del Claustre.

Un altre objectiu és el seguiment de l'execució de les proves, així com prestar l'ajuda necessària en tot moment per poder finalitzar-les correctament. Un cop executades, es farà un recull de les dades obtingudes i un anàlisi de les gràfiques resultants per tal de poder-ne extreure conclusions.

D'altre banda, es realitzarà una proposta de tractament de les columnes del Claustre que consistirà en escollir les que hauran de ser reparades i les que hauran de ser substituïdes, en base a una sèrie de càlculs numèrics. Per últim s'extrauran les conclusions pertinents.

### **1.3 METODOLOGIA**

Per tal d'aconseguir portar a terme els objectius, s'haurà de definir un sistema complet per a la realització de les proves, on hi han de constar tots els elements com son, instrumentació, estructures auxiliars, mecanismes hidràulics, etc...

La metodologia es basarà en la descàrrega d'un parell de columnes de pedra del claustre mitjançant un sistema de puntals hidràulics instrumentats amb els que es podrà conèixer la càrrega que suporten. Un cop coneguda aquesta càrrega es podran portar a terme els objectius descrits en el punt anterior.



## 1.4 PEDRA DE GIRONA

El material de què està compost el claustre és la pedra. Aquesta és utilitzada tant en les dobles columnes, arcs de mig punt, murs, voltes de quart de cercle i voltes canó. La pedra emprada per a la realització del claustre és roca calcària nummulítica, coneguda a la zona per pedra de Girona.

Aquesta pertany a les roques sedimentàries. A la seva formació passa per diversos processos en els que destaquen la compactació, la deshidratació i la fonamentació. La pedra de Girona té una coloració gris blavosa i envolcallada amb una munió de taques blanquinoses en forma el·líptica, fòssils en la seva majoria nummulits, que li donen una textura molt particular.

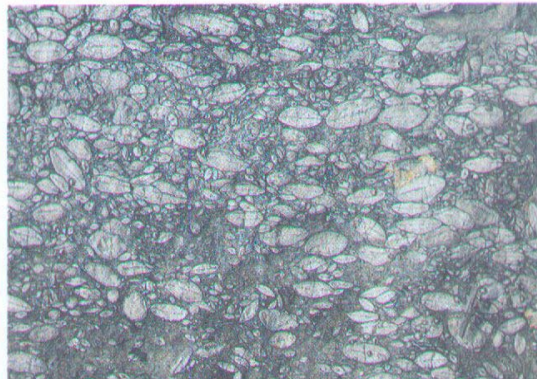


Fig. 6 Detall de la textura de la Pedra de Girona

Segons els estudis realitzats anteriorment pel conveni Bisbat-Udg, les característiques físico-químiques de la pedra de Girona son reflectides en la taula 01 que ve a continuació.

Taula 01

CARACTERÍSTIQUES FÍSICO-MECÀNIQUES DE LA PEDRA DE GIRONA	
COLOR	Color en fractura fresca: blau grisós. Color d'alteració: ocre crema.
ESTRUCTURA / TEXTURA	Compacta a granular (en funció del contingut fossilífer).
FRACTURA	Plana, amb tendència col·loidal.
DENSITAT MITJANA (massa volumètrica):	2,70 g/cm <sup>3</sup>
COEFICIENT D'ABSORCIÓ	0,90% (capacitat d'absorció baixa). 50% del total en 16h. (absorció lenta)
POROSITAT	0,30%.
DURESA MITJANA	3,0 a 3,5 (l'escala de Mohs).
RESISTÈNCIA MECÀNICA A LA COMPRESSIÓ	732 kg/cm <sup>2</sup>
RESISTÈNCIA MECÀNICA A FLEXIÓ	300 kg/cm <sup>2</sup>
MÒDUL DE YOUNG	e9 N/m <sup>2</sup>
RESISTÈNCIA MECÀNICA AL DESGAST PER FREGAMENT	2,41mm
RESISTÈNCIA A L'IMPACTE:	45 cm.
COEFICIENT DE POISSON	0.33
TENSIÓ LÍMIT A COMPRESSIÓ	8e6 N/m <sup>2</sup>
TENSIÓ LÍMIT A TRACCIÓ	8e5 N/m <sup>2</sup>
MÒDUL ELÀSTIC	747.474,33 Kg/cm <sup>2</sup>

## 1.5 ESTAT DE LES COLUMNES

Previ a la realització del nostre estudi, s'ha observat el mal estat d'algunes de les columnes del claustre. La patologia més comuna observada és el desgast i erosió del material causat d'una manera conjunta pel pas del temps i pels diferents agents atmosfèrics, ja sigui l'aigua de la pluja, la humitat, glaçades, canvis de temperatura o contaminació ambiental.



Fig. 7 Vista detall d'una important fisura en una columna

No només les columnes s'han vist afectades pels agents atmosfèrics, sinó que els motius ornamentals situats en els capitells i bases també s'han vist sèriament afectats. La contaminació ambiental sembla que és el major causant dels danys als capitells mentre que els danys estructurals han estat causats per reaccions intrínseques de la pedra i l'acció de la humitat.



Fig.8 Vista detall de la base i el capitell d'una columna del claustre

Apareixen crostes en algunes de les columnes. En les parts exposades a la pluja no solen presentar-se però apareix una lleugera abrasió superficial causada per la dissolució dels carbonats per l'aigua. A les zones protegides de la pluja hi ha tonalitats més fosques que a les afectades per aquesta, alhora les zones hombrívoles resulta més alterada que a les zones exposades pel sol, al igual que les zones protegides del vent resulten més alterades que les exposades.



Fig. 9 Vista detall de l'estat de desgast d'una columna del Claustre

S'ha realitzat un estudi, en concret a la zona en que es realitzarà la prova, l'ala nord. Mitjançant suport fotogràfic s'ha donat constància de totes les esquerdes i fissures que ens afecten per a la realització de la prova, degut als nombrosos esforços a que es sotmetrà.

Alhora també s'han controlat les esquerdes que afecten a la façana nord interior del claustre per poder trobar un possible patró del causant d'aquesta, com podria ser algun assentament diferencial.

La prova determinarà alhora quines d'aquestes columnes hauran de ser substituïdes, per a una correcte baixada de càrregues.

Per a poder determinar aquesta qüestió, es necessitaran diverses dades bàsiques:

- Característiques físico-mecàniques del material en que es realitza l'estudi: com ja s'ha dit anteriorment, el material és la pedra. Les característiques han estat determinades en estudis anteriors dincs el conveni Bisbat de Girona – UDG i s'han pogut veure en apartats anteriors.
- Les càrregues que reben els elements. Aquesta qüestió és l'objecte de l'estudi que s'està realitzant.
- La secció mínima necessària per a la transmissió de càrregues de les columnes. Aquesta secció mínima, dependrà de les 2 qüestions prèvies, de les característiques de la pedra i la càrrega que reben els elements.

## 1.6 HIPÒTESI DE BAIXADA DE CÀRREGUES

### 1.6.1 HIPÒTESI 1: ÀREES TRIBUTÀRIES

La primera hipòtesi és una baixada de càrregues d'una forma homogènia. Cada columna suportarà les càrregues degudes als pisos superiors i al pes de la façana. Si aquesta hipòtesi fos certa, voldria dir que les columnes suportarien una gran càrrega a causa de les grans dimensions que té el mur de façana i que probablement les més malmeses haurien de ser substituïdes, per tal de poder garantir una correcta baixada de càrregues.

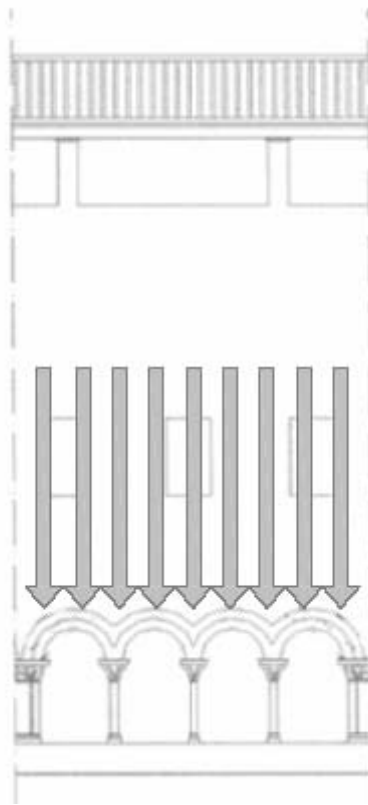


Fig. 10 Esquema de baixada de càrrega per àrees tributàries

## 1.6.2 HIPÒTESI 2: ARC DE DESCÀRREGA

La segona hipòtesi es la formació d'un arc de descàrrega on la major part de les càrregues es distribuïrien en els metxons situats entre el conjunt de les columnes. Aquestes només haurien de suportar unes càrregues residuals (tot i que importants), que correspondrien a l'àrea de mur de façana per sota de l'arc de descàrrega, tal i com es pot veure a l'esquema. Si es produís aquesta hipòtesi, les càrregues a suportar per les columnes seria molt menor i probablement no seria necessària la seva substitució.

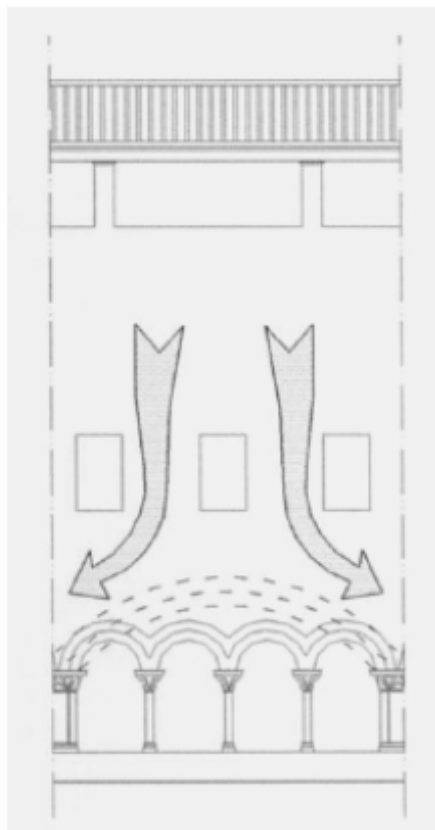


Fig. 11 Esquema de baixada de càrregues per arc de descàrrega

## **1.7 ANTECEDENTS**

Amb la finalitat de realitzar les proves de càrrega al Claustre de la Catedral de Girona, s'han realitzat varis estudis per: analitzar el context de la prova, estudiar i aconseguir un sistema per a l'execució de les proves i una optimització del sistema anterior. Com a fase final trobem les proves de càrrega, que son el resultat de l'esforç i treball de companys nostres, els treballs dels quals es presenten a continuació

### **1.7.1 ANÀLISI DE LES COLUMNES DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA.**

Projecte realitzat per X.Bras, A.González i P. Vandenbrossche l'any 2001, en el que es realitza un anàlisi de les diferents patologies que pateixen els elements del claustre, com son les lesions mecàniques, lesions físiques, lesions químiques i les diferents causes que les han produït. També realitza un estudi exhaustiu de l'estat de cada una de les columnes i pilars i dels seus capitells i bases acompanyat amb documentació gràfica. Alhora aquest projecte presenta un estudi de les característiques de la pedra de Girona, amb diferents testos, realitzats en les columnes insitu i al laboratori mitjançant una mostra i avaluant les seves propietats dinàmiques. Es realitza el càlcul de les baixades de càrregues de les columnes tant de forma manual, com de forma informàtica, mitjançant un model RISA-3D. Finalment presenta uns resultats d'uns anàlisi d'eflorescències realitzats a unes crostes blanques que apareixen en algunes de les columnes.



## 1.7.2 PROPOSTA D'UN SISTEMA D'INSTRUMENTACIÓ COMPLERT PER A LA PROVA DE CÀRREGA DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA

Projecte realitzat per la Cristina Bassols i Maria Comas l'any 2002. En aquest projecte es realitza un estudi d'instrumentació, monorització i aplicació d'aquests en rehabilitacions d'edificis històrics, tant en la realització d'assaigs estàtics com dinàmics. També dissenya un mecanisme per tal de poder realitzar una prova de càrrega en les columnes del Claustre de la Catedral de Girona per poder conèixer les seves propietats més rellevants, així com les càrregues que reben. Aquest mecanisme està format per una estructura metàl·lica realitzada amb perfils quadrats buits, HEB i IPN. Alhora, el mecanisme inclou la instrumentació estudiada. El projecte també aporta estudis paral·lels com són diferents estudis analítics de les càrregues de les columnes del claustre, anàlisi estructurals, estudis sobre les característiques de la pedra de Girona, sistemes constructius, estudi de càrregues, etc...

Al mateix temps també fa el seguiment dels assaigs previ realitzats a laboratori a una proveta cilíndrica de pedra de Girona amb les mateixes característiques que les columnes del claustre, per tal de conèixer les característiques mecàniques de la pedra i alhora posar en contacte els aparells amb el material, col·locar-los, testar-los i calibrar-los.

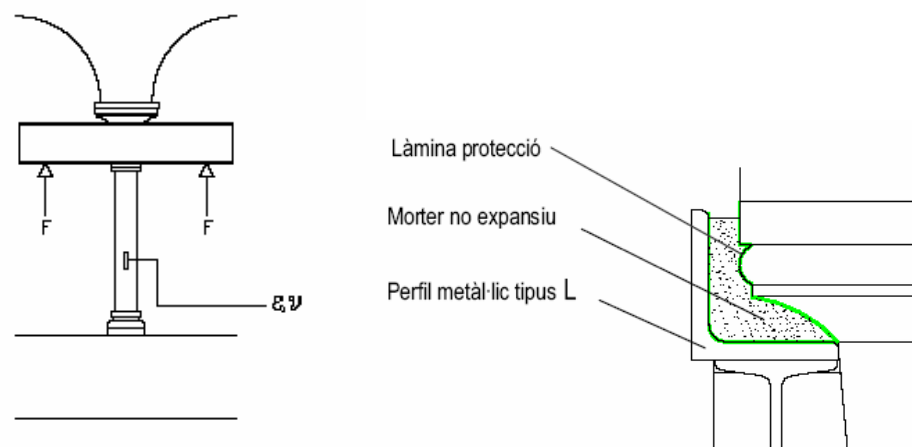


Fig. 12 Esquemes del sistema de descàrrega

En el primer dels dos esquemes es pot veure a on es volien aplicar les forces verticals per tal de descarregar el pilar juntament amb la col·locació de la galga i al segon, es pot veure l'àrea de contacte entre el capitell i la subestructura metàl·lica.

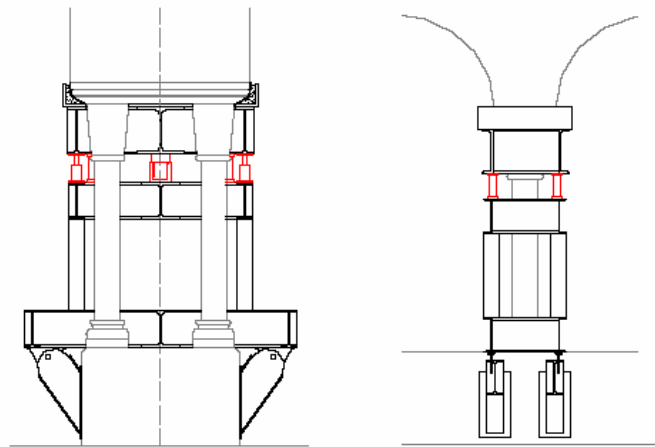


Fig. 13 Esquema de l'estructura metàl·lica

En els següents esquemes es pot veure el conjunt del sistema aplicat al context de les columnes del claustre. Es poden observar les 2 parts de l'estructura metàl·lica separades pels pistons encarregats d'elevat les columnes.

El projecte va finalitzar amb les següents conclusions principals:

- Es necessita un sistema hidràulic d'elevació lo suficientment potent per poder exercir la força necessària
- Les dades obtingudes a l'estudi no son del tot fiables ja que estan afectades per errors d'instrumentació
- S'ha de portar a terme un nou estudi que perfeccioni els errors esmentats

### 1.7.3 SISTEMA PER A LA DESCÀRREGA D'UN PILAR DEL CLAUSTRE DE LA CATEDRAL DE GIRONA

Projecte realitzat al 2003 per Xavier Aparicio, té per objectiu dissenyar un mecanisme per tal de conèixer l'estat de càrrega de les columnes del Claustre de la Catedral de Girona, degut al cavni d'ús que es produirà en la planta primera i verificant si les noves sobrecàrregues que es produiran podran ser absorbides. En el seu procés es pretén fer el menor dany possible a l'estructura existent, degut al seu gran valor històric.

El que es vol realitzar concretament és verificar experimentalment tots els supòsits, realitzant una prova de càrrega "in situ" en el claustre. Al projecte s'hi destaca el càlcul i disseny d'uns puntals hidràulics instrumentats essencials per realitzar la prova de càrrega. Aquests tindran la funció d'aixecar les càrrega suportades de les columnes

Els puntals hidràulics estan situats a 45° a banda i banda d'un parell de columnes, recolzant per la seva part superior en els arcs del Claustre i unint-se mitjançant un tensor d'hacer en la seva part inferior. D'aquesta manera la resultant de la càrrega produïda pels dos puntals hidràulics és una força vertical empenyent cap a dalt.

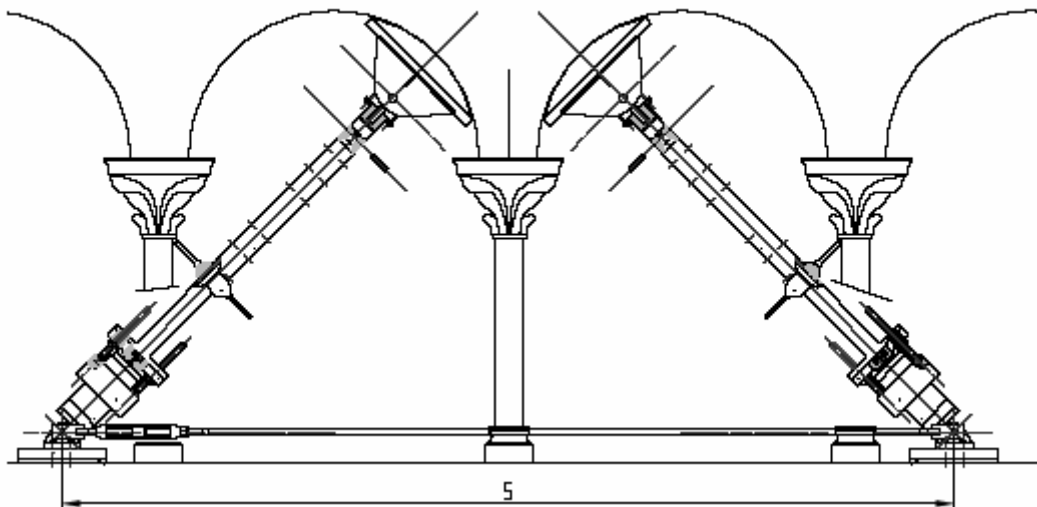


Fig. 14 Esquema de muntatge dels puntals hidràulics instrumentats

El cos del puntal està format per dos perfils tubulars, muntats telescòpicament, per tal d'aconseguir diferents posicions d'alçades. El perfil tubular exterior descansa sobre una famella roscada en la part exterior del perfil tubular interior, i és mitjançant aquesta que es garanteix la transmissió de la càrrega. En la seva zona de contacte inferior de la pedra s'hi adapta una base de goma i en el seu recolzament superior una plataforma de fusta amb la mateixa geometria que l'arc. D'aquesta manera es produeix un contacte menys violent entre el puntal i l'estructura de pedra.

Es creen dos circuits hidràulics independents, un per cada pistó. Aquest circuit està equipat bàsicament per un grup de pressió format per una bomba manual accionada per un èmbol, que a cada embolada produeix un recorregut en el pistó de l'ordre de 0.20 a 0.5 mm. Aquests pistons podran produir una càrrega màxima de 15 Tn.

El puntal hidràulic, va equipat amb quatre galgues extensomètriques per tal de mesurar directament l'esforç. Aquestes galgues permeten determinar la mesura de càrrega aplicada pels puntals.

El projecte finalitza amb la conclusió que s'ha de realitzar un nou disseny del procés de descàrrega degut als següents condicionants:

- Augment de la càrrega nominal que transmeten els arcs de 15000 a 55000 kg
- El perill que el sistema es desestabilitzi, ja que la càrrega aplicada a la volta no es reparteix uniformament
- Disseny d'un muntatge còmode, pràctic i economicament viable

## 2. INSTRUMENTACIÓ

### 2.1 SISTEMA D'ADQUISICIÓ DE DADES

L'objectiu bàsic d'un sistema d'adquisició de dades, és integrar tots els diferents recursos que el componen. Transductors de diferents tipus i naturalesa, amplificadors, multiplexors, conversors A/D i D/A, amb la idea final de crear un sistema que s'encarregui d'una funció concreta com és la de enregistrar unes variables (tensió, humitat, temperatura etc...) per a una posterior utilització.

En resum, un sistema d'adquisició de dades no és més que un equip electrònic, la funció del qual és la de controlar o simplement registrar una o vàries variables d'un procés. L'emmagatzematge de dades es fa a través de les targetes d'adquisició de dades.

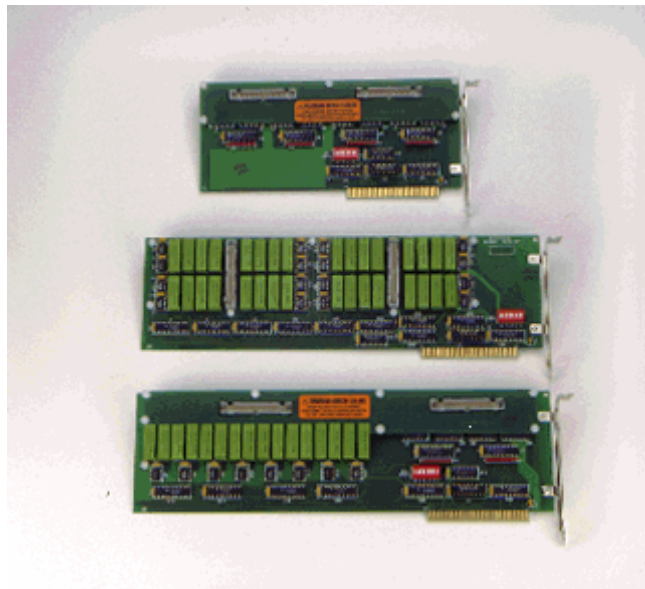
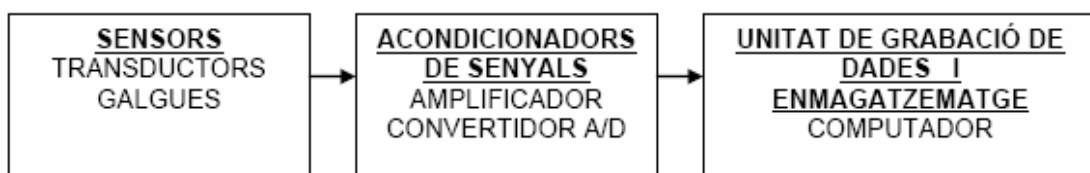


Fig. 15 Targetes d'adquisició de dades

#### 2.1.1 ESQUEMA BÀSIC D'UN SISTEMA D'ADQUISICIÓ



## Característiques generals dels condicionadors de senyal

- Múltiples canals, de 5 a 1200
- Diferents resistències del pont, les usuals son de 350  $\Omega$
- Diferents intervals d'exploració, tant curts com 0.02 s per múltiples entrades
- Condicionadors de senyal estable, exacte i de poc soroll
- Diferents interfaç de hardware, ISA i/o PCMCIA

En un sistema d'adquisició de dades, es poden trobar molts altres elements com un explorador o multiplexor, que accepta múltiples entrades analògiques i les connecta secuencialment a un instrument de medició. També es poden trobar convertidors de senyal, que transformen la senyal analògica per al convertidor analògic-digital. De totes formes, l'element més rellevant al SAD és el condicionador de senyal ja que és imprescindible.

### 2.1.2 CONDICIONADOR DE SENYAL

Usualment, el condicionador de senyal inclou la circuiteria de suport per al transductor. Aquesta circuiteria pot proporcionar l'energia d'excitació, circuit d'equilibri i elements de calibració.

Els condicionadors de senyal son capaços de registrar en plaços molt curts de temps un gran nombre d'entrades en intervals d'exploració molt petits. Això es tradueix a uns resultats de la prova més exactes i la capacitat de capturar dades en condicions de càrrega estàtica just abans del col·lapse.

Les connexions del sensor es fan rapidament a les targetes de la part posterior de cada condicionador. En el cas de les targetes de les galgues de tensió, poden incloure terminacions pels ponts i una font d'alimentació de voltatge constant per la excitació del pont.



Fig. 16 Condicionador de senyal

### 2.1.3 SISTEMA GENERAL D'ADQUISICIÓ DE DADES

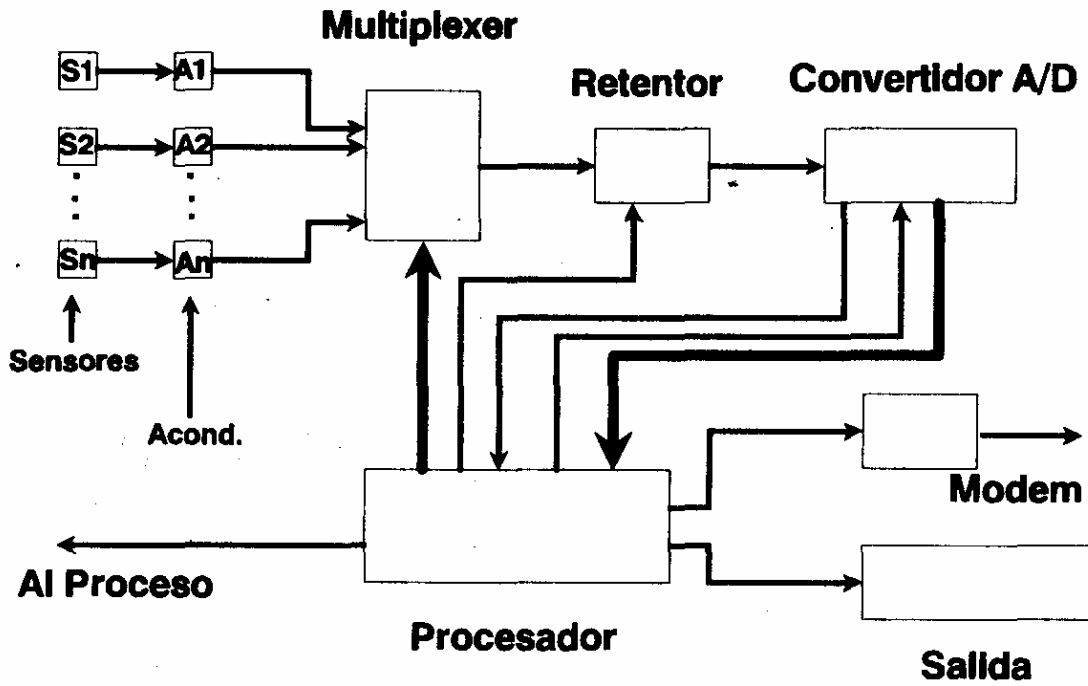


Fig. 17 Esquema del procés d'adquisició de dades

## 2.2 SOFTWARE DE PROCESSAMENT DE DADES

Existeixen sistemes amb entorn windows per al processament de les dades obtingudes al procés anteriorment descrit. Aquests programes redueixen, presenten i emmagatzemen les dades de mesura de les galgues extensomètriques, dels transductors de desplaçament, termopars, sensors de temperatura i d'altres transductors comuns.

Un cop assignats els paràmetres per als sensors, materials i hardware, el programa s'encarrega d'extreure els resultats de la prova en unitats intel·ligibles i amb diferents opcions com la de reduir els resultats en dominis de temps i freqüència. Llavors es poden guardar les dades obtingudes per a una posterior revisió, o ús en bases de dades, processadors de text o fulles de càlcul.

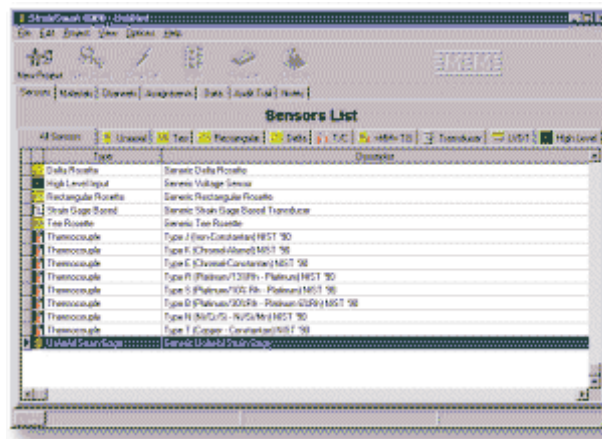


Fig. 18 Imatge del software de processament de dades

Característiques més comuns d'aquest tipus de software

- Dissenys basats en windows o altres entorns gràfics
- Assignació específica de les entrades dels sensors (galgues, transductors etc...), així com les definides per l'usuari per la posterior manipulació matemàtica de les dades
- Calibració de les desviacions de les galgues de tensió
- Possibilitat d'obtenir la informació reduïda en formats com taules Paradox, text ASCII, llenguatge HTML o en formats més comuns com Word, Excel o Access
- Expedients en límits o intervals de temps definits per l'usuari
- Emmagatzematge de les dades per un millor anàlisi posterior



## 2.3 GALGUES EXTENSOMÈTRIQUES

Son un dispositiu de medició de deformacions, que funciona amb el principi de variacions de resistència d'un conductor de secció constant en funció de les deformacions. En definitiva es tracta d'un mecanisme que mesura les deformacions unitàries en un punt.

### Factor de la galga

$$\Delta R/R = K \times \varepsilon$$

R és la resistència entre els terminals de la galga

$\varepsilon$  és la deformació en la direcció de la longitud més gran de la reixeta

K és el factor de la galga. El seu valor sol oscil·lar al voltant de 2 per galgues amb reixetes de constantan o de níquel-crom (que son els més usuals)

La galga extensomètrica converteix el problema de mesurar deformacions en un problema de mesurar resistències òhmiques, transformades en senyals elèctrics. Així es poden mesurar amb una gran exactitud, comptant amb l'ajuda de totes les possibilitats que ofereix el tractament del senyal elèctric.

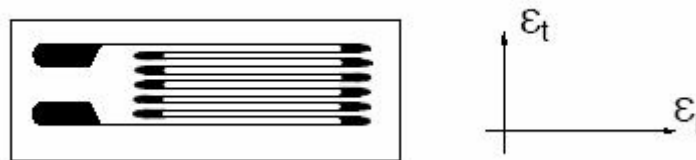


Fig. 19 Esquema d'una galga

En realitat la fórmula s'hauria d'escriure ( $\Delta R/R = K_1 \times \varepsilon_1 + K_t \times \varepsilon_t$ ) ja que no només depèn de la resistència de la galga de la deformació longitudinal, sinó també en un menor grau de la deformació transversal ( $\varepsilon_t$ ).

El fet d'aquesta deformació longitudinal és anomenada sensibilitat transversal. És causada per la deformació transversal dels fils que formen la reixeta de la galga, alhora de la deformació de les corbes que han de formar el fil.

## 2.3.1 ELEMENTS DE LES GALGUES

### Els fils conductors

Els fils conductors de les galgues estan fets amb alguns aliatges de níquel-crom i l'Elinvar (aliatge de ferro-crom-molibdè) i (coure níquel). Ja que aquests materials aporten una relació entre deformacions i variacions de resistència lineals per tal que el factor de galga  $K$  es mantingui constant quan es deformi.

### El suport

La reixeta de la galga es col·loca sobre un suport que l'aïlli elèctricament del material, on s'encola (en el cas que sigui conductor). El suport ha de ser capaç de transmetre les deformacions de l'element estudiat a la reixeta conductor de la forma més fidel possible.

La deformació de la peça es transmet a la galga bàsicament a través dels dos extrems.

Principals problemes que afecten el comportament del suport:

- La fluència: Fa que la deformació transmesa disminueixi amb el temps, sobretot si s'eleva la temperatura.
- La flexibilitat: És necessària per manipular i encolar les galgues. El límit d'allargament ha de ser tant gran com les màximes deformacions que s'hagin de mesurar.
- La resistència d'aïllament: S'ha de garantir l'aïllament entre els fils conductors respecte la massa estudiada
- La resistència a la temperatura: Tant mecànicament com elèctricament.

Degut a que no serà possible obtenir característiques òptimes per tots els paràmetres, s'utilitzaran diferents tipus de galgues en funció de les diverses aplicacions que s'hagin de realitzar.

Tipus de suports més usats:

	Fluència	Flexibilitat	Límit d'allargament	Resistència a la Temperatura
Cel·lulosa	R	B	10%	De -40 a +70°C
Poliester	R	MB	2%	De -30 a +80°C
Poliamida	de B a MB	MB	2.5%	De -30 a +200°C
Epoxid	de B a MB	De R a B	2.5%	De -30 a +90°C
Resines fenpoliques amb vidre	MB	R	2%	De -200 a +260°C

*B= Bé*

*MB=Molt bé*

*R=Regular*

### Encapsulació

Petita làmina plàstica sobre la reixeta que tenen alguns tipus de galgues per evitar uque la humitat hi penetri, alhora que també evita agressions de tipus mecànic, com ara ratllades.

### Sortides

Zones anomenades terminals que hi han en algunes galgues que serveixen per fer una soldadura als fils de sortida per poder realitzar una ampliació del circuit. A vegades aquestes terminals porten un recobriment que facilita l'adherència de la soldadura. També pot ser que porti de fàbrica petits fils soldats en els terminals.

La galga es connecta als aparells per mitjà d'un connector, petit element que es situa immediatament davant de la galga i que evita esforços mecànics que hagin pogut produir els cables de connexió als instruments.

### Galgues estàndard

De forma rectangular entre 3 i 10mm de llargària i amb els seus terminals en els extrems.

### 2.3.2 COL·LOCACIÓ DE LES GALGUES

Les columnes on han de ser encolades les galgues reben una sèrie de tractaments mecànics i químics destinats a aconseguir un funcionament correcte de l'adhesiu. Cal evitar en tot moment qualsevol modificació de les característiques del cos a assejar.

#### Procediment:

Neteja i desgreixatge, utilitzant qualsevol tipus de desgreixador, preferentment tricloroetilè o acetona.

Polit de la superfície amb paper de vidre gruixut, intentant fer desaparèixer rugositats, porus i qualsevol rastre de pintures, òxids, escòries...El polit s'haurà de fer en la mesura que sigui possible en una direcció de 45° respecta la direcció de mesurament de la banda. S'actua utilitzant cada cop papers de vidres més fins, fins arribar al tipus 00.

Un cop realitzat el polit de la superfície amb paper de vidre, es realitzarà la neteja de les restes que hagin quedat durant aquesta operació, utilitzant novament dissolvents del tipus tricolor o acetona. Per a la neteja s'utilitzarà paper tipus kleenex o muleton i es rebutjarà qualsevol tipus de papers, cotons, draps etc...que puguin deixar residus sobre la superfície. Cada cop que es passi el paper impregnat amb triclor o acetona s'haurà de llençar, i es repetirà la mateixa operació amb un paper net. El procés de neteja finalitzarà quan es passi el paper per la superfície, i surti completament net. Aquest sempre es passarà en la mateixa direcció que s'ha realitzat el polit de la superfície.

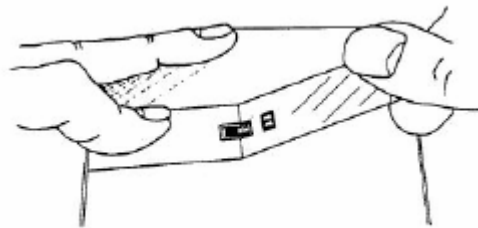
Un cop realitzada l'operació de neteja es farà la neutralització de la superfície, per si hi pogués existir residus àcids que impedissin l'enduriment d'alguns tipus de coles. Per aquesta operació es pot usar, a més dels neutralitzadors recomanats pels fabricants de galgues, un neutralitzador químic, com ara l'amoníac. Un cop neutralitzada la superfície, cal tornar a netejar la superfície amb dissolvent.

### Procès d'encolatge

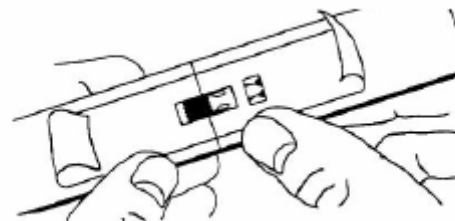
Resulta molt important i pràctic enganxar el costat de la galga un suport de terminals imprès.

Per l'encolatge amb coles d'assecat ràpid a temperatura ambient, es procedeix de la manera següent:

Col·locar la galga i el terminal imprès sobre un vidre totalment net. Cobrir amb un paper transparent autoadhesiu de manera que quan sigui aixecat, se'ls endugui enganxats, procurant de no doblegar la galga.



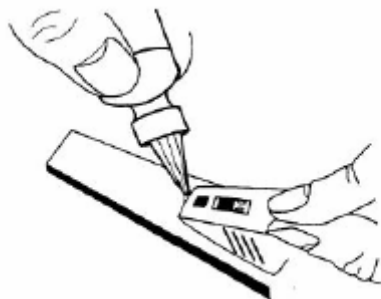
Situar la cinta i la galga sobre el punt que es vol mesurar, i fixant un extrem, s'aixeca l'altre



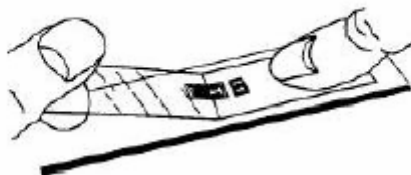
Aplicar la cola, seguint les indicacions del fabricant i procurant no contaminar-la amb l'adhesiu de la cinta



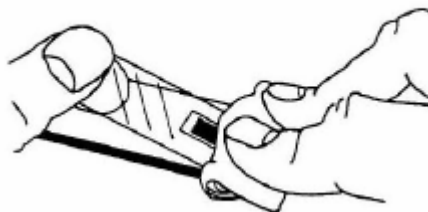
Posar unes gotes d'adhesiu sobre la superfície d'assentament.



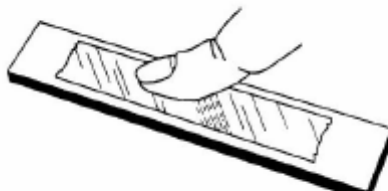
Abaixar la cinta i realitzar una lleugera pressió amb el dit evitant tocar l'adhesiu directament. (utilitzar paper de tefló o similar, que no s'enganxi amb l'adhesiu)



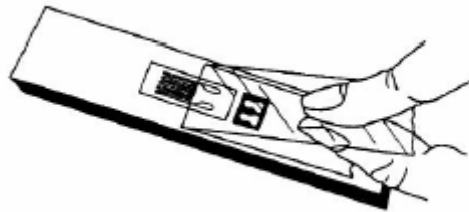
Passar una gasa o algun material similar per evitar que es formin bombolles d'aire



Realitzar pressió sobre la galga durant un minut



Un cop transcorregut el temps indicat pel fabricant, es retira la cinta adhesiva que ha servit per l'encolatge de la galga. Aquesta operació s'ha de fer estirant la cinta a 45° del sentit que es prenen les mesures, sempre transversalment i mai perpendicularment a la superfície de la galga.



### 2.3.3 CABLATGE I SOLDADURA

La secció del cablatge no ha de ser molt petita, ja que això imposa una resistència de calbe alta, cosa que dessensibilitza el pont. La longitud dels cables, és la mateixa per a totes i per a la de compensació.

També es procurarà que els cables de les galgues i de compensació aniran junts, per evitar problemes de variacions de resistència diferents del cable de la galga i del cable de la galga de compensació.

També es procurarà que els cables quedin units a l'estructura de la millor manera possible mitjançant brides, cinta aïllant, etc...per tal d'evitar accidents causats pels seus moviments o estrebades que puguin ocórrer.

Per realitzar la soldadura és recomanable utilitzar el tipus d'estany anomenat de plata, que porta un quantitat molt reduïda de resina i es fon a una temperatura relativament baixa. A diferència d'altres resines que donen unes característiques determinades de conductivitat elèctrica, sol·licitacions mecàniques, de temperatura de fusió etc...

Un cop realitzada la soldadura, és necessari netejar la zona amb dissolvent per eliminar residus del fundent i de la resina.

Per a galgues que ja tenen els fils de sortida als terminals imprès, s'ha de soldar el fil terminal amb molta rapidesa, per evitar que s'escalfi i es dessoldi de la part unida de la galga.

## 2.4 CÈL·LULES DE CÀRREGA

Les cèl·lules càrrega són sensor que s'utilitzen per a la mesura de forces o pesos que actuen en un punt o una zona, funcionant tan a compressió com a tracció.

Aquestes estan formades per dos parts diferenciades. Una és el recobriment i l'altre la part deformable de la peça formada per un material elàstic, el qual es deforma al aplicar-li les càrregues. La deformació unitària ( $\epsilon$ ) es mesura mitjançant una galga integrada a la cèl·lula de càrrega. Com que el mòdul elàstic (E) és propi del material i per tant conegut, podem obtenir el valor de la càrrega aplicada (N)

$$N = E \times \epsilon$$

A la prova en concret, utilitzarem la cèl·lula de càrrega per tenir una referència més exacte del que passa en cada moment amb l'estat de les càrregues. S'anirà canviant de punta hidràulic per comprovar el comportament del sistema a cada una de les zones del conjunt.



Fig. 20 Foto de la cèl·lula de càrrega col·locada en un dels puntals hidràulics



## 2.5 TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT

Un transductor és bàsicament una sèrie d'elements que transformen paràmetres físics com tensió, temperatura, velocitat, humitat etc...en senyals elèctriques que posteriorment poden ser emmagatzemades, utilitzades i estudiades.

Els transductors de desplaçament lineals s'utilitzen per detectar desde petites variacions de desplaçament, 5mm, fins a increments de 100mm. Són sensors versàtils que s'adapten a una àmplia gamma d'aplicacions, les més freqüents solen ser investigació, enginyeria i control de processos industrials.

En el nostre cas, s'utilitzarà els transductors de desplaçaments lineals per detectar el moviment de gir dels arcs ambdós sentits, dret i esquerra. (veure punt 2.5.3)



Fig. 21 Foto d'un transductor de desplaçament

### Característiques generals

- Resolució infinita
- Bon comportament lineal
- Precisió
- Qualitat dels materials del sensor
- Compatibilitat

Els transductors de desplaçament lineal ofereixen les mateixes prestacions de linealitat, flexibilitat i precisió que d'altres sensors de tensió. Com a tals, son sistemes compatibles amb una àmplia gamma de sensors més utilitzats com són els de pressió , càrrega, acceleració, vibració etc...i utilitzen normalment la mateixa instrumentació

#### Qualitat

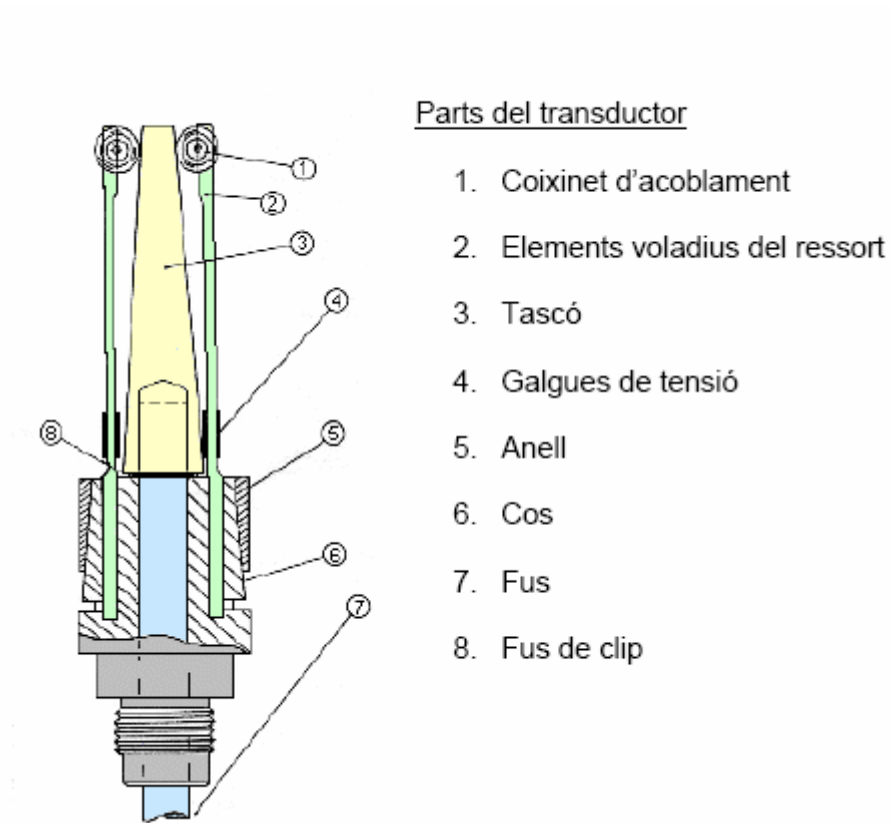
Una construcció robusta, la baixa tensió de consum, així com les compatibilitats dels sistema, son factors importants en el disseny d'un sensor. Aquests factors juntament amb la enginyeria de presició i el rigorós control de qualitat del producte, fan que els transductors de desplaçament siguin els sensors de tensió més utilitzats arreu del món.

## 2.5.1 CARACTERÍSTIQUES TÈCNIQUES

*Rang de desplaçament	in	0.25	0.5	1	2	4	
	mm	6.5	11.2	26	51.5	102	
Dimensions (veure esquema)	A	in	4.10	4.30	5.44	8.48	14.97
		mm	104.2	109.2	138.2	215.4	380.2
	B	in	3.49	3.49	4.08	6.11	10.47
		mm	88.6	88.6	103.6	155.2	266.0
	C	in	0.19	0.19	0.19	0.19	0.24
		mm	4.8	4.8	4.8	4.8	6.0
	D	in	0.69	0.69	0.69	0.69	1.00
		mm	17.4	17.4	17.4	17.4	25.4
Pes	lb	0.31	0.31	0.33	0.44	1.10	
	g	140	140	150	200	500	
*Força del ressort	lb	0.44	0.55	0.55	0.66	0.77	
	g	200	250	250	300	350	
Voltatge	2 to 10V, ac or dc						
*Frequència de resposta	desplaçament 5-mm: 100 Hz; desplaçament 100-mm: 10Hz						
*Tensió sortida	mV/V	4.5	5.3	7.0	3.6	5.2	
*No linealitat	0.1% FS			0.1% FS	0.1% FS	0.1% FS	0.2% FS
Resolució	Infinita						
Resistència del pont	pont de 350 ohms, 100K ohms balanç zero						
Rang de T°	+15 to 140°F			-10 to +60°C			
*Coeficient de T°	Zero <0.006%/°F			Pam <0.006%/°F			
	Zero <0.01%/°C			Pam <0.01%/°C			
Terminació	0.18 en PVC 7/0.008, 4-protectors, 6.6 ft llargada						
	4.5 mm PVC 7/0.2, 4-protectors, 2 m llargada						
Connexions elèctriques	Entrada :vermell(+) negre(-)Sortida :verd(+) blanc(-)						

\*Valors subjectes a calibració

## 2.5.2 ESQUEMA DEL TRANSDUCTOR



### Parts del transductor

1. Coixinet d'acoblament
2. Elements voladius del ressort
3. Tascó
4. Galgues de tensió
5. Anell
6. Cos
7. Fus
8. Fus de clip

Funcionament del transductor:

Mentre el fus (7) es desplaça en col·lisió amb el cos del sensor (6), el tascó (3), unit al fus, desvia els elements del ressort (2) i augmenta la tensió en les galgues (4) situades a prop de l'extrem fixe de cada un dels elements del ressort.

### 2.5.3 ESQUEMA DE MUNTATGE DELS TRANSDUCTORS

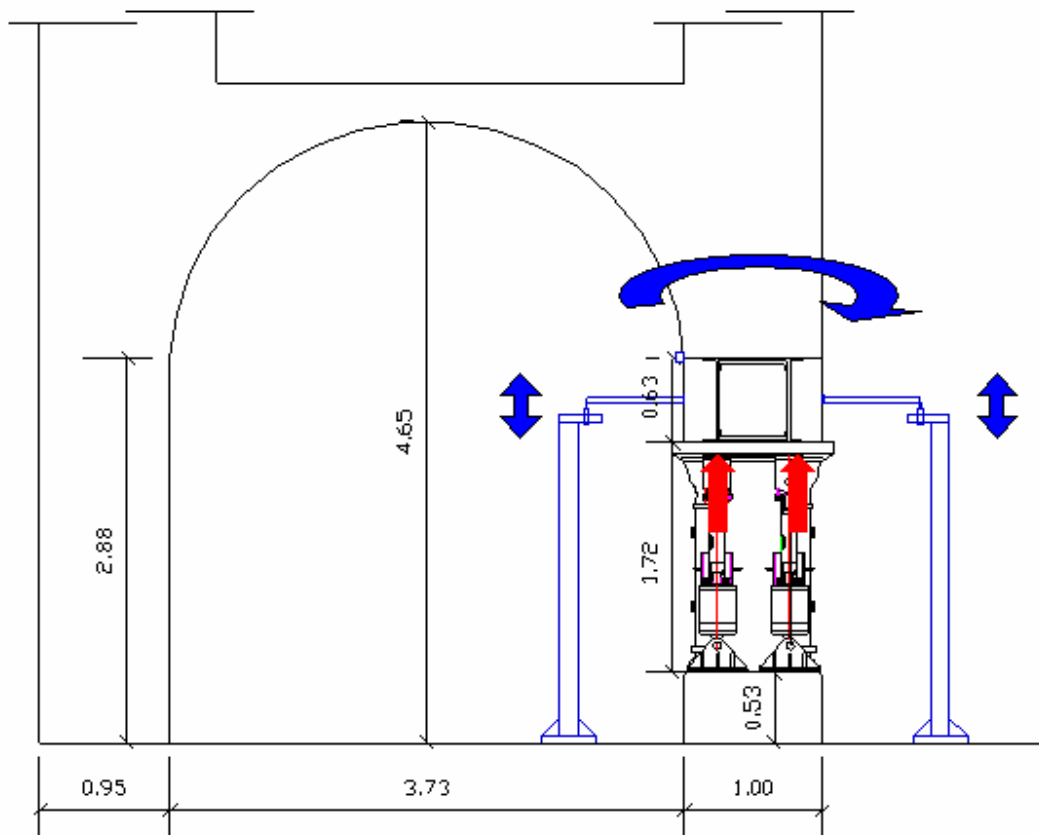


Fig. 22 Esquema de funcionament dels transductors

A l'esquerra es poden observar els elements de muntatge dels transductors de desplaçament. D'una banda es troben els suports dels transductors, que són una espècie de pilars on van fixats els sensors i d'altre banda els suports auxiliars dels transductors, que serviran com a referència per a la presa de mesures del transductor.

Per tal de detectar si el sistema gira, es disposaran de dos transductors, un a la part inferior i l'altre a la part exterior. Quan el sistema es mogui, els transductors mesuraran aquestes moviment donant lectures positives en el cas que s'escurci i lectures negatives en el cas que s'allargui.

Quan es realitzin les proves de càrrega, el sistema s'hauria d'eleva de forma uniforme, per tant els dos transductors donarien lectures negatives semblants. En el cas que aquestes lectures no fossin semblants, això indicaria que el sistema pateix un gir.

## 2.6 CONVERGENCÍMETRE

Dispositiu que controlarà que no es produeixin desplaçaments horitzontals durant la prova de càrrega.

Aquest dispositiu està format per una corda situada de forma transversal a la volta estudiada, una politja, que farà de la corda varii la seva inclinació de horitzontal a la vertical i un transductor de desplaçament, que penjarà de la corda, mantenint un mínim contacte amb el terra.

### 2.6.1 ESQUEMA DE MUNTATGE DEL CONVERGENCÍMETRE

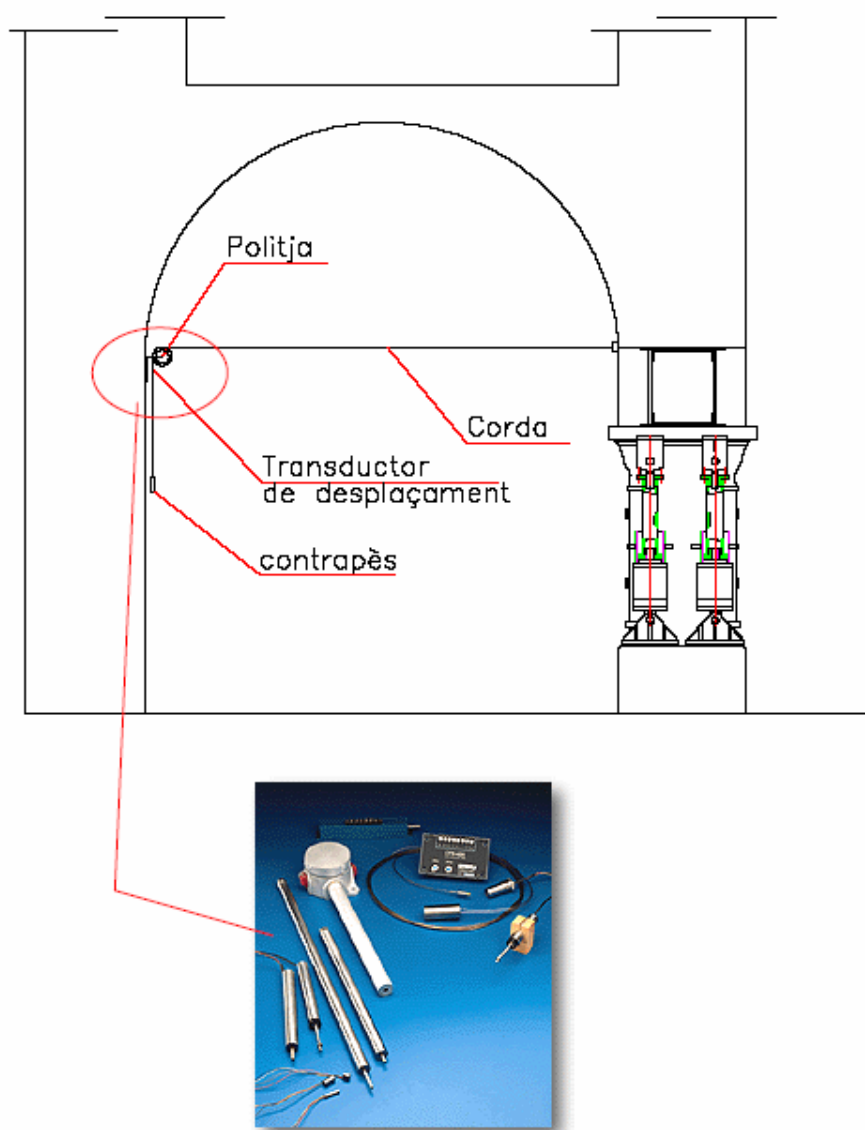


Fig. 23 Foto de varis transductors per a convergencímetres

## 2.6.2 FUNCIONAMENT DEL CONVERGENCÍMETRE

En el cas que es produeixin moviments horitzontals a la volta, la corda s mourà en la mateixa direcció que el moviment produït, d'aquesta manera es tensarà o destensarà provocant un moviment en el transductor de desplaçament

Si el moviment és cap a l'esquerra (segons l'exemple adjunt) el transductor de desplaçament variarà la posició detectant el moviment produït.

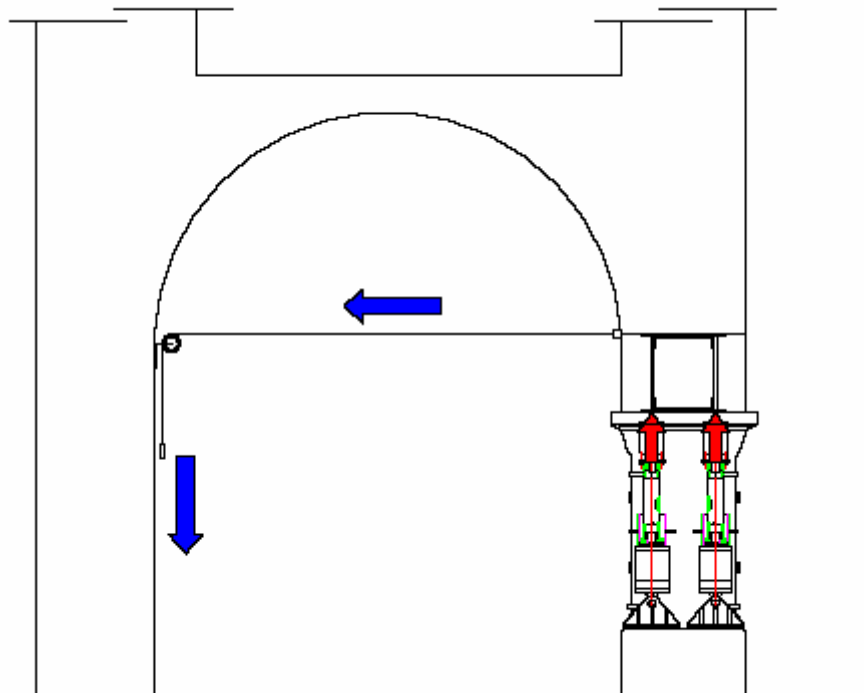


Fig. 24 Esquema de funcionament del convergencímetre, desplaçament esquerra

Si per contra el moviment és cap a la dreta (segons l'exemple adjunt) el transductor de desplaçament variarà la posició detectant el moviment produït.

En el cas que aquests moviments produïts per l'empenta dels pilars hidràulics sobrepassessin uns límits raonables de seguretat, la prova s'aturarà per evitar danys estructurals.

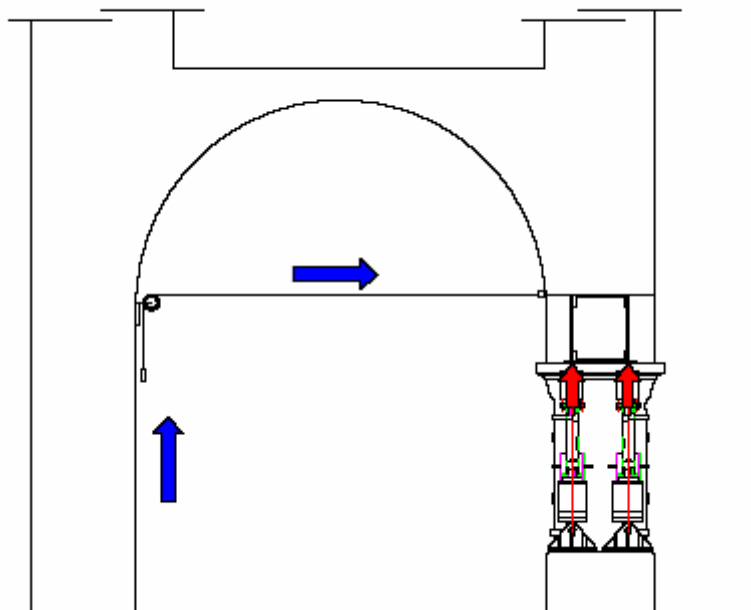


Fig. 25 Esquema de funcionament del convergencímetre, desplaçament dret



## 2.7 ACCELERÒMETRES

Un acceleròmetre és un dispositiu electromecànic que mesura forces d'acceleració. Aquestes forces poden ser estàtiques, com la força de la gravetat o poden ser dinàmiques causades per el moviment de les partícules. D'aquesta manera es pot saber la inclinació relativa respecte la terra, l'acceleració i la velocitat de les masses o d'altres paràmetres.

Hi ha molts tipus d'acceleròmetres, aquests s'escolliran principalment per tres factors: depenen del que es desitgi estudiar, de la precisió que es vulgui obtenir i de la zona on estigui situat.

Es poden utilitzar sobre una base independent o dins un conjunt amb un sistema d'adquisició de dades.

Els acceleròmetres més freqüents són els piezoelèctrics. Aquests utilitzen una massa en contacte directe amb un component piezoelèctric o cristall, de tal manera, que quan hi ha una variació de moviment, el cristall experimenta una força variable d'excitació,  $F=ma$ , desenvolupant una càrrega elèctrica proporcional  $Q$ .

N'hi ha d'altres tipus com poden ser els piezoresistius, compostos per galgues extensomètriques semiconductores o els capacitius, basats en el principi de canvi de proporció a l'acceleració aplicada.

### 2.7.1 CARACTERÍSTIQUES GENERALS DELS ACCELERÒMETRES

#### Nombre d'eixos

Normalment per a la majoria de projectes dos eixos són suficients, no obstant això si el que es necessita és obtenir una ubicació 3D, seran necessaris els acceleròmetres de tres eixos o triaxials, o bé dos unitats de dos eixos, muntades perpendicularment.

### Oscil·lació màxima

La oscil·lació variarà depnent dels usos al que vagi destinat. Una unitat de  $\pm 1.5g$  servirà per analitzar les inclinacions relatives respecte la terra. Si el que volem es analitzar el moviment d'un cotxe, serà necessari utilitzar un acceleròmetre de  $\pm 3g$ . Per últim trobem els de  $\pm 5g$  que són vàlids per analitzar moviments agressius.

### Sensibilitat

Com més sensibilitat tingui l'aparell, més exacte seran les lectures finals. D'aquesta forma quan hi hagi un canvi en l'acceleració, es produirà un canvi més gros a la senyal.

### Amplada de banda

Significa el nombre de cicles per segon en què pot mesurar una acceleració. D'aquesta manera, si hem d'analitzar moviments o inclinacions de baixa velocitat e importància, es treballarà al voltant d'uns 50 Hz. Però si es tracta de moviments o vibracions ràpides, s'haurà d'augmentar la freqüència de funcionament.

### **3. COMPONENTS DEL SISTEMA HIDRÀULIC**

#### **3.1 ESQUEMA DE MUNTATGE**

##### **3.1.1 MUNTATGE EN SECCIÓ**

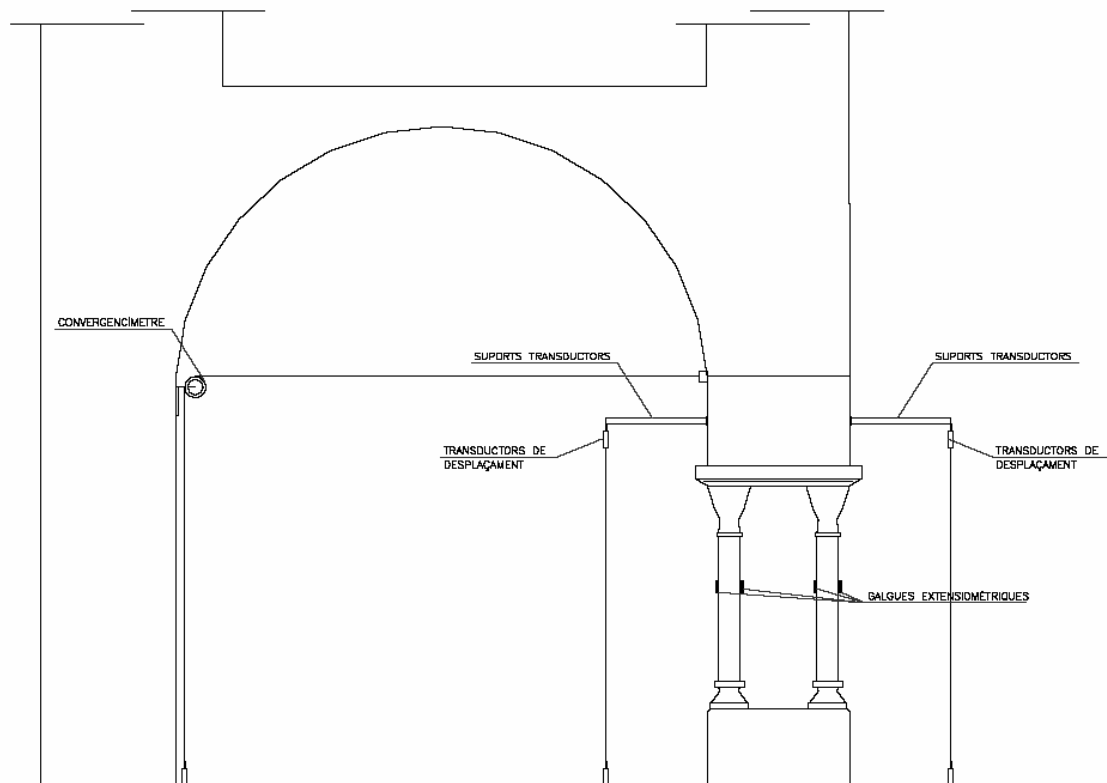


Fig. 26 Esquema del muntatge general

### 3.1.2 MUNTATGE FRONTAL

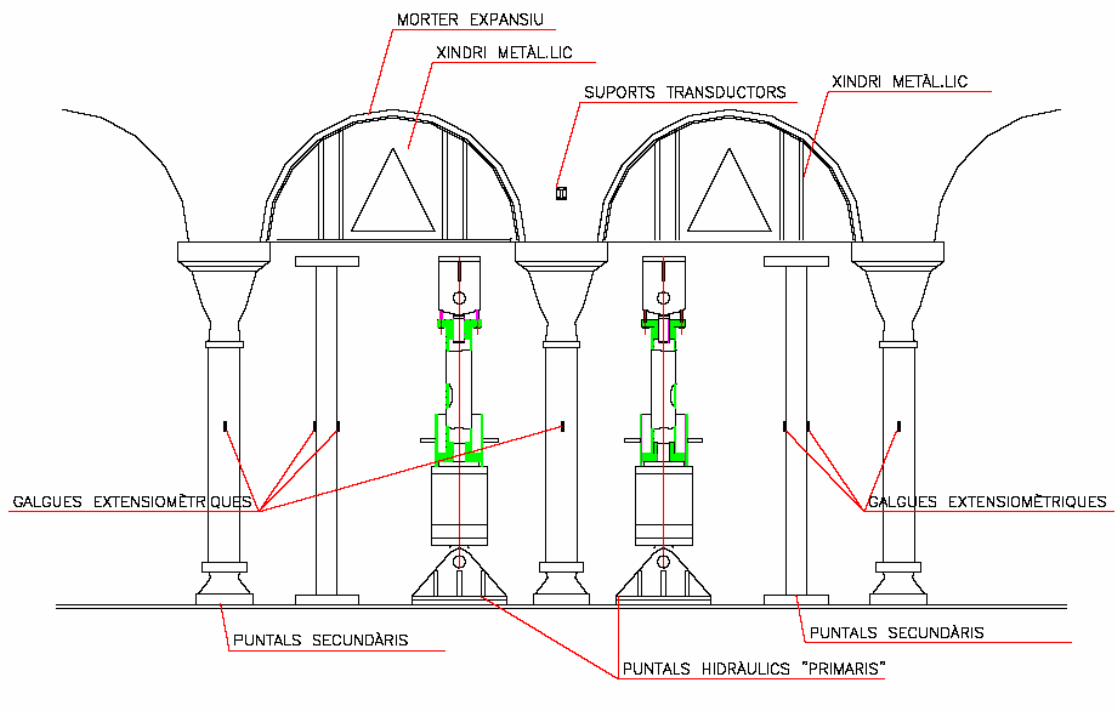


Fig. 27 Esquema del muntatge general, vista frontal

## 3.2 SUPORTS PER ALS TRANSDUCTORS DE DESPLAÇAMENT

Elements situats a banda i banda de la volta del claustre. D'uns 70cm cadescun que tindrà com a funció bàsica ser la referència per els sensors dels transductors de desplaçament per tal de controlar el bolc de la volta.

Per tal de no desestabilitzar els transductors de desplaçament s'han posat uns suports que la seva fletxa màxima, havent de suportar només el seu pes propi, sigui inferior a 0.1mm.

### 3.2.1 TIPUS DE PERFIL

El perfil escollit ha estat el MEFA STEX 35/35/1.0

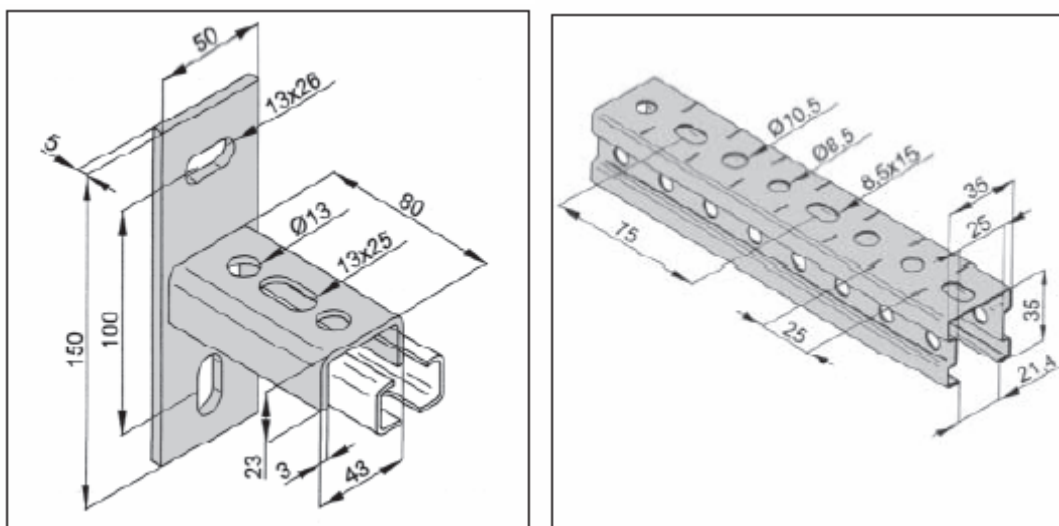


Fig. 28 Esquemes de platina de suport i perfil metàl·lic

#### Dades tècniques

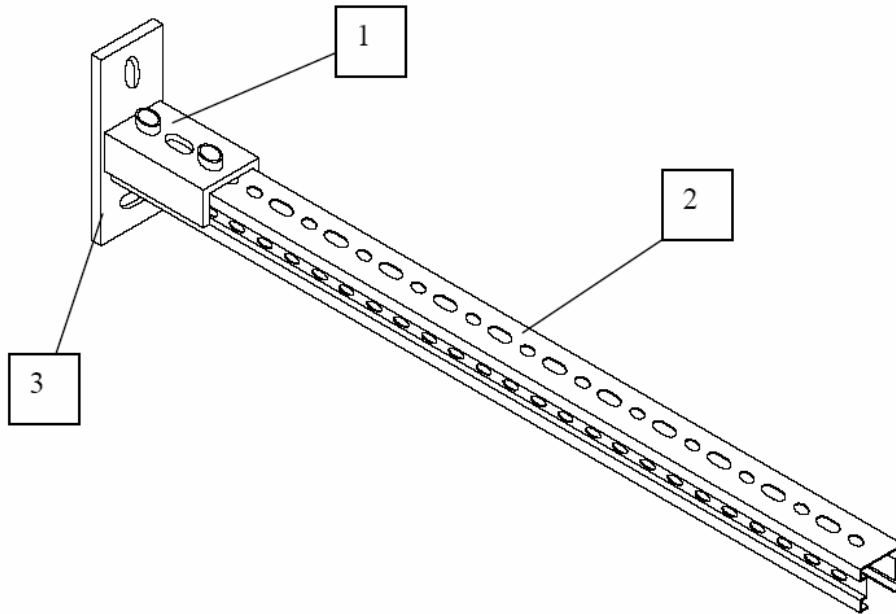
Material: Acer S 250 GD-Z275-N-A, EN 10147

Prot. Corrosió: Cincat al foc en cinta (cincat sendzimir aprox 20µm)

#### Dades geomètriques

Descripció	Longitud (m)	Amplada (mm)	Altura (mm)	Pes (kg/m)
35/35/1.0	2	35	35	0.90

### 3.2.2 ESQUEMA DE MUNTATGE DEL CONJUNT

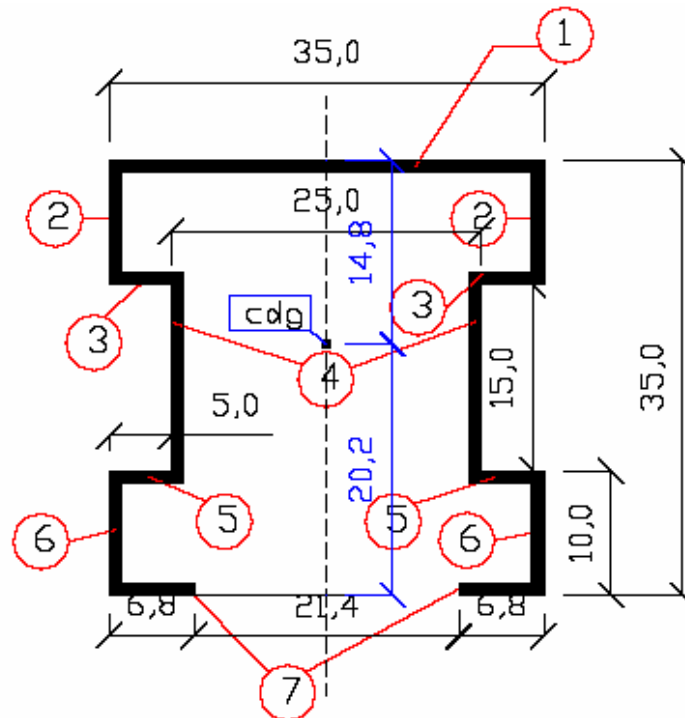


1. Cargol d'unió entre suport i perfil
2. Perfil metàl·lic MefaStex
3. Suport cargolat a la pedra amb perns

### 3.2.3 CÀLCULS DELS SUPORTS

#### Comprovació de la fletxa del suport

Càlcul inèrcia:



1-

$$1/12 \times 3.3 \times (0.1)^3 + 3.3 \times 0.1 \times (1.43)^2 = 0.67528 \text{ cm}^4$$

2-

$$2 \times 1/12 \times 0.1 \times (1)^3 + 2 \times 0.1 \times 1.0 \times (0.98)^2 = 0.20874 \text{ cm}^4$$

3-

$$2 \times 1/12 \times 0.4 \times (0.1)^3 + 2 \times 0.4 \times 0.1 \times (0.53)^2 = 0.02266 \text{ cm}^4$$

4-

$$2 \times 1/12 \times 0.1 \times (1.7)^3 + 2 \times 1.7 \times 0.1 \times (0.27)^2 = 0.33200 \text{ cm}^4$$

5-

$$2 \times 1/12 \times 0.4 \times (0.1)^3 + 2 \times 0.4 \times 0.1 \times (1.07)^2 = 0.09200 \text{ cm}^4$$

6-

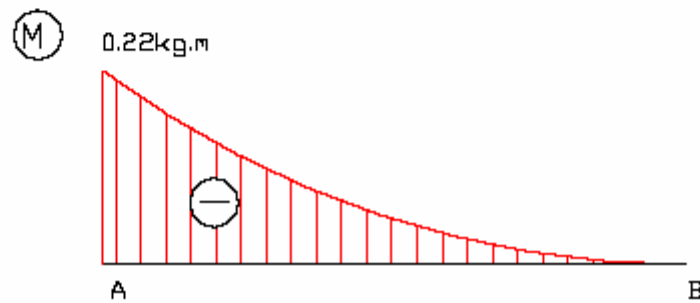
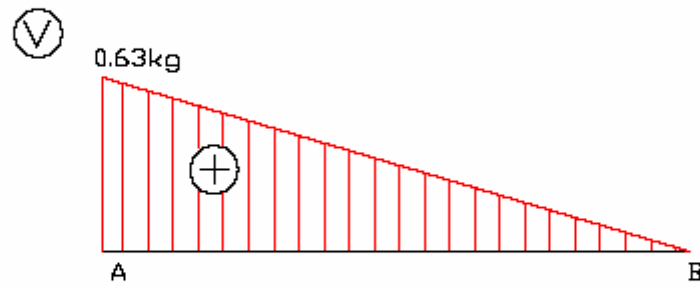
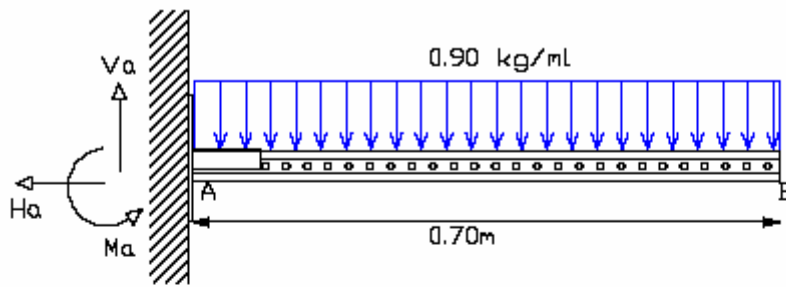
$$2 \times 1/12 \times 0.1 \times (1)^3 + 2 \times 0.1 \times 1.0 \times (1.52)^2 = 0.47900 \text{ cm}^4$$

7-

$$2 \times 1/12 \times 0.58 \times (0.1)^3 + 2 \times 0.58 \times 0.1 \times (1.97)^2 = 0.45000 \text{ cm}^4$$

INÈRCIA TOTAL : 2.26 cm<sup>4</sup>

Càlcul de la fletxa (mitjançant el 2n teorema de mohr)





Esforços obtinguts:

$$H_a = 0 \text{ kg}$$

$$V_a = 0.90 \text{ kg/ml} \times 0.70 \text{ m} = 0.63 \text{ Kg}$$

$$M_a = 0.90 \text{ kg/ml} \times 0.70 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} = 0.22 \text{ kg.m}$$

Dades prèvies:

$$\text{Area} = 1/3 L.H$$

$$G_1 = 1/4 L$$

$$I_y = 2.26 \text{ cm}^4$$

$$EI = 2 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2 \times 2.26 \times 10^{-08} \text{ m}^4 = 452 \text{ kg.m}^2$$

Utilitzant el 2n teorema de Mohr:

$$\Delta_{AB} = -1/E \cdot I_x (1/3 \times 0.22 \text{ kg.m} \times 0.70 \text{ m}) \times 3/4 \times 0.70 \text{ m} =$$

$$0.02695 \text{ kg.m}^3 / 452 \text{ kg.m}^2 = 5.96 \times 10^{-05} \text{ m} = 0.056 \text{ mm.}$$

La fletxa total provocada pel pes propi del perfil és de 0.056mm.

Verificació amb suport informàtic (wineva)

Estat de càrregues:

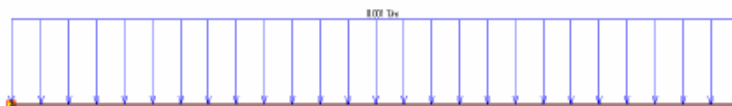
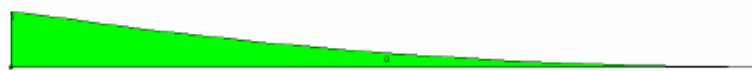


Diagrama de Tallants:



Diagrama de Moments:



Deformada:



Barra 1 A/I\*cm

N1 = 1 N2 = 2 Tipus = 02-Voladís dreta Material = Acer  
 Secció = 0.01 cm<sup>2</sup>  
 Inèrcia = 2.26 cm<sup>4</sup> (0. cm<sup>4</sup>)  
 Mòdul resistent = 0. cm<sup>3</sup> (0. cm<sup>3</sup>)  
 Radi mínim de gir = 15.03 cm (0. cm)  
 Longitud = 0.7 m Pes propi = 0.0 T

HIPÒTESI 1

Accions sobre la barra:

UNIFORME TOTAL (3) 0.001

Moments flectors en mT.

0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

Esforços tallants en T.

0.001 0.001 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

Fletxes parcials en mm:

-0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 -0.01 0. 0.

Fletxa punta = 0.06 mm Fletxa màxima = 0.06 mm (f/L < 1/10000)

Esforç axial = 0. T

### 3.2.4 CÀLCUL DELS PERNS DE SUBJECCIÓ AMB PLATINA

$$F_{\text{pern}} = M / d = 0.22 \text{ kg} \cdot \text{m} / 0.1 \text{ m} = 2.20 \text{ kg}$$

$$T_{\text{pern}} = T / 2 = 0.63 \text{ kg} / 2 = 0.31 \text{ kg}$$

D= distància entre perns

#### Dades perns

## HSA-R M 6x 50\*



#### Datos técnicos

Longitud del anclaje	50 mm
Métrica	M6
Homologaciones / Ensayos	Resistencia al fuego, ETA (Homologación Técnica Europea)
Tipo de fijación	Fijación a través, Colocación previa
Gremios	Cerrajeros Calefactores Electricistas Fontaneros Carpinteros
Composición	Acero inoxidable A4 (AISI 316)
Materiales base	Hormigón no fisurado, Piedra natural, Granito
Información adicional de producto	Para más información consulte nuestro Manual Técnico de Anclajes.
Ancho de llave SW	10 mm
Longitud de rosca	15 mm
Mínima profundidad de empotramiento	40 mm
Par de apriete requerido	5 Nm
Cargas de diseño en hormigón no fisurado	Tracción: 2.4 kN Cortante: 2.8 kN
Información de producto	*Consultar disponibilidad.
Cantidad de embalaje	200
Referencia	HSA-R M 6x 50*
Marca de identificación de la longitud	A
Máximo espesor a fijar	5 mm
Diámetro en placa	7 mm

### 3.3 PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT

Els puntals hidràulics instrumentats són els elements que realitzen les empentes verticals a la prova de càrrega. Són una peça essencial a la prova ja que hauran de ser capaços d'exercir força suficient per descarregar un parell de columnes de pedra.

#### 3.3.1 CONDICIONS DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT

Per a la realització del seu disseny s'ha imposat una sèrie de condicions com son:ç

- Que pugui ser utilitzat en altres aplicacions degut a l'elevat cost
- Haurà de ser de fàcil transport tot i l'elevat pes ja que és totalment desmuntable
- Haurà de tenir desplaçaments inferiors a una dècima de mil·límetre per a cada embolada realitzada, per tal de fer uns increments de pressió a l'arc lents i progressius i mantenir un procés controlat en tota la prova
- Realització del procés de càrrega i descàrrega del sistema de forma manual, per tal de mantenir en tot moment el control. La pressió s'aplica als puntals mitjançant embolades de forma manual en una palanca metàl·lica que injectarà oli a un pistó. Per a la realització del procés de descàrrega, s'obriran les vàlvules dels puntals hidràulics propiciant que l'oli abandoni de forma lenta el puntal i es desplaci fins a l'unitat de pressió. D'aquesta manera el retorn a la seva posició inicial es realitzarà d'una forma lenta, gradual i controlada

#### 3.3.2 PARTS DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT

Les diferents parts dels puntals són:

- Contacte inferior: Placa de de distribució articulada sobre un dels dos plans principals amb el que recolza el terra. Aquesta es connecta al pistó hidràulic mitjançant un passador
- Pistó hidràulic: Element que permetrà realitzar els desplaçaments verticals del conjunt i que conté les connexions al grup de pressió i als dispositius de lectura
- Sistema d'ajust: Element format per un cilindre buit roscat, dins el qual circularà una peça connectada al pistó. Aquest disposarà d'una rosca inversa per tal d'ajustar l'estructura al hissar
- Tub central: Tub de secció circular i directriu recta, la missió del qual és posar en contacte el sistema d'ajust amb la ròtula superior



- Ròtula superior: Element que té com a funció evitar la transmissió de moment al sistema permetent els girs en totes direccions i es vincula superiorment al sistema de fixació
- Sistema de fixació: Peça que connecta el puntal hidràulic amb l'element a desplaçar
- Unitat de pressió: Sistema independent al puntal hidràulic. Aquest està format per un dipòsit d'oli damunt del qual hi haurà una bomba manual que injectarà oli al pistó mitjançant embolades. Hi hauran dues unitats de pressió, cadescuna impulsarà dos puntals hidràulics.

Mitjançant els dispositius de lectura situats al llistó, podrem saber en cada moment la càrrega que suporten els puntals.

### 3.3.3 ESQUEMA DEL PUNTAL HIDRÀULIC INSTRUMENTAT

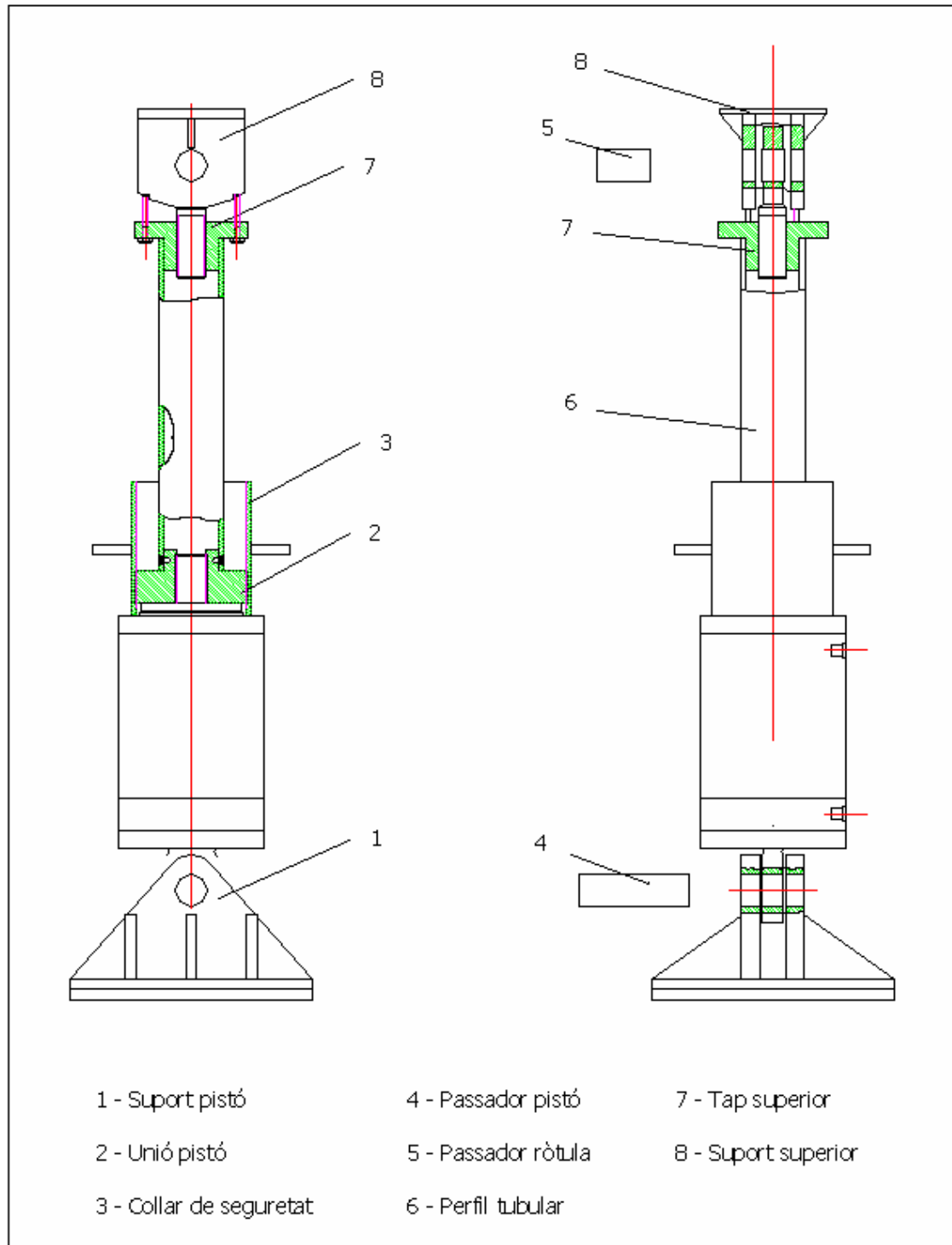


Fig.29 Esquema de definició dels puntals hidràulics instrumentats

### 3.4 PUNTALS SECUNDARIS

Puntals secundaris formats per perfils quadrats metàl·lics buits de 100x100mm, amb un gruix de 5mm, que es situa en la part oposada dels puntals hidràulics. El sistema d'anivellament amb els suports està format per placa i contraplaca de 250x250x8mm i reforçades amb carteles. La unió amb els xindris es realitza amb una placa metàl·lica de 150x150x5mm.

En cada un dels puntals secundaris s'hi adhireixen dues galgues extensomètriques per tal de controlar les deformacions en la seva part exterior que dona al pati del claustre i en la part interior que dona la volta de canó.

#### 3.4.1 ESQUEMA PUNTAL SECUNDARI

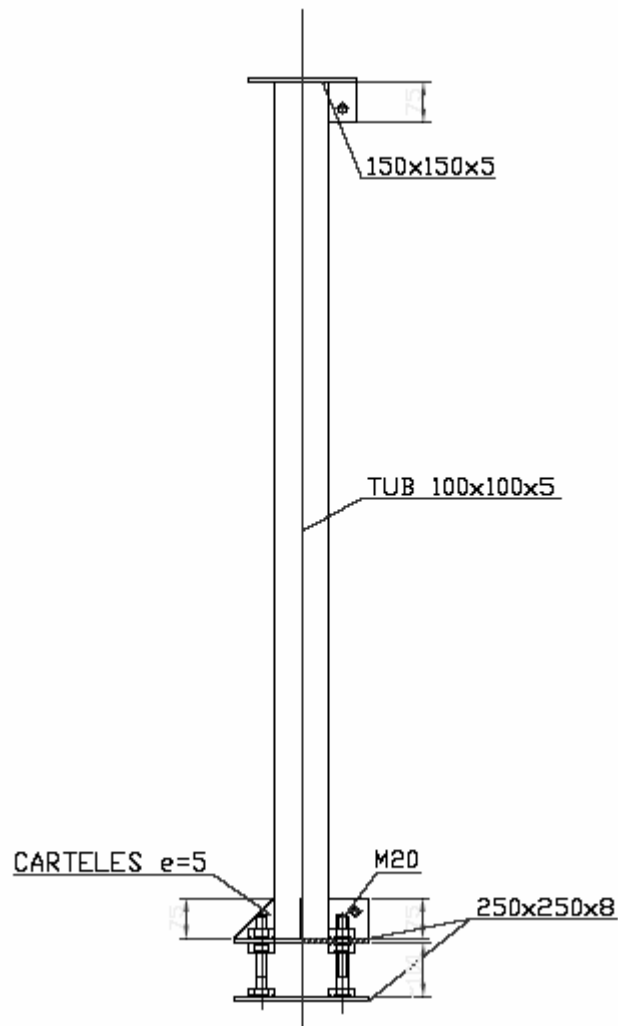


Fig. 30 Esquema de definició del puntal secundari



Aquest element es disposa en la part de l'arc oposada a la que es troben les columnes sobre les que es du a terme l'assaig. Estan formats per perfils fixats a un sistema d'anivellament format per placa i contraplaca.

La connexió amb el xindri s'efectua de la mateixa manera que el puntal instrumentat

### **Contacte inferior**

El puntal recolza amb el terra a través d'una placa de distribució. Aquesta tindrà un sistema de contraplaca amb una famella i una contrafamella, per poder ajustar l'alçada del puntal i per poder posar i treure.

### **Sistema de fixació**

Aquesta peça es connecta a l'element a desplaçar. Si aquest element es pla, la connexió generalment es produirà de forma directa: en casos com el que es dona aquest projecte, el contacte es produirà a través d'un element intermedi.

La platina superior d'aquest dispositiu, presenta uns trepants. Mitjançant cargols o medis semblants, es pot fixar al element assejat.

### **Sistema de riostrament**

S'han deixat dos orelles al mateix costat del puntal, per si calgués un arriostament

### **Instrumentació dels puntals secundaris**

A través de la instrumentació dels puntals secundaris, es podrà establir si hi ha una migració de la càrrega cap a ells en el moment del test.

L'adquisició de dades en aquests elements permetrà una comprensió completa del fonómen tenso-deformacional observat.

### 3.4.2 CÀLCULS DEL DISSENY DEL PUNTAL SECUNDARI

#### Pilar

SOL·LICITACIÓ: 5000 kg (compressió)

MATERIAL EMPRAT:

$\sigma_u = 4200 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_y = 2600 \text{ kg/cm}^2$

Desde la base del pilar fins a la part superior del capitell hi ha una distància aproximada de 1.56m. Per tant es calcularà el perfil tubular del puntal amb aquesta alçada màxima, tot i que es sap que no tindrà l'alçada total, amb un coeficient de majoració de les càrregues de  $\gamma_f=1.33$ , segons la norma.

S'ha decidit usar un perfil tubular quadrat per la seva facilitat en practicar-hi soldadures.

Per evitar el vinclament del pilar usarem un perfil tubular quadrat com a mínim del 50.3:

$$I_x = 19 \text{ cm}^4$$

$$A = 5.33 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = N^* / A = 5000 \cdot 1.33 / 5.33 = 1248 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_u = 2600 \text{ kg/cm}^2 \text{ OK}$$

Comprovació a pandeig:

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{19}{5.33}} = 1.89 \text{ cm}$$

Longitud de pandeig:  $L_p = \beta \cdot L_r = 1 \cdot 1.56 \text{ m} = 1.56 \text{ m}$  ; Barra biarticulada  $\beta=1$

$$\lambda = \frac{L_p}{i} = \frac{156 \text{ cm}}{1.89 \text{ cm}} = 82.54 \quad \omega = 1.57$$

$$\sigma^* = \frac{5000 \text{ kg} \cdot 1.6 \cdot 1.57}{5.33 \text{ cm}^2} = 1253 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_u = 2600 \text{ kg/cm}^2 \text{ OK, COMPLEIX}$$

## Cargols

SOL·LICITACIÓ:  $5000/4 = 1125 \text{ kg}$  (compressió)

MATERIAL EMPRAT: cargols ordinaris

$$\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varphi_{\text{CANYA}} = \sqrt{5 \cdot e} - 0.2 = \sqrt{5 \cdot} - 0.2$$

$$\sigma^* = \frac{1125 \text{ kg} \cdot 1.6 \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \leq 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$D > 10 \text{ mm}$

Amb cargols T 20x80,A8t de diàmetre interior de 16.93mm ja complim

Tornillo Tipo	Vástago					Cabeza				Diámetro del agujero $a$ mm	Area neta del núcleo $A_n$ $\text{cm}^2$	Area resistente $A_r$ $\text{cm}^2$
	Diámetro de la caña $d$ mm	Diámetro interior $d_1$ mm	Longitud rosca $b$ mm	Longitud de la salida $x$ mm	Longitud del chaflán $z$ mm	Espesor $k$ mm	Medida entre caras $s$ mm	Medida entre aristas $e$ mm	Radio del acuerdo $r$ mm			
T 10	10	8,160	17,5	2,5	1,7	7	17	19,6	0,5	11	0,523	0,580
T 12	12	9,853	19,5	2,5	2	8	19	21,9	1	13	0,762	0,843
T 16	16	13,546	23	3	2,5	10	24	27,7	1	17	1,44	1,57
T 20	20	16,933	25	4	3	13	30	34,6	1	21	2,25	2,75
(T 22)	22	18,933	28	4	3,3	14	32	36,9	1	23	2,82	3,03
T 24	24	20,319	29,5	4,5	4	15	36	41,6	1	25	3,24	3,53
(T 27)	27	23,319	32,5	4,5	4	17	41	47,3	1	28	4,27	4,56
T 30	30	25,706	35	5	5	19	46	53,1	1	31	5,19	5,61
(T 33)	33	28,706	38	5	5	21	50	57,7	1	34	6,47	6,94
T 36	36	31,093	40	6	6	23	55	63,5	1	37	7,59	8,17

Ara s'han de calcular els cargols per vinclament; es suposarà que la longitud de vinclament sigui d'uns 5cm; per permetre tenir espai suficient per poder situar i treballar amb la clau per collar les famelles.

Longitud de vinclament  $L_p = \beta \cdot L_r = 2.5\text{cm}$  barra empotrada-empotrada  $\beta=0.5$

$$I_x = \frac{\pi \cdot d_i^4}{64} = \frac{\pi \cdot 1.693^4 \text{ cm}}{64} = 0.403 \text{ cm}^4$$

$$A_r = 2.75 \text{ cm}^2$$

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{0.403}{2.75}} = 0.383 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_p}{i} = \frac{2.5 \text{ cm}}{0.383 \text{ cm}} = 6.53 \Rightarrow \omega = 1.02$$

$$\sigma^* = \frac{1250 \text{ kg} \cdot 1.6 \cdot 1.02}{2.75 \text{ cm}^2} = 742 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_u = 2400 \text{ kg/cm}^2 \text{ OK, COMPLEIX}$$

Els forats per cargols ordinaris de 20mm seran de  $\varnothing=21\text{mm}$

### Placa d'ancoratge

Segons la norma les disposicions constructives de les unions cargolades:

Valor mínim:

- Canto frontal  $e_1 > 2.0 \text{ da} = 2 \cdot 21 = 42\text{mm}$
- Canto lateral  $e_2 > 1.5 \text{ da} = 31.50\text{mm}$

Valor màxim

- A qualsevol canto  $e < 3 \text{ da} = 63\text{mm}$
- $e < 6t$

On  $da$  és el diàmetre dels forats i  $t$  es l'espessor mínim

Tenint en compte tots aquests valors es col·locaran els forats de 50mm (42,31.5<50<63) de tots els cantells, per facilitar la seva execució.

Per determinar la distància dels forats amb la peça tubular perpendicularment soldada a la placa d'ancoratge es tindrà en compte que les famelles tenen una distància entre arestes de  $e=34.6\text{mm}$  i s'ha de deixar espai per la col·locació de la clau. Es deixarà un espai de 25mm.

La placa quedarà així

Placa 250x250x8 mm

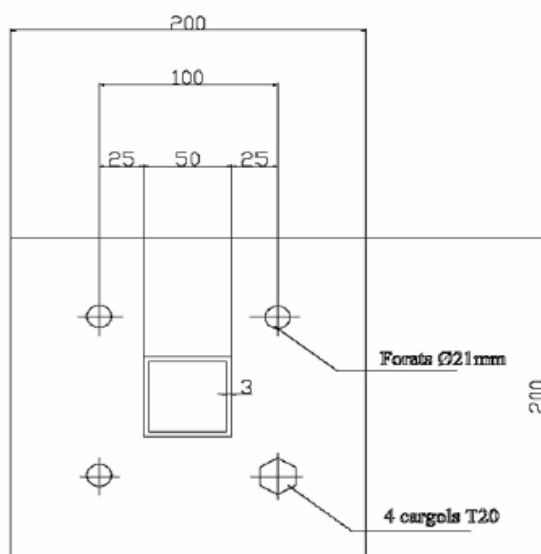


Fig. 31 Esquema de la placa

Per calcular la secció (t) mínima de la placa d'ancoratge inferior s'ha fet amb un programa d'elements finits: el Risa 3D

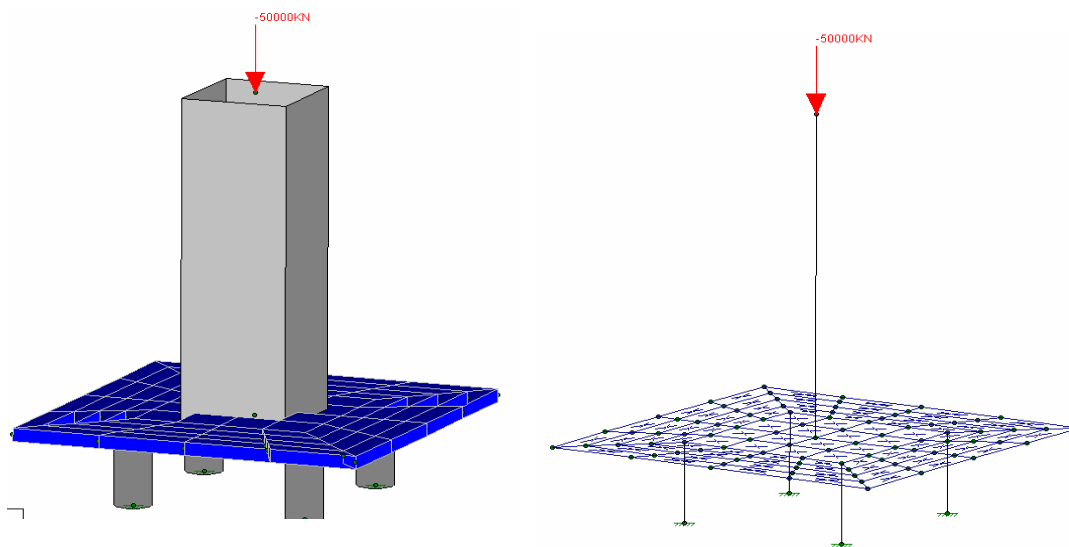


Fig. 32 Esquemes amb model RISA 3D d'una placa de 8mm

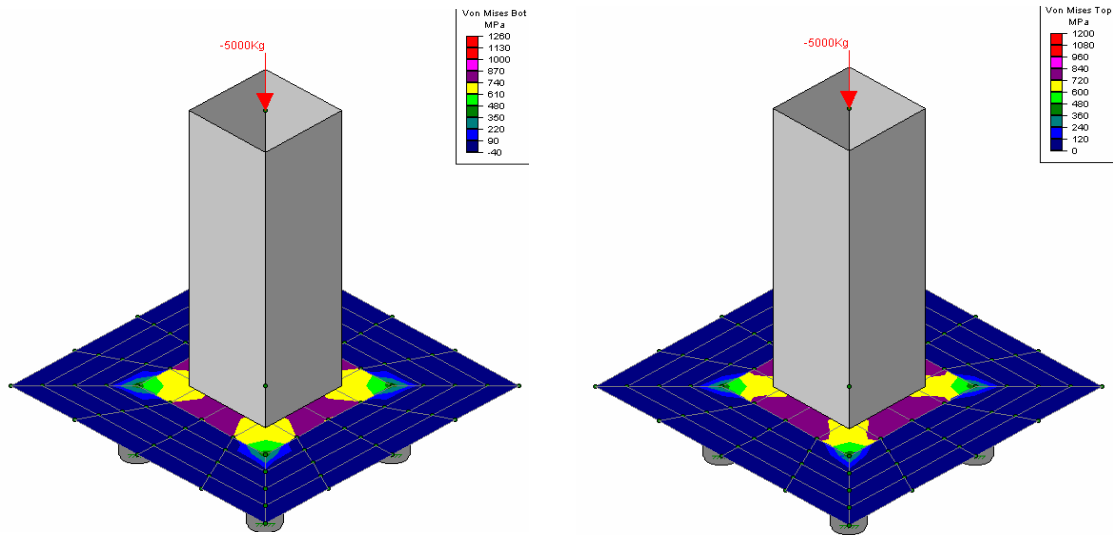


Fig. 33 Esquemes de màxims i mínims respectivament

Es pot observar que amb una placa de 200x200x8mm és suficient per suportar els esforços.

Com a placa superior, es col·locarà la placa mínima indispensable, per exemple 100x100x5.

Així la disposició constructiva seria aquesta:

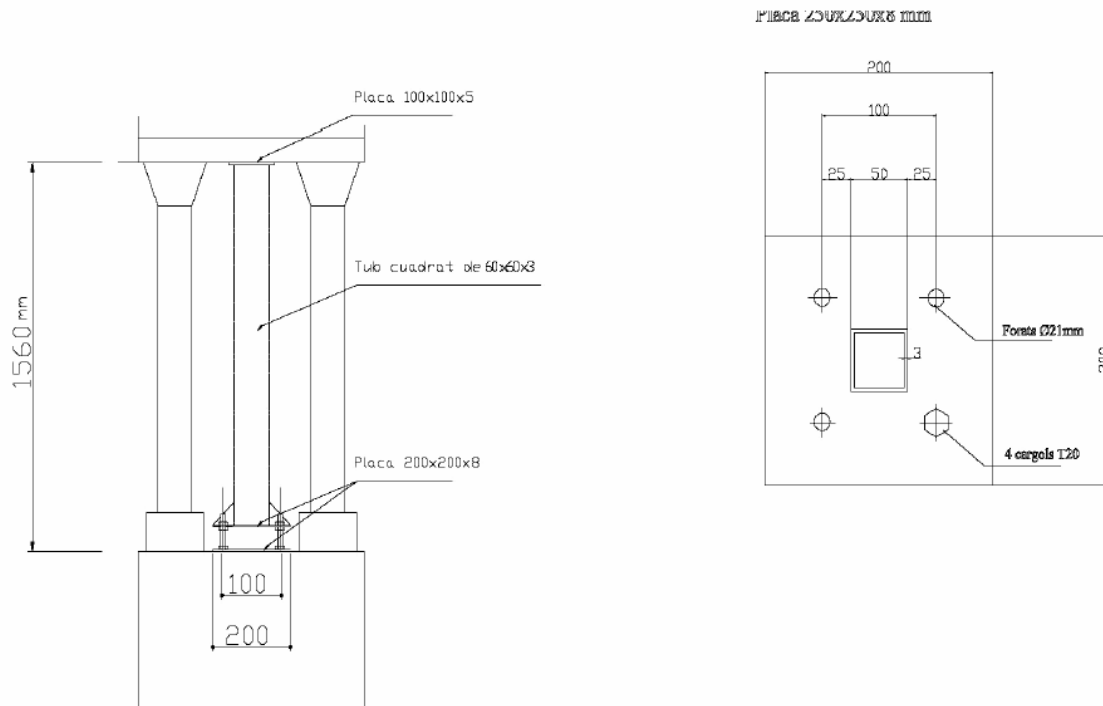


Fig.34 Esquemes de muntatge

Per assegurar que el puntal no vinclarà, es col·locarà un perfil tubular de 100.5. Fet que farà variar les dimensions de la placa inferior si es vol conservar les condicions que s'havien tingut en compte per a la disposició dels cargols.

Valor mínim:

- Canto frontal  $e_1 > 2.0 d_a = 2 \cdot 21 = 42\text{mm}$
- Canto lateral  $e_2 > 1.5 d_a = 31.50\text{mm}$

Valor màxim

- A qualsevol canto  $e < 3 d_a = 63\text{mm}$
- $e < 6t$

Tenint en compte tots aquests valors es col·locaran els forats a 50mm ( $42,31.5 < 50 < 63$ ) de tots els cantells, per facilitar la seva execució.

Per determinar la distància dels forats amb la peça tubular perpendicularment soldada a la placa d'ancoratge es tindrà en compte que les famelles tinguin una distància entre arestes de  $e=34.6\text{mm}$  i s'haurà de deixar espai per la col·locació de la clau. Es deixarà un espai de 25mm.

Ara la placa d'ancoratge inferior quedarà així:

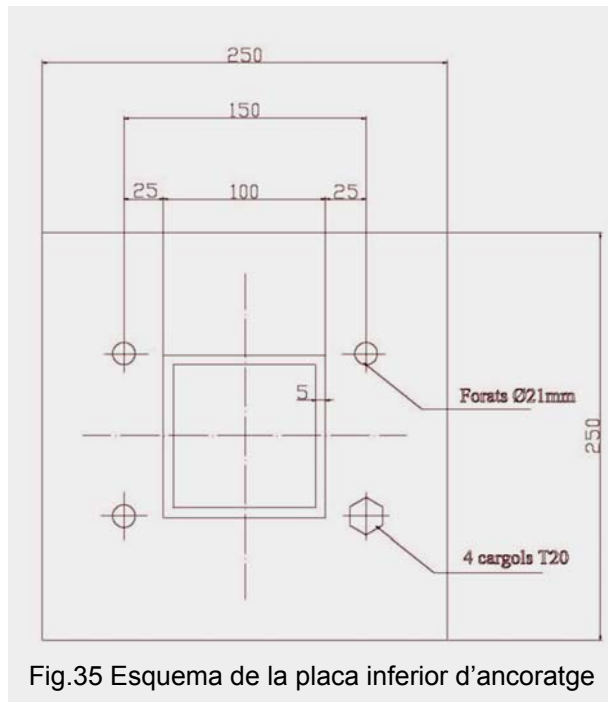
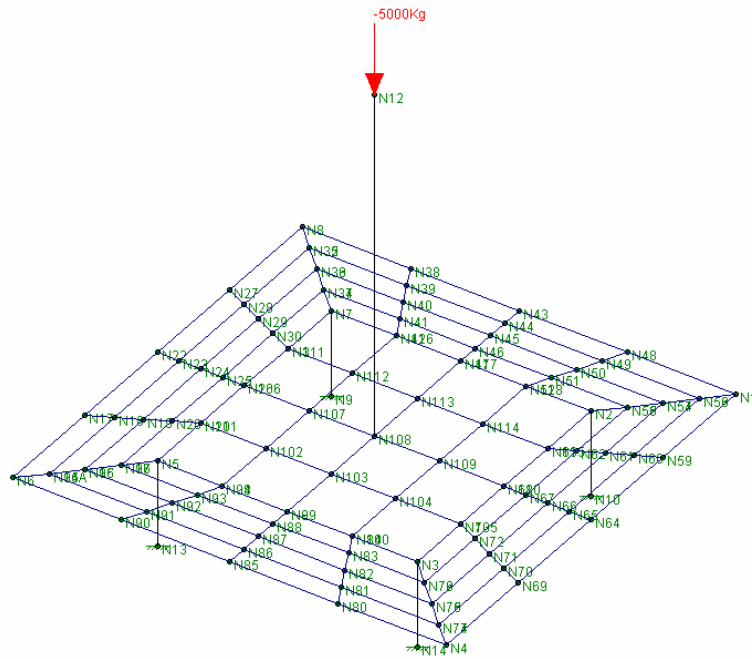


Fig.35 Esquema de la placa inferior d'ancoratge

Si es recalcula l'espessor de la placa amb les noves dimensions s'otbé:



Joint Label	X [Kg]	Y [Kg]	Z [Kg]	MX [KN...	MY [KN...	MZ [KN...
N13	999.55	2000	-999.55	-0.154	0	-0.154
N9	999.55	2000	999.55	0.154	0	-0.154
N14	-999.55	2000	-999.55	-0.154	0	0.154
N10	-999.55	2000	999.55	0.154	0	0.154
Totals:	0	8000	0			
COG (M):	X: 0.125	Y: 0.2	Z: 0.125			

Fig. 36 Resultats de l'espessor de la placa

Per tant amb uan placa de 250x250x8mm és suficient ja que està per sota de la tensió admissible ( $\sigma_u = 2600 \text{kg/cm}^2$ )



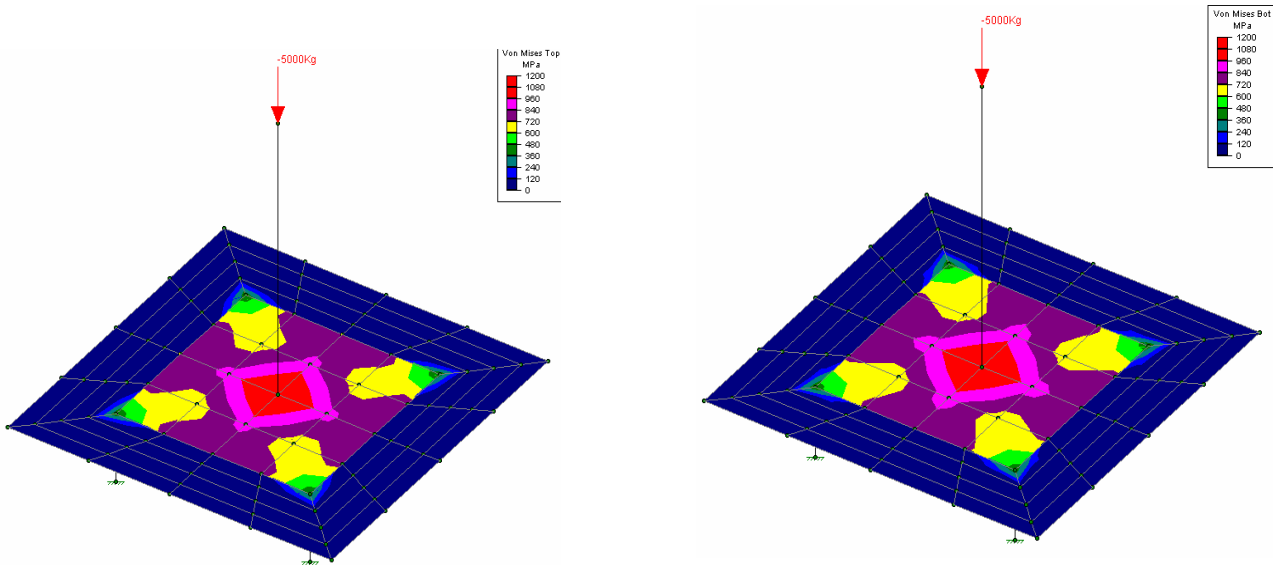
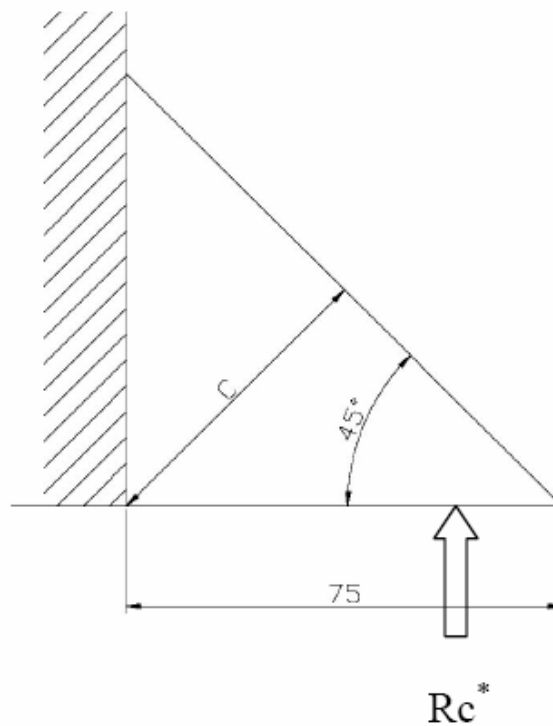


Fig.37 Esquemes de màxims i mínims

La placa superior ara haurà de ser de 125x125x5mm.

### Carteles

Per assegurar l'estabilitat del pilar, encara que no caldria, es col·locaran unes carteles de 50mm d'espessor.



$$C = (75/2) / \sin 45 = 53 \text{ mm}$$

Si es suposa que cada cartela aguanti  $R_c^* = 1250 \text{ kg} \times 1.33 = 1662.5 \text{ kg}$ , el moment d'esgotament de la cartela serà:

$$M_p = t_c \cdot c^2 \cdot \sigma_u / 4 = 0.5 \cdot 5.3^2 \cdot 2600 / 4 = 9130 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

On  $t_c$  és l'espessor de la cartela

$$\bar{\lambda} = 0.0283 \cdot \frac{c}{t_c} = 0.0283 \cdot \frac{5.3}{0.5} = 0.3$$

$$C_E = 0.14 \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot -1.07 \cdot \bar{\lambda} + 2.3 \approx 2 \text{ cm}$$

Com que es compleix:

$$R_c \cdot d_c < C_E \cdot M_p$$

On  $d_c$  és la distància perpendicular del centre al punt d'aplicació de  $R_c$

$$1662.5 \cdot 7.5 = 12468 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 < 2 \cdot 9130 = 18260 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \text{ COMPLEIX}$$

**Soldadura horitzontal**

Component horitzontal:

$$T_c = \frac{R_c \cdot 75\text{mm}}{75\text{mm}} = R_c = 1662.5\text{kg}$$

Segons la formulació de la norma, la secció de la gorja serà:

$$2a = \frac{F}{0.75 \cdot \sigma_u \cdot L} = \frac{1662.5\text{kg}}{0.75 \cdot 2600\text{kg/cm}^2 \cdot 7.5\text{cm}} \rightarrow a = 2.2\text{cm} \approx 3\text{mm}$$

Es disposaran cordons de 3mm de secció de gorja a cada costat de la cartela.

Pels cordons verticals també s'usaran cordons de 3mm de gorja.

*Disseny i càlculs realitzats per Narcís Serra en la realització del seu projecte*

### 3.5 XINDRI METÀL·LIC

Element metàl·lic que es troba als arcs situats entre parells de columnes que tindran com a funció transmetre la càrrega que reben els arcs, cap els puntals hidràulics i d'aquesta manera realitzar les mesures.

Els dos xindris s'han dissenyat específicament per a la prova de càrrega. D'aquesta manera els dos també seran diferents ja que les llums dels arcs de pedra entre ells son diferents.

Els xindris estan formats per 4 peces diferents fet que facilita el transport i el muntatge. Les diferents peces són:

- 2 arcs complets on a la part central s'hi troba una obertura triangular amb platines perpendiculars per a poder realitzar el muntatge
- 2 platines metàl·liques quadrades que mitjançant una unió cargolada amb les platines dels arcs permetran la fixació i el comportament solidari entre les diferents peces

Degut a errors de disseny, no s'ha tingut en compte que els arcs de pedra no descriuen un semicercle perfecte. D'aquesta manera els xindris metàl·lics no entren en contacte directe amb l'arc de pedra. Per solucionar-ho, s'ha optat per emplenar la junta del xindri metàl·lic amb l'arc de pedra amb morter expansiu, que garantirà un contacte permanent i una correcta transmissió de càrregues.

## 4. DESCRIPCIÓ DE LA PROVA

### 4.1 PROCÉS DE MUNTATGE

1. Col·locació de suport de fusta amb els puntals per al muntatge dels xindris metàl·lics



2. Col·locació dels 2 xindris metàl·lics sobre els suports



3. Per tal d'aconseguir contacte directe entre els xindris i l'arc de pedra, s'ha aplicat morter expansiu amb una protecció plàstica



4. Execució de la base de morter amb plàstic de protecció, on s'hi muntarà el sistema hidràulic



5. Protecció dels capitells amb escuma de poliuretà, posteriorment desestimat degut a la nosa que fan



6a. Instrumentació dels puntals secundaris basada en la col·locació de les galgues extensomètriques



6b. Encolatge de les galgues al puntal secundari



6c. Aspecte final d'una galga instal·lada



7. Col·locació de base de taulers de fusta per a millor repartiment de pes del sistema

8. Muntatge dels 4 puntals hidràulics

8<sup>a</sup>. Neteja de la peça d'unió del pistó



8b. Neteja del collar de seguretat



8c. Col·locació del collar de seguretat



8d. Col·locació del perfil tubular





8e. Col·locació de la rótula



8f. Col·locació del suport superior



8g. Col·locació del suport superior



9. Muntatge dels pilars secundaris instrumentats a través de placa i contraplaca



10. Col·locació del sistema de transductors de desplaçament amb suports horitzontals anclats a la pedra i el sensor muntat a sobre de suports verticals



11. Col·locació del convergencímetre amb suport anclat a la pedra i el sensor de desplaçament



12. Connexió dels 2 èmbols hidràulics per a la impulsió dels 4 puntals



13. Connexió del sistema de processament de dades Vishay 5000 a tots els sensors i galgues de desplaçament



14. Calibració prèvia dels 4 puntals hidràulics i col·locació de la cèl·lula de càrrega abans de la prova



15. Execució de la prova de càrrega



### Incidències durant l'execució

16. Detecció de pèrdues de càrrega del sistema hidràulic degut al possible aire dins del circuit. S'ha optat per purgar els puntals com a possible solució



17. Canvi de suport de fusta de la cèl·lula de càrrega ja que s'ha estat apunt de trencar durant la prova



18. Persistència del problema de pèrdues de càrrega i un nou purga del sistema hidràulic



19. Execució de les diferents proves de càrrega satisfactoriament



20. Vista general del muntatge



## 4.2 POSADA APUNT DEL SISTEMA

La posada apunt del sistema consistirà en deixar tot el sistema d'adquisició apunt per realitzar la prova de càrrega. Per tant, s'haurà d'examinar que tots els sensors estiguin degudament instal·lats i que donin una senyal correcte.

La posada apunt dels puntals hidràulics consistirà en el seu calibratge a través del programa d'adquisició de dades. S'obriran les aixetes dels èmbols d'impulsió hidràulics que estan connectats als puntals, i tot seguit es farà entrar en càrrega tots i cada un dels 4 puntals per assegurar el contacte directe amb els xindris i així evitar dades falses. Un cop els puntals estiguin en càrrega, de 200kg aproximadament, es procedirà a posar a zero el sistema i executar les proves.



### 4.3 CONDICIONS DE FINALITZACIÓ

El procés de càrrega es realitzarà de forma progressiva, augmentant la llargada dels puntals hidràulics.

La prova finalitzarà immediatament quan es donin alguna de les següents condicions:

- Quan l'allargament de les galgues tendeixi a zero i això impliqui que l'allargament dels puntals hidràulics no comporti cap allargament a les columnes. En aquest punt, la càrrega estarà totalment transmesa als puntals hidràulics
- Quan algun dels testimonis de guix col·locats a la pedra es trenqui. Això voldrà dir que el sistema es mou i es pot posar en perill la seva estabilitat

## 4.4 RESUM DE L'EXECUCIÓ DE LES PROVES

Prèviament a les tres proves de càrrega complertes, i per tal de comprovar l'estabilitat del sistema, s'han fet varies simulacions de càrrega. Aquestes simulacions han consistit en carregar els puntals hidràulics amb 2, 4, 6 i 8 Tn cadascun en intervals de 500kg. D'aquesta manera s'ha pogut comprovar que el sistema respon amb la fiabilitat i que es pot procedir a executar les proves de càrrega complertes.

- A la primera de les tres proves, s'ha optat per incrementar la càrrega dels puntals en intervals de 2Tn. Degut a les pèrdues de càrrega dels puntals hidràulics, s'han anat fent pauses entre embolada i embolada per tal d'estabilitzar el sistema. Per tant, ha resultat la més llarga de les tres. La primera prova ha conclòs sense haver descarregat completament la columna de pedra exterior.
- A la segona prova, els intervals de càrrega s'han mantingut en 2Tn, com a la prova anterior. Però no s'ha esperat a que el sistema s'estabilitzi ja que ha demostrat la seva solidesa i seguretat. Per tant, s'ha arribat a la finalització en menys temps que a la primera. A diferència de la primera, aquí s'ha pogut observar com l'allargament de les galgues ha començat a tendir a zero. Això vol dir que s'ha estat a prop d'una de les condicions de finalització de la prova: la descàrrega total de les columnes de pedra.
- A la tercera i última de les proves s'ha continuat amb el criteri d'intervals de càrrega de 2Tn. Ha resultat la més ràpida de les tres i la més definitiva ja que les galgues extensomètriques han revelat que la columna interior estava totalment descarregada i que l'allargament de les galgues de la columna exterior tendia a zero.

## 4.5 INCIDÈNCIES DURANT L'EXECUCIÓ

Els puntals hidràulics han presentat una pèrdua de càrrega constant al llarg de tota la prova. Aquesta pèrdua és de forma exponencial i consecutiva ja que a mesura que s'augmenta la càrrega les pèrdues son superiors. Aquest problema, que es repeteix a les proves següents, s'ha intentat solucionar purgar varies vegades el sistema per tal d'eliminar possibles residus d'aire dins el circuit hidràulic (veure foto 16), que serien els causants d'aquestes pèrdues. La conclusió és que el problema no era de l'aire dins el circuit sinó en un error de disseny dels puntals.

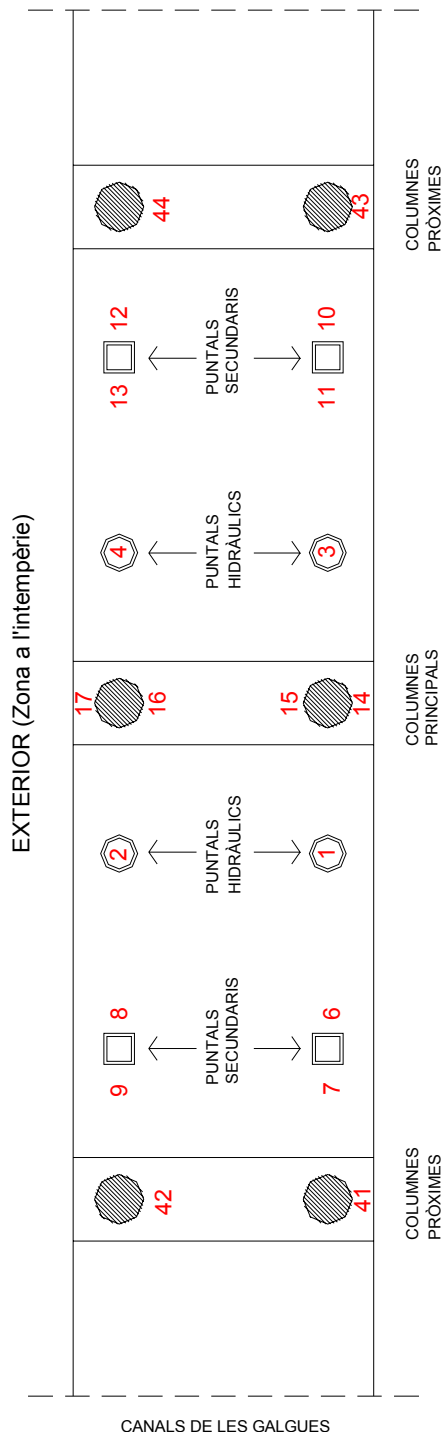
Durant la prova, el sistema s'ha quedat desequilibrat ja que els dos transductors de desplaçament han mostrat lectures diferents. Això significa que les lectures del transductor exterior son diferents a les del transductor interior i assenyala que les columnes interiors i exteriors no s'eleven de manera simètrica, provocant un gir. Quan s'ha cregut que aquesta diferència ha estat massa gran, s'ha optat per impulsar només els puntals hidràulics de la part exterior per tal d'equilibrar el sistema.

## 5. PRESENTACIÓ DE RESULTATS

### 5.1 GRÀFIQUES DE LES PROVES

S'han realitzat 3 proves de càrrega a les columnes del centre de l'ala nord del claustre.

Quadre resum amb l'assignació dels canals:



#### Puntals principals:

Canals 1,2,3 i 4

#### Galgues columnes principals

Canals 14, 15, 16, 17

#### Galgues puntals secundaris

Canals 6,7,8,9,10,11,12 i 13

#### Galgues columnes pròximes

Canals 41,42,43 i 44

#### Transductors de

#### desplaçament interior:

Canal 18

### 5.1.1 GRÀFIQUES: PROVA 1

La primera i més llarga de les tres ha servit de referència per les altres dos.

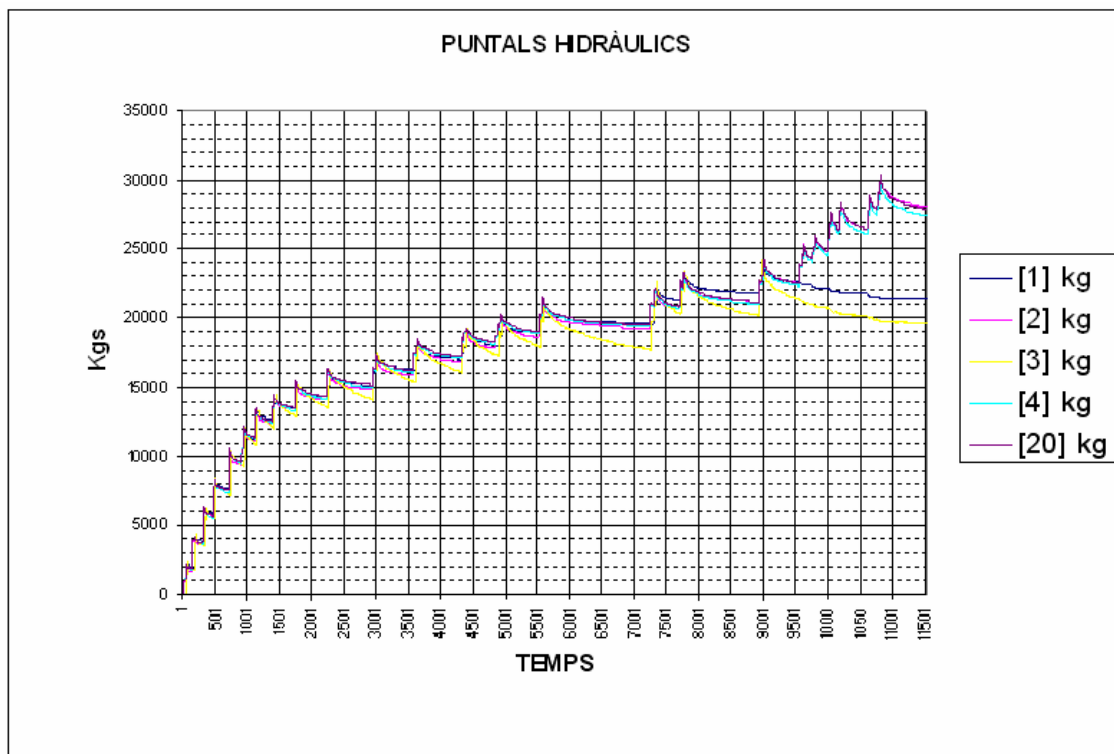
Durada total: 192 minuts

Càrrega puntals hidràulics:

- Exterior: 30 Tn
- Interior: 24 Tn

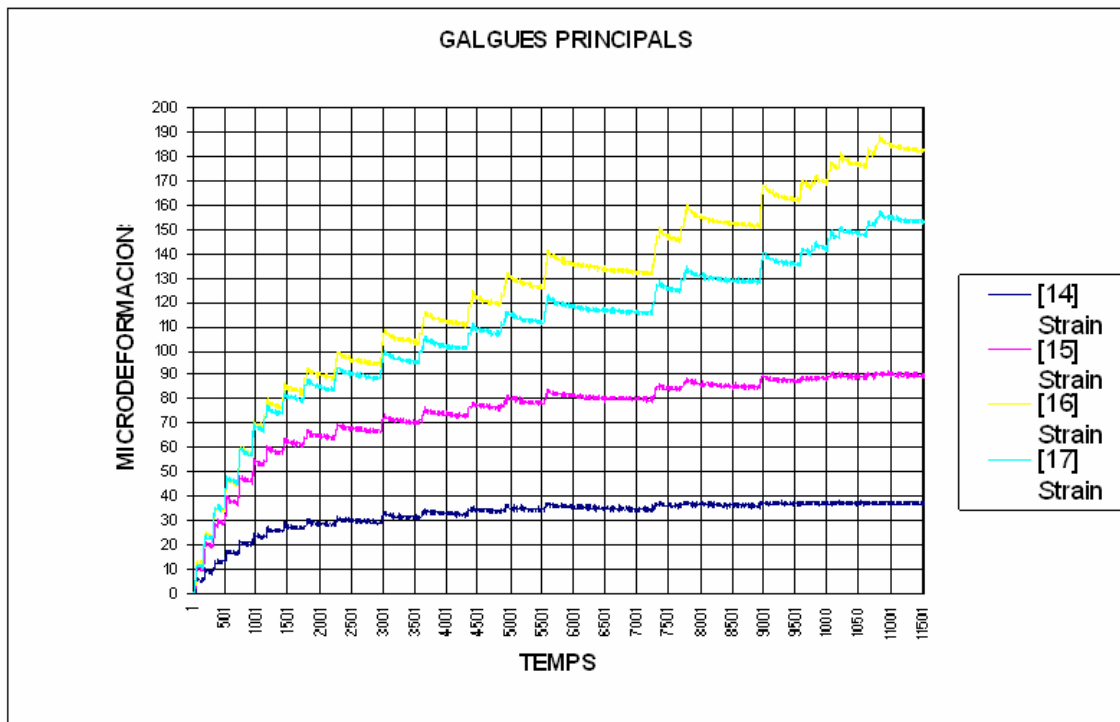
Incrementes de càrrega: intervals de 2 Tn

#### RESUM DE RESULTATS DELS PUNTALS HIDRÀULICS



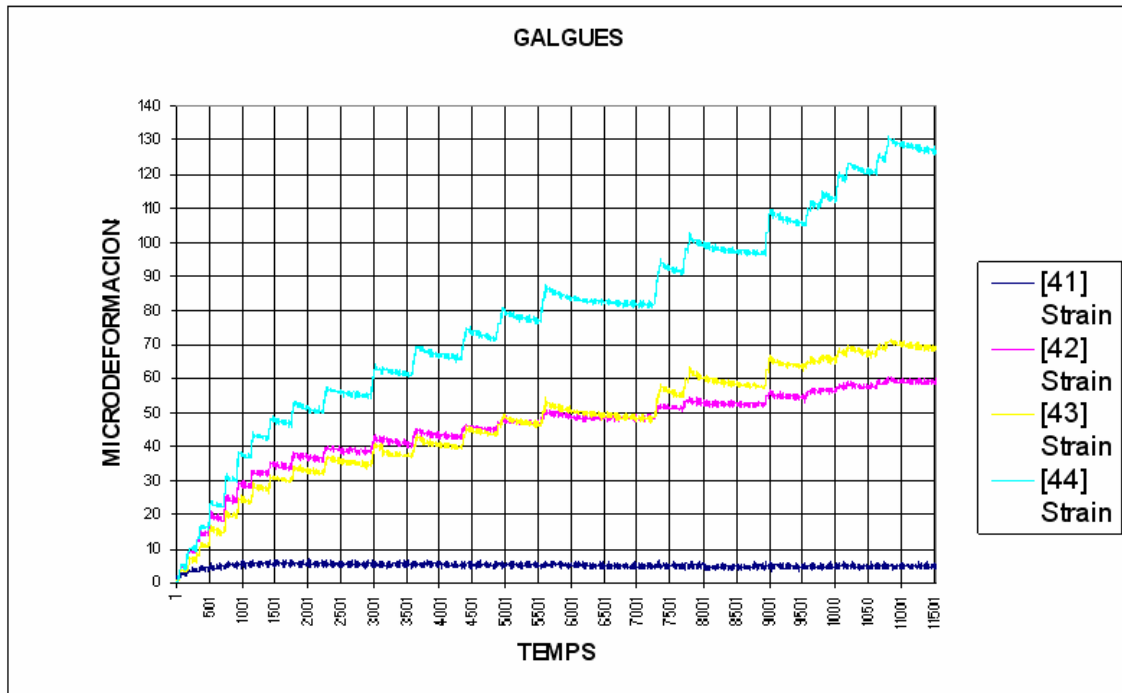
A la següent gràfica es poden observar els diferents estadis de càrrega que han anat adquirint els punts hidràulics i les pèrdues de càrrega instantànies que han patit els punts al llarg de la prova. També es pot observar com els punts 2 i 4, corresponents a la part exterior, han estat els més carregats mentre que l'1 i 3, corresponents a la part interior, han rebut menys càrrega.

**RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES PRINCIPALS**



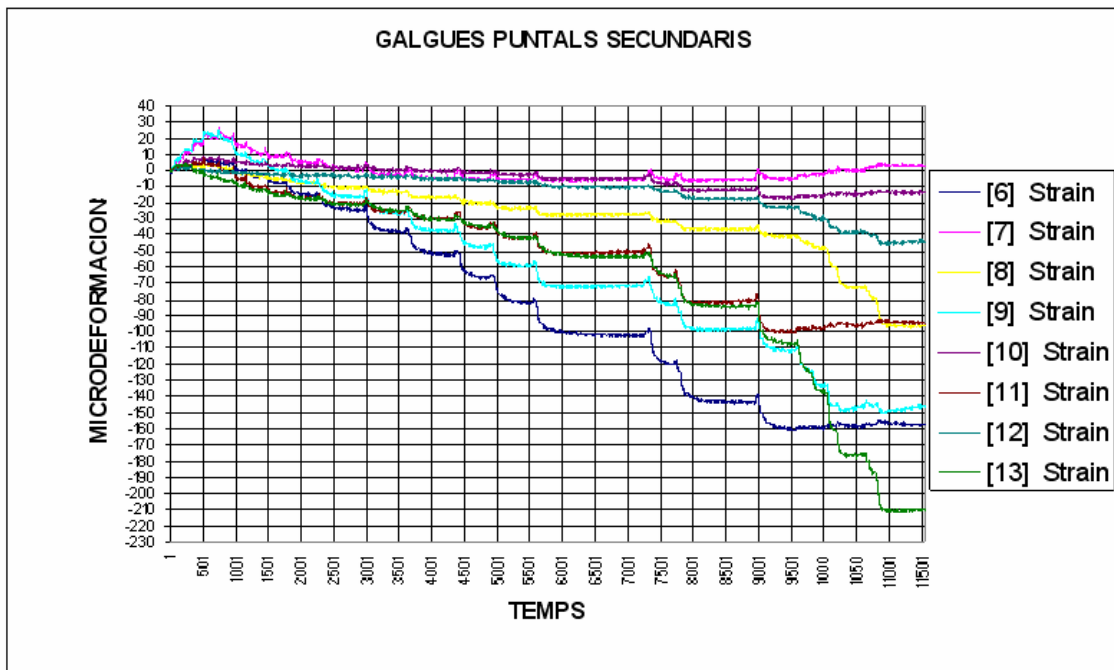
A la següent gràfica es pot observar la progressió de les galgues al llarg de la prova. Es pot deduir com les galgues corresponents als canals 14 i 15, de la columna interior de pedra, tendeixen a zero. Això vol dir que han estat a prop de la descàrrega total. Per contra, les galgues dels canals 16 i 17, corresponents a la columna exterior de pedra, es pot observar com encara han incrementat les seves microdeformacions de manera progressiva.

**RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES DE LES COLUMNES PRÒXIMES**



En la gràfica s’observa la progressió de les galgues durant la realització de la prova. La galga del canal 41 es descarrega completament al poc temps d’iniciar la prova, aleshores es dedueix que és la que rep la menor càrrega de les columnes pròximes a les columnes principals de l’estudi. En la resta de galgues dels canals 42, 43 i 44, es pot observar que segueixen un augment progressiu de les deformacions indicant que al final de la prova encara no s’han descarregat completament.

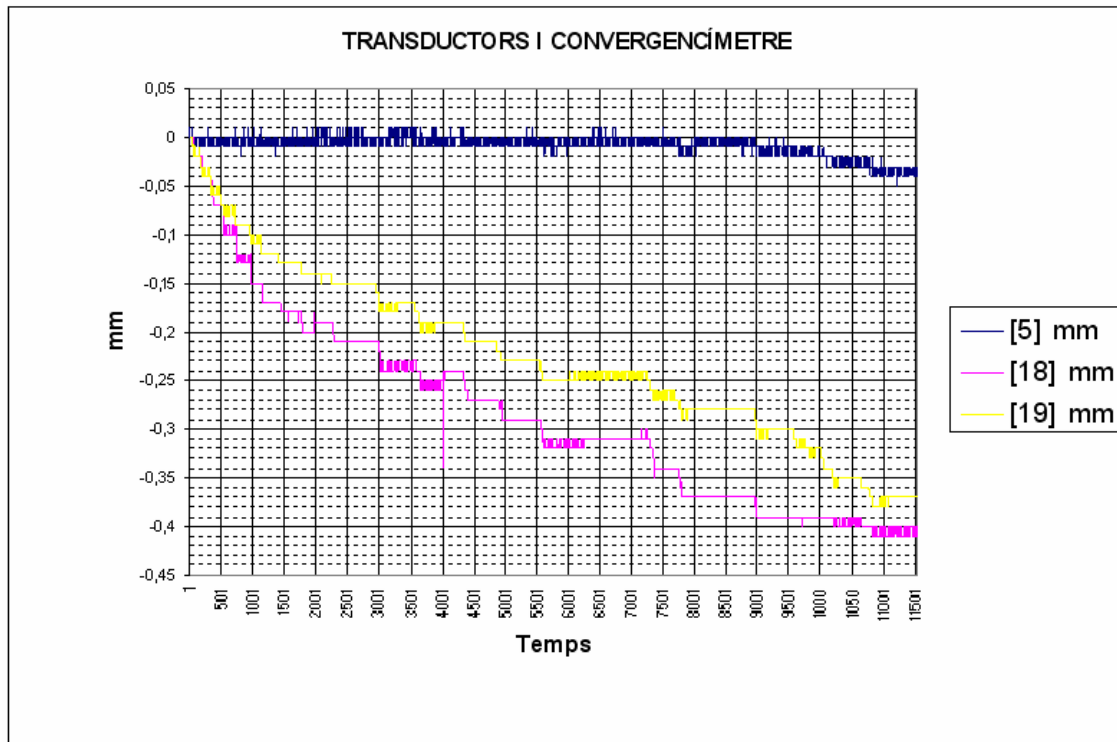
**RESUM DE RESULTATS DELS PUNTALS SECUNDARIS**



La gràfica indica com la càrrega es transmet progressivament en el puntal secundari produint-li deformacions negatives (escurçament). S'hi pot destacar que les galgues on es produeix una major deformació son les corresponents als canals 6, 9 i 13, mentre que les galgues corresponents als canals 7, 10 i 12 son els que es produeix unes deformacions menors. La única conclusió que s'ha pogut extreure, és que les galgues corresponents a la banda més propera a les columnes sotmeses a estudi son les que tenen major deformació.



## RESUM DE RESULTATS DELS TRANSDUCTORS I EL CONVERGENCÍMETRE



En aquest gràfic es pot observar com el convergencímetre corresponent al canal 5 s'ha conservat constant durant la prova excepte el tram final, en el que hi ha una petita desviació causada per la empenta produïda als puntals hidràulics, empenta causada per equilibrar el sistema.

Aquesta maniobra s'ha realitzat ja que els transductors de desplaçament indicaven lectures diferents. Per tant es pot observar a la gràfica com la lectura dels dos transductors tendeix a igualar-se tal i com indiquen els canals 18 i 19.

## 5.1.2 GRÀFIQUES: PROVA 2

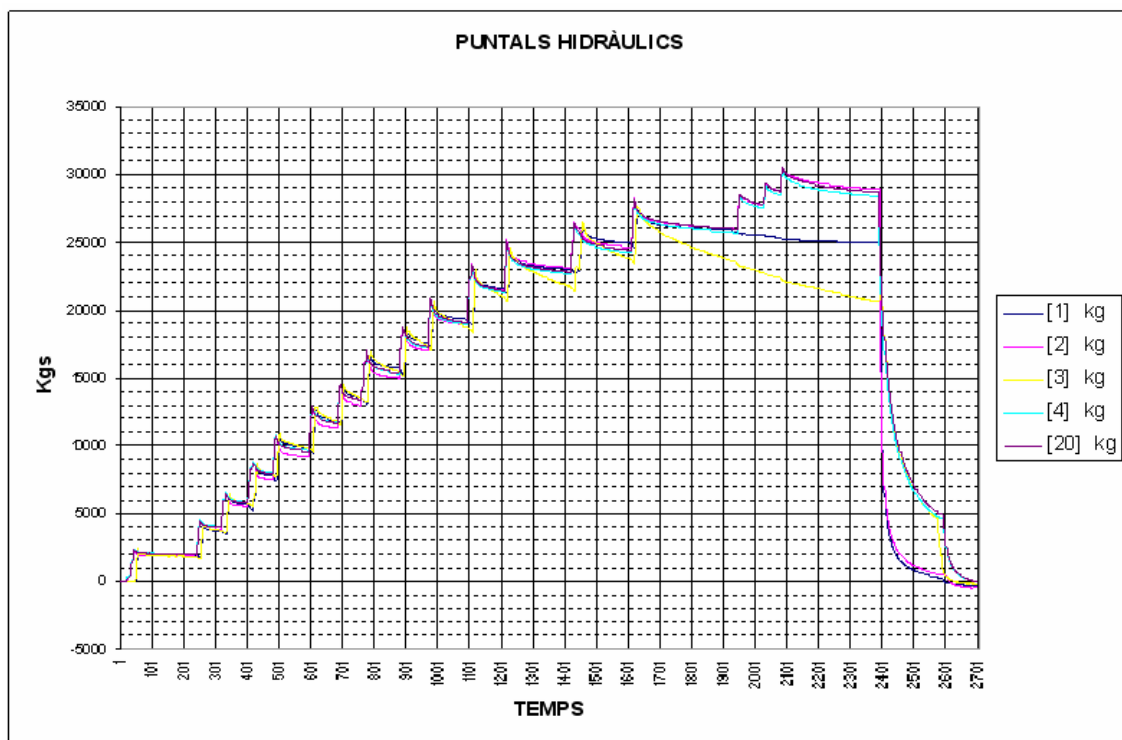
Durada total: 45 minuts

Càrrega puntals hidràulics:

- Exteriors: 30.5 Tn
- Interiors: 28 Tn

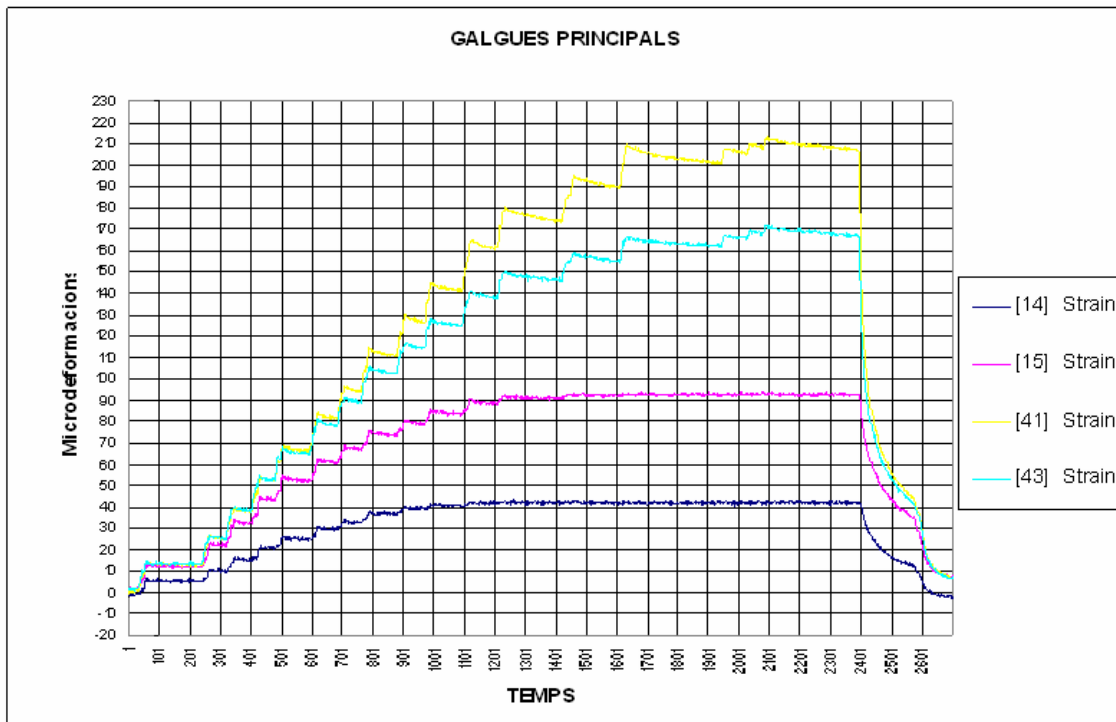
Incrementos de càrrega: intervals de 2 Tn

### RESUM DE RESULTATS DELS PUNTALS HIDRÀULICS



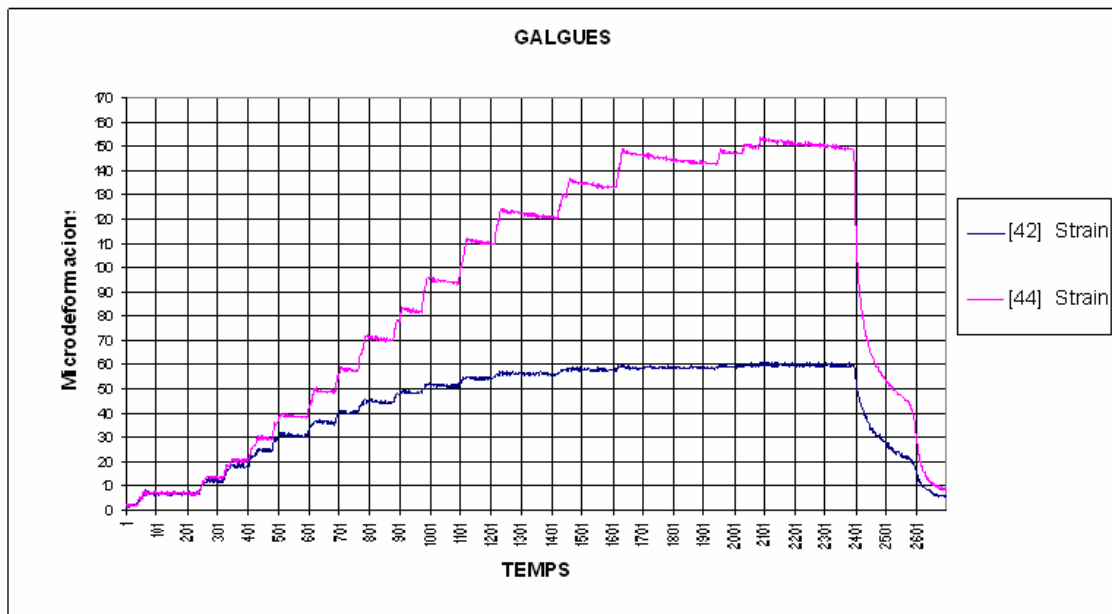
A la següent gràfica es pot observar com les pèrdues de càrrega dels puntals hidràulics han persistit i alhora també s'ha repetit el comportament dels puntals hidràulics. Els exteriors (2 i 4) han rebut més càrrega que als interiors (1 i 3).

**RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES PRINCIPALS**



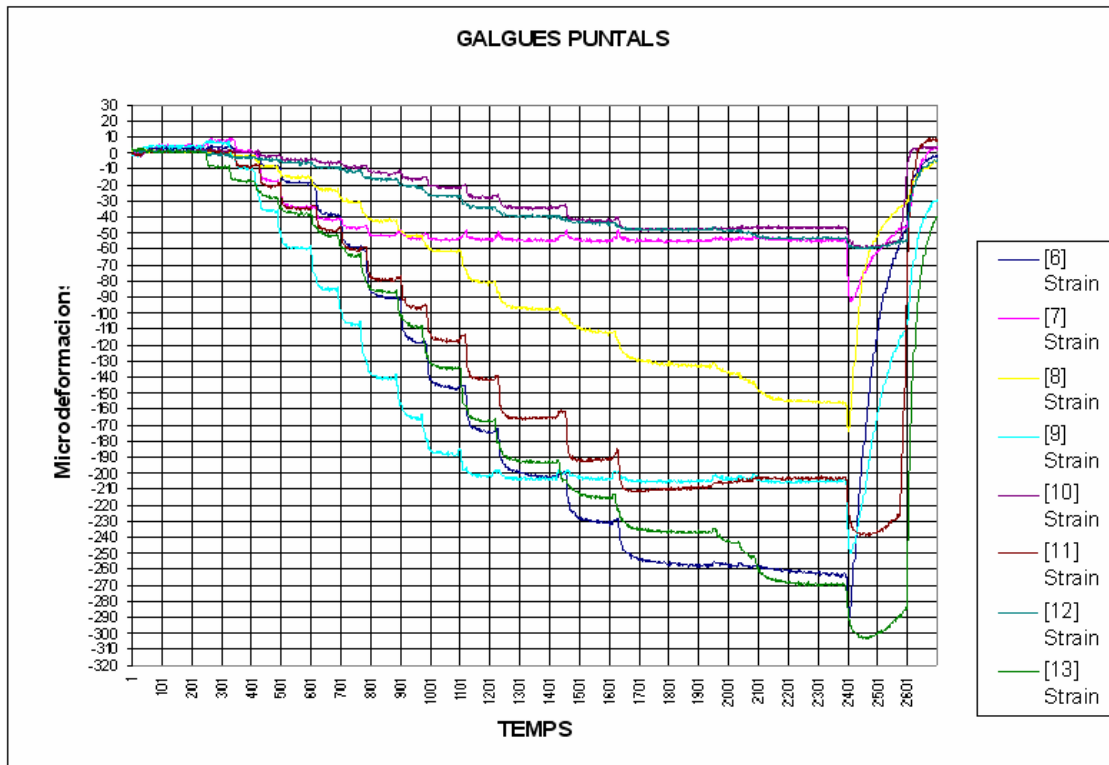
A la gràfica de les galgues principals, es pot observar com les galgues 14 i 15, corresponents a la columna de pedra interior, es mantenen constants. Per tant no augmenten les microdeformacions de la columna i es dedueix que està completament descarregada. Mentre que les galgues 41 i 43 s’observa com l’increment de les microdeformacions és mínim però sense arribar a ser zero. Demostrant així que la columna exterior de pedra no està completament descarregada.

## RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES DE LES COLUMNES PRÒXIMES



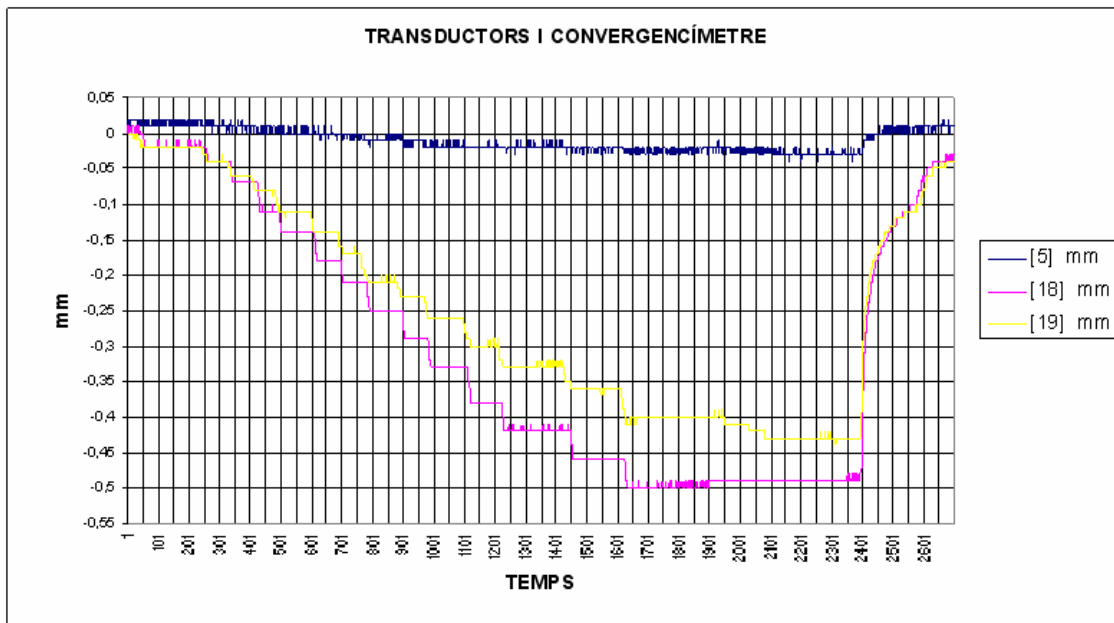
En aquesta segona prova i degut a problemes tècnics, s'han tret els canals corresponents a les galgues de les columnes interiors del claustre per tal de poder connectar les galgues de les columnes principals. Per tant en la lectura d'aquesta prova només es pot fer referència a les dues galgues de les columnes exteriors del claustre. En la gràfica es pot extreure que la galga de la columna corresponent al canal 44 té unes microdeformacions més grans que les del canal 42. Per tant es pot deduir que les càrregues que rep la columna on es produeixen deformacions més grans són majors que les càrregues rebudes a l'altre columna.

## RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES DELS PUNTALS SECUNDARIS



En aquesta gràfica torna a destacar que les galgues corresponents als canals 6, 9 i 13 son les que produeixen una major deformació, mentre que les galgues corresponents als canals 7, 10 i 12 son les que produeixen unes deformacions menors. La conclusió extreta és la mateixa que la prova 1, confirmant-ne i verificant-ne els resultats.

## RESUM DE RESULTATS DEL TRANSDUCTOR I EL CONVERGENCÍMETRE



En aquest gràfic torna a sorgir la desviació entre els transductors interiors i els exteriors, obligant a carregar només els puntals hidràulics corresponents a l'exterior per tal d'equilibrar el sistema. A causa d'aquestes desviacions produïdes als transductors de desplaçament el convergencímetre també ha marcat petites desviacions al igual que ha succeït a la prova 1.

### 5.1.3 GRÀFIQUES: PROVA 3

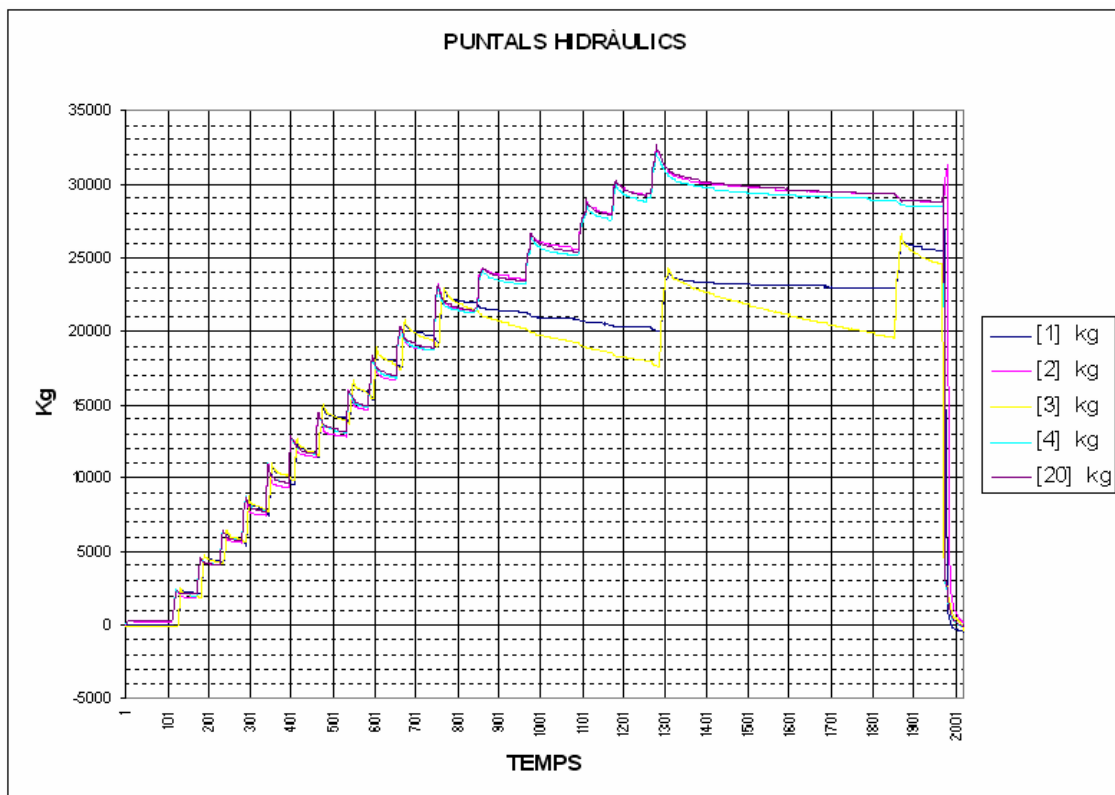
Durada total: 34 minuts

Càrrega puntals hidràulics:

- Exteriors: 32.5 Tn
- Interiors: 26.5 Tn

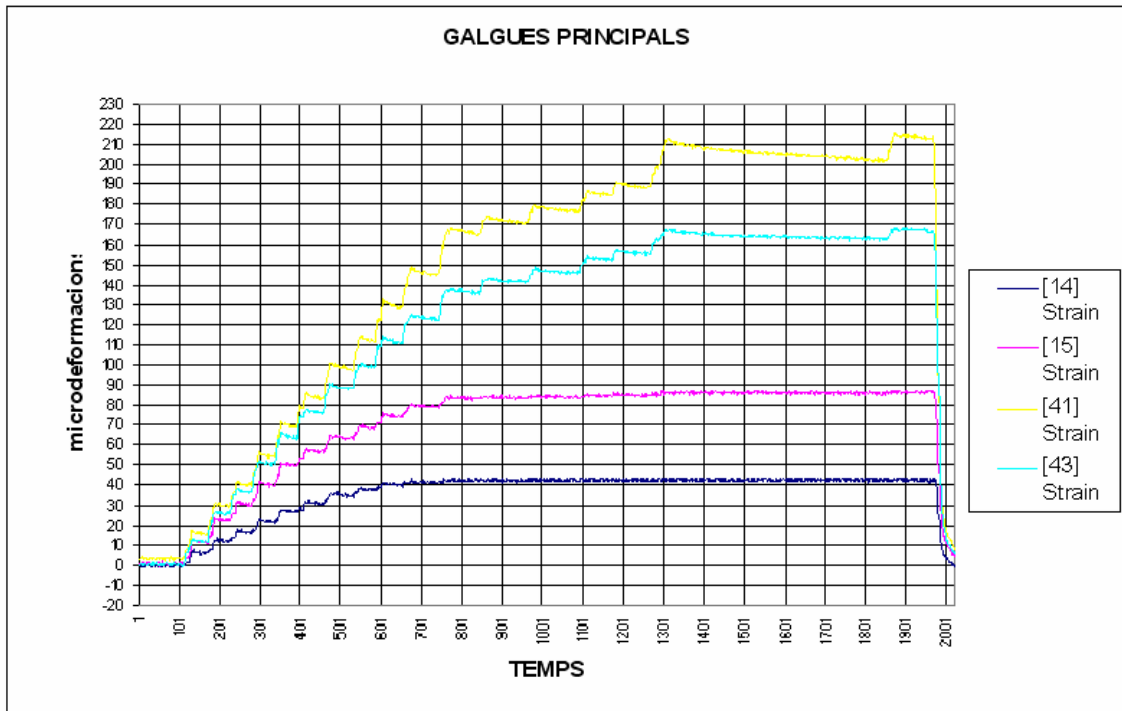
Incrementos de càrrega: intervals de 2Tn

#### RESUM DE RESULTATS DELS PUNTALS HIDRÀULICS



En aquesta tercera prova es pot observar com persisteixen les pèrdues de càrrega dels puntals hidràulics. Alhora se'n treu la mateixa conclusió que en les dues proves anteriors: els puntals exteriors corresponents als canals (2 i 4) reben més càrrega que els puntals (1 i 3) corresponents a l'interior. En aquest cas també s'ha optat per equilibrar el sistema.

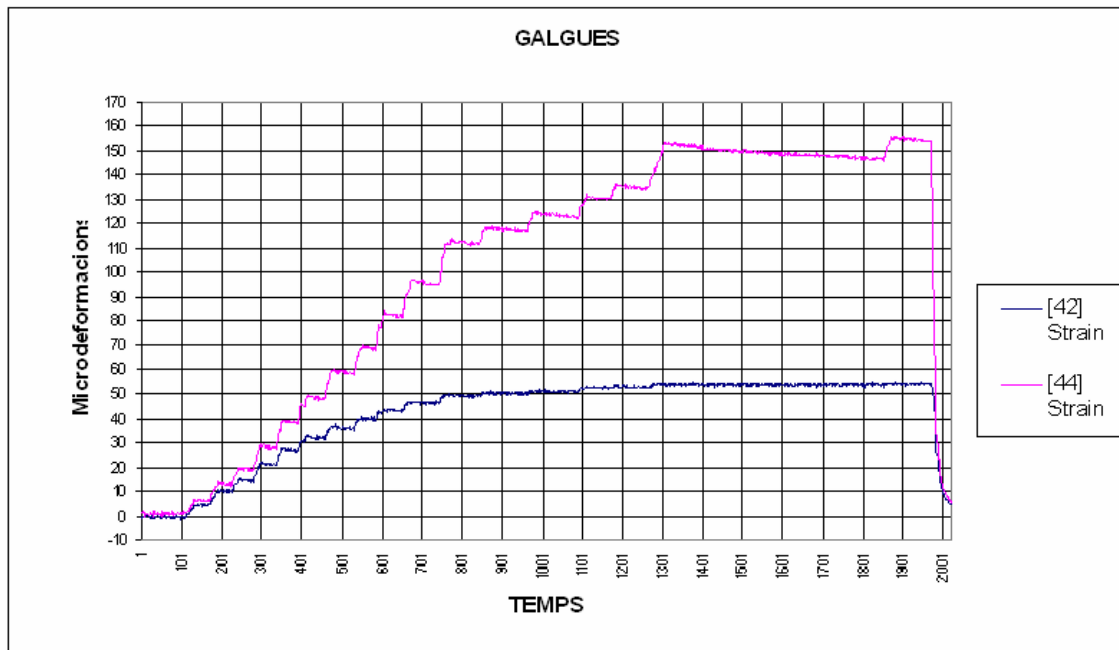
**RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES PRINCIPALS**



En aquesta gràfica es tornen a repetir els resultats produïts a la prova anterior amb les mateixes conclusions: les columnes interiors corresponents als canals 14 i 15 han quedat totalment descarregades ja que les microdeformacions es mantenen constants, mentre que les columnes exteriors corresponents als canals 41 i 43 no han quedat totalment descarregades tot i que l'increment de les seves deformacions ja ha començat a disminuir mostrant així que està apunt de la descàrrega. D'aquests resultats s'en torna a extreure que les columnes exteriors reben més càrrega que les columnes interiors.

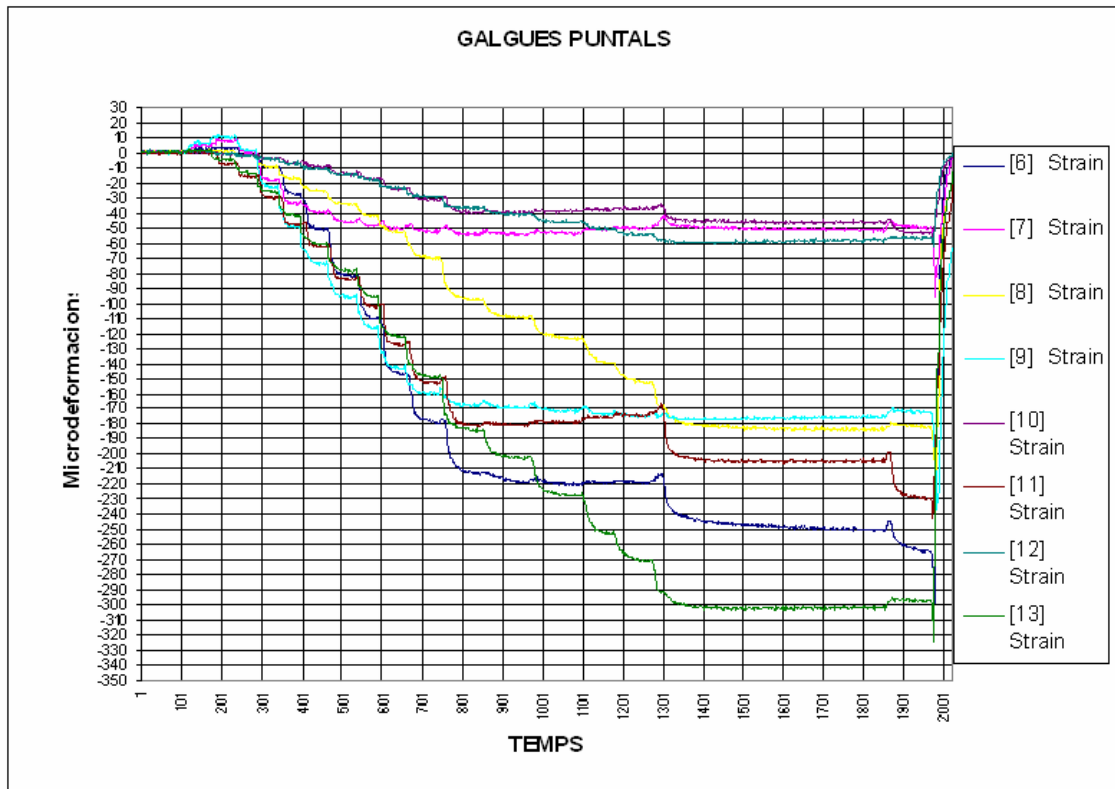


## RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES A COLUMNES PRÒXIMES



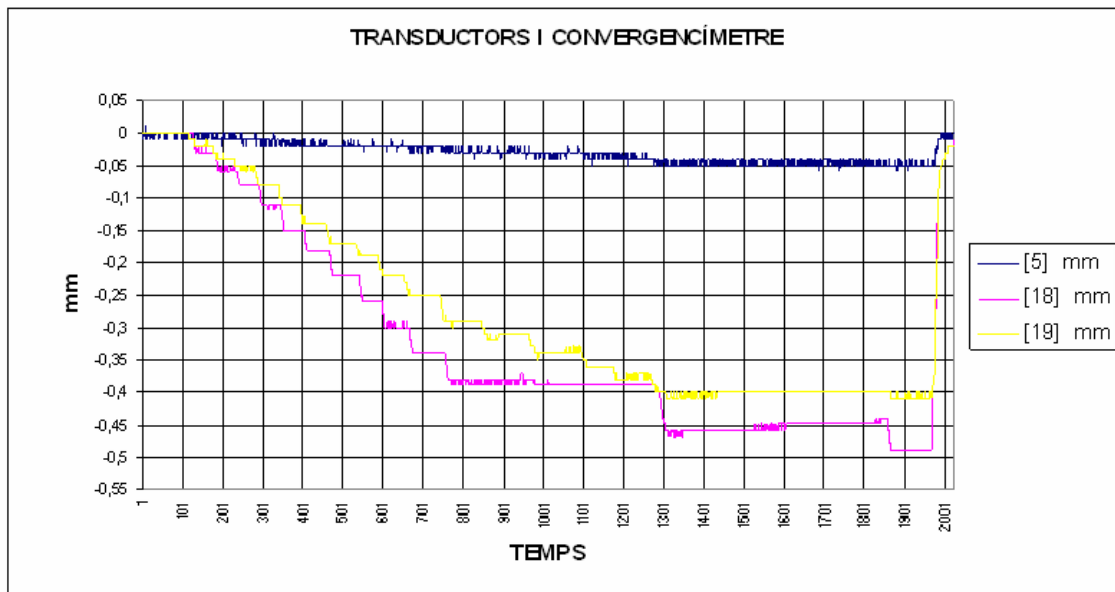
En aquesta tercera prova continuen havent 2 canals corresponents a les galgues de les columnes exteriors del claustre. Les conclusions extretes son les mateixes que les produïdes a la prova 2: la galga de la columna corresponent al canal 44 té unes deformacions més grans que les del canal 42 rebent així unes càrregues majors.

## RESUM DE RESULTATS DE LES GALGUES DELS PUNTALS SECUNDARIS



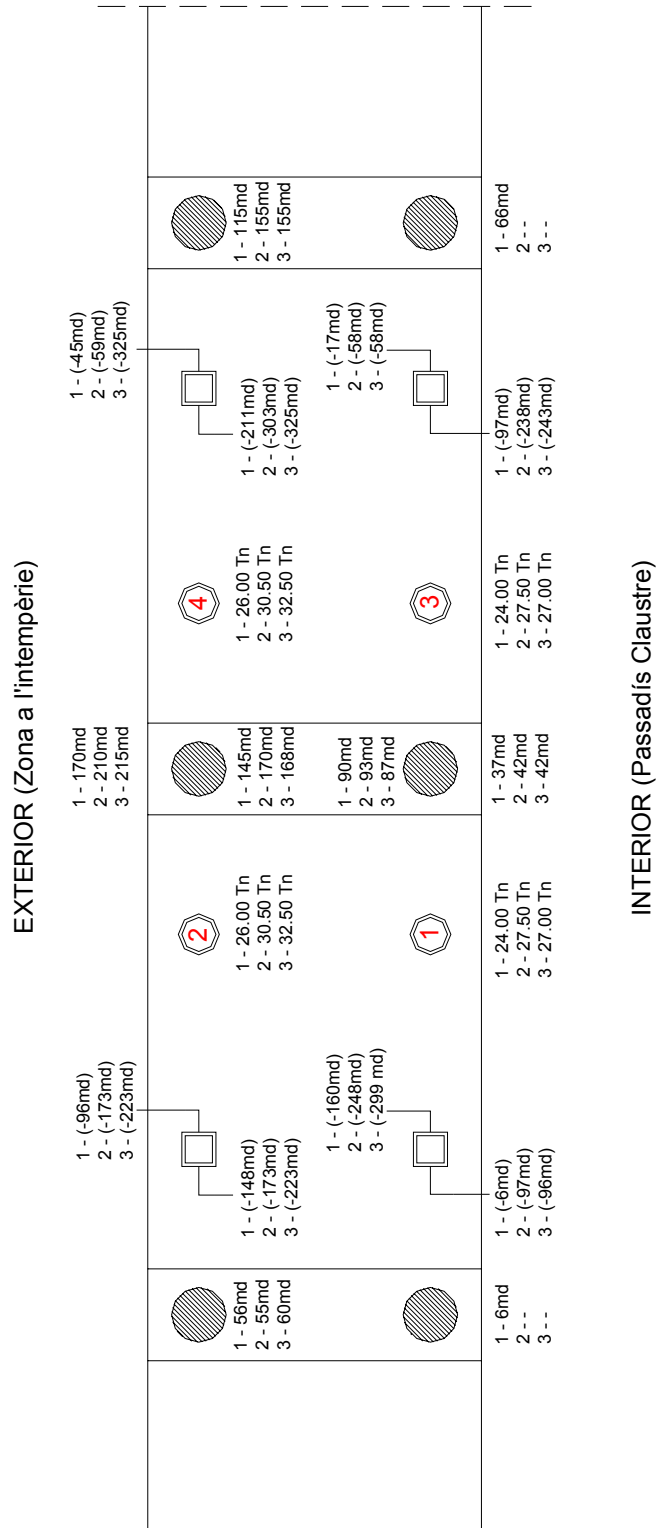
Aquesta gràfica varia sensiblement de les proves anteriors en les microdeformacions màximes. En aquest cas es produeixen en les galgues corresponents als canals 6, 8, 11 i 13. Mentre que els deformacions mínimes són les mateixes que les proves anteriors, corresponent a les galgues dels canals 7, 10 i 12. Tot i que les diferències respecte a les proves anteriors se'n treu la mateixa conclusió: les galgues corresponents a la banda més propera a les columnes sotmeses a estudi són les que tenen major deformació.

## RESUM DE RESULTATS DELS TRANSDUCTORS I EL CONVERGENCÍMETRE



La lectura torna a ser la mateixa que en els gràfics de les proves anteriors: sorgeix una desviació entre els transductors interiors i exteriors, obligant així a carregar amb els puntals només una banda per equilibrar el sistema. A causa d'aquest augment de càrrega es produeixen petites variacions en la lectura del convergencímetre corresponent al canal 5.

### 5.1.4 RESUM DE RESULTATS



## 5.2 OBSERVACIONS SOBRE ELS RESULTATS

El fet que el sistema hagi quedat desequilibrat, elevant-se la part interior més que l'exterior, ha demostrat que la càrrega a suportar per les columnes exteriors és més gran que la suportada per les columnes interiors

Segons els resultats de les galgues col·locades a les columnes, es pot veure que demostren el mateix fet, ja que les microdeformacions aparegudes a les columnes exteriors, són superiors a les microdeformacions interiors. Això explica que les columnes exteriors s'hagin allargat més per estar totalment descarregades mentre que les columnes interiors s'hagin allargat menys i s'hagin descarregat en menys temps.

Les galgues dels puntals secundaris tornen a prova la mateixa hipòtesi ja que les microdeformacions aparegudes als puntals exteriors son superiors als dels interiors. Però hi ha un altre objecte d'estudi. La part dreta del sistema (desde l'interior a l'exterior) ha suportat molta més càrrega que la part esquerra. Aquest succés s'ha tornat a demostrar al observar els resultats de les galgues situades a les columnes més pròximes a les estudiades. Aquesta situació pot ser deguda a un assentament diferencial entre les dues bandes, tot i que per el moment no s'ha pogut demostrar.

D'aquesta manera es pot parlar d'una doble asimetria del sistema: asimetria de les columnes interiors i exteriors i asimetria del sistema de la part dreta a la part esquerra.

## 6. PROPOSTA DE REPARACIÓ I SUBSTITUCIÓ

### 6.2 CÀLCULS DE LA SECCIÓ ÚTIL

#### Dades inicials

Diàmetre:  $D=16\text{cms}$

$$\text{Àrea: } A = \frac{\pi \times D^2}{4} = 201.06\text{cm}^2$$

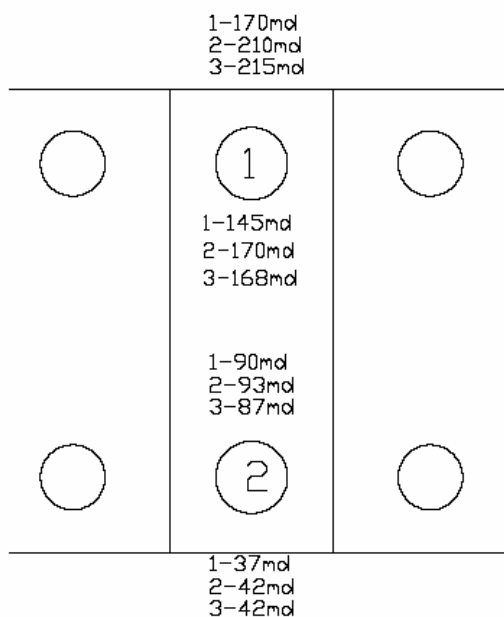
$$\text{Inèrcia: } I = \frac{\pi \times D^4}{64} = 3216.99\text{cm}^4$$

$$\text{Mòdul resistent: } \omega = \frac{I}{(h/2)} = 402.12\text{cm}^3$$

Mòdul elàstic:  $\epsilon=747474.33\text{kg/cm}^2$

#### Deformacions columnes

EXTERIOR



INTERIOR

#### **Columna 1:**

Mitjana microdeformacions exterior:

$$E = \frac{(170 + 210 + 215)}{3} = 198.3\text{md}$$

Mitjana microdeformacions interior:

$$E = \frac{(145 + 170 + 168)}{3} = 161\text{md}$$

#### **Columna 2:**

Mitjana microdeformacions exterior:

$$E = \frac{(90 + 93 + 87)}{3} = 90\text{md}$$

Mitjana microdeformacions interior:

$$E = \frac{(37 + 42 + 42)}{3} = 40.3\text{md}$$

## 6.1.1 CÀLCUL MOMENT I AXIAL: COLUMNA 1

### Tensions

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

$E$ =deformacions unitàries

$\varepsilon$  =mòdul elàstic

$$\sigma_1 = E \times \varepsilon = 198 \times 10^{-6} \times 747474.33 \text{ kg/cm}^2 = 148.224 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_2 = E \times \varepsilon = 161 \times 10^{-6} \times 747474.33 \text{ kg/cm}^2 = 120.34 \text{ kg/cm}^2$$

Ara apliquem NAVIER:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{\omega}$$

$N$ =Axial

$M$ = Moment

$A$ =Àrea secció (columna)

$\omega$ =mòdul resistent

### Tensió 1 ( $\sigma_1$ )

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M}{\omega} \longrightarrow \frac{N}{201.06 \text{cm}^4} + \frac{M}{402.12 \text{cm}^3} = 148.224 \text{kg/cm}^2$$

### Tensió 2 ( $\sigma_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M}{\omega} \longrightarrow \frac{N}{201.06 \text{cm}^4} - \frac{M}{402.12 \text{cm}^3} = 120.34 \text{kg/cm}^2$$

Ara tenim un sistema de 2 equacions amb 2 incògnites. Aillem i trobem N i M.

**N=26998.75kg (Axial)**

**M=5606.35cmkg (Moment)**

A partir del moment (M) i l'axial (N) es pot trobar l'excentricitat (e) a que s'aplica la càrrega axial.

$$e = \frac{M}{N} \longrightarrow \frac{5606.35 \text{ cm} \times \text{kg}}{26998.75 \text{ kg}} = 0.207 \text{ cm}$$

Esquema resum de tensions, moment i axial

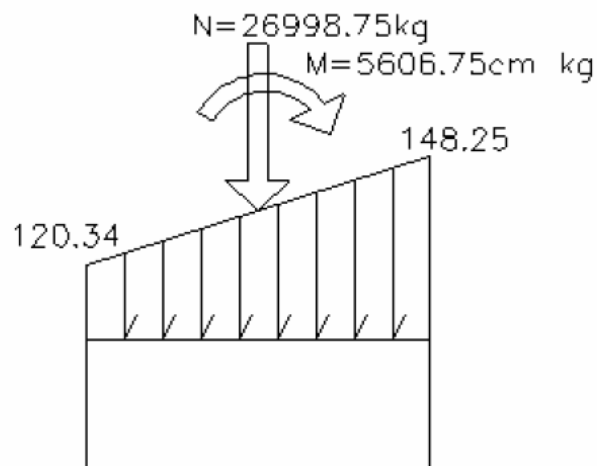


Fig. 38 Esquema resum de les tensions, moments i axials



## 6.1.2 CÀLCUL MOMENT I AXIAL: COLUMNA 2

### Tensions

$$\sigma_1 = E \times \varepsilon = 90 \times 10^{-6} \times 747474.33 \text{ kg/cm}^2 = 67.27 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_2 = E \times \varepsilon = 40.33 \times 10^{-6} \times 747474.33 \text{ kg/cm}^2 = 30.14 \text{ kg/cm}^2$$

Ara apliquem NAVIER:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{\omega}$$

*N=Axial*

*M= Moment*

*A=Àrea secció (columna)*

*\omega=mòdul resistent*

### Tensió 1 ( $\sigma_1$ )

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M}{\omega} \longrightarrow \frac{N}{201.06 \text{ cm}^4} + \frac{M}{402.12 \text{ cm}^3} = 67.27 \text{ kg/cm}^2$$

### Tensió 2 ( $\sigma_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{M}{\omega} \longrightarrow \frac{N}{201.06 \text{ cm}^4} - \frac{M}{402.12 \text{ cm}^3} = 30.14 \text{ kg/cm}^2$$

S'aconsegueix un sistema de 2 equacions amb 2 incògnites. S'aïlla i es troba N i M.

**N=9792.63kg (Axial)**

**M=7465.35cmkg (Moment)**

A partir del moment (M) i l'axial (N) trobem l'excentricitat (e) a que s'aplica la càrrega axial.

$$e = \frac{M}{N} \rightarrow \frac{7465.35 \text{ cm} \times \text{kg}}{9792.63 \text{ kg}} = 0.76 \text{ cm}$$

Esquema resum de tensions, moment i axial

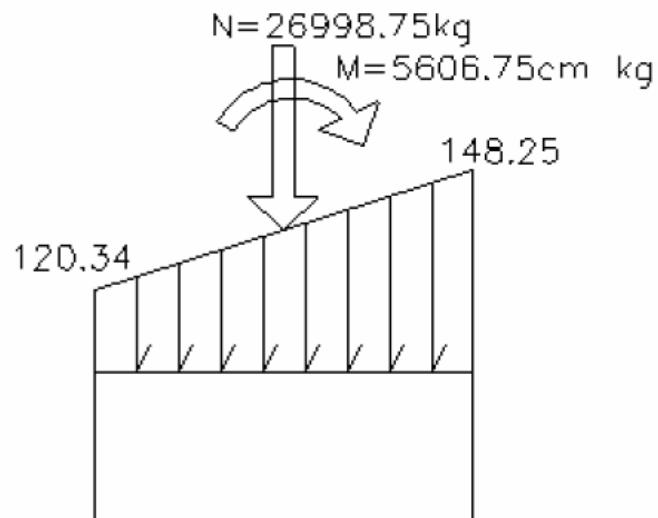


Fig. 39 Esquema resum de tensions, moment i axials

### 6.1.3 COMPROVACIÓ DE TENSIONS

$$\sigma = \frac{N \times w \times Cs}{A} \pm \frac{M}{\omega} \leq \text{Resistència mecànica a compressió}$$

$N$ =axial

$w$ =coeficient de pandeig 1.1

$Cs$ =coeficient de seguretat de 4

$A$ =àrea de la secció

$M$ =Moment

$\omega$ = Mòdul resistent

Resistència mecànica a la compressió de la pedra de Girona = 732 Kg/cm<sup>2</sup>

#### COLUMNA 1

Tensió 1 ( $\sigma_1$ )

$$\sigma_1 = \frac{N \times w \times Cs}{A} + \frac{M}{\omega} = \frac{26998.75\text{kg} \times 1.1 \times 4}{201.06\text{cm}^2} + \frac{5606.35\text{cm} \times \text{kg}}{402.12\text{cm}^3} = 604.78\text{kg/cm}^2 \leq 732\text{kg/cm}^2$$

Tensió 2 ( $\sigma_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{N \times w \times Cs}{A} - \frac{M}{\omega} = \frac{26998.75\text{kg} \times 1.1 \times 4}{201.06\text{cm}^2} - \frac{5606.35\text{cm} \times \text{kg}}{402.12\text{cm}^3} = 576.90\text{kg/cm}^2 \leq 732\text{kg/cm}^2$$

#### COLUMNA 2

Tensió 1 ( $\sigma_1$ )

$$\sigma_1 = \frac{N \times w \times Cs}{A} + \frac{M}{\omega} = \frac{9792.63\text{kg} \times 1.1 \times 4}{201.06\text{cm}^2} + \frac{7465.35\text{cm} \times \text{kg}}{402.12\text{cm}^3} = 232.87\text{kg/cm}^2 \leq 732\text{kg/cm}^2$$

Tensió 2 ( $\sigma_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{N \times w \times Cs}{A} - \frac{M}{\omega} = \frac{9792.63\text{kg} \times 1.1 \times 4}{201.06\text{cm}^2} - \frac{7465.35\text{cm} \times \text{kg}}{402.12\text{cm}^3} = 195.74\text{kg/cm}^2 \leq 732\text{kg/cm}^2$$

Tant la columna 1, com la columna 2 compleixen ja que les tensions son inferiors a la resistència mecànica a compressió de la pedra.

### 6.1.4 CÀLCUL COLUMNES A SER SUBSTITUÏDES

Àrea mínima per a reparar sense substituir:

$$\sigma = \frac{N \times w \times C_s}{A} \pm \frac{M}{\omega} \leq \text{Resistència mecànica a compressió}$$

$N$ =axial

$w$ =coeficient de pandeig 1.1

$C_s$ =coeficient de seguretat de 4

$A$ =àrea de la secció

$M$ =Moment

$\omega$ = Mòdul resistent

Resistència mecànica a la compressió de la pedra de Girona = 732 Kg/cm<sup>2</sup>

#### COLUMNES EXTERIORS

S'agafa la hipòtesi produïda en la columna exterior més desfavorable

$$\sigma_1 = \frac{26998.75 \text{ kg} \times 1.1 \times 4}{A} + \frac{5606.35 \text{ cm} \times \text{kg}}{402.12 \text{ cm}^3} = 732 \text{ kg/cm}^2$$

S'aïlla l'àrea (A) i es troba que és:

$$A = 165 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\text{Àrea mínima teòrica}}{\text{àrea total}} \times 100 = \text{Percentatge de superfície necessària}$$

$$\frac{165.44 \text{ cm}^2}{201.06 \text{ cm}^2} \times 100 = 82.28$$

Les columnes exteriors en que la seva superfície sigui inferior al 82.28% de la seva superfície total, hauran de ser substituïdes.

### COLUMNES INTERIORS

S'agafa la hipòtesi produïda en la columna interior més desfavorable

$$\sigma = \frac{9792.63\text{kg} \times 1.1 \times 4}{A} \pm \frac{7465.35\text{cm} \times \text{kg}}{402.12\text{cm}^3} = 732\text{kg} / \text{cm}^2$$

S'aïlla l'àrea (A) i es troba que aquesta és:

$$A=60.39 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\text{Àrea mínima teòrica}}{\text{àrea total}} \times 100 = \text{Percentatge de superfície necessària}$$

$$\frac{60.39\text{cm}^2}{201.06\text{cm}^2} \times 100 = 30.03$$

Les columnes interiors en que la seva superfície sigui inferior al 30.03 % de la seva superfície total, hauran de ser substituïdes.

## 6.2 ELECCIÓ DE LES COLUMNES A REPARAR I SUBSTITUIR

$$\sigma = \frac{N \times w \times Cs}{A} \pm \frac{M}{\omega} \leq \text{Resistència mecànica a compressió}$$

$N$ =axial

$w$ =coeficient de pandeig 1.1

$Cs$ =coeficient de seguretat de 4

$A$ =àrea de la secció

$M$ =Moment

$\omega$ = Mòdul resistent

Resistència mecànica a la compressió de la pedra de Girona = 732 Kg/cm<sup>2</sup>

Les columnes que superin la tensió de 732kg/cm<sup>2</sup> hauran de ser substituïdes i les que no superin aquest valor, podran ser reparades.

### 6.2.1 DETERMINACIÓ DEL DIÀMETRE MÍNIM EQUIVALENT

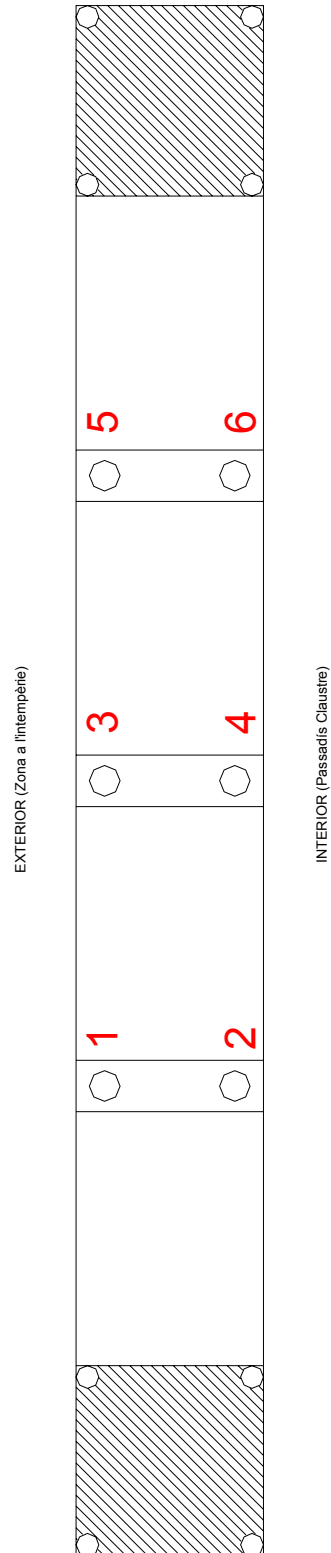
Columnes exteriors

diàmetres (cm)	$N \times w \times cs / A$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$M / \omega$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$N \times w \times cs / A + M / \omega = \sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Observacions
16	590,83	13,94	604,78	compleix
15,5	629,57	15,34	644,90	compleix
15	672,24	16,92	689,16	compleix
14,5	719,40	18,73	738,13	no compleix
14	771,70	20,81	792,51	no compleix
13,5	829,92	23,21	853,13	no compleix
13	894,99	25,99	920,98	no compleix

## Columnes interiors

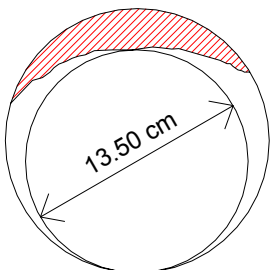

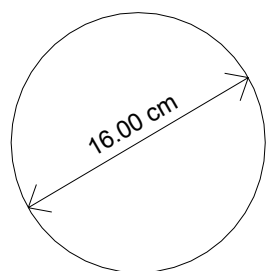

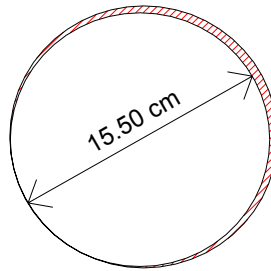

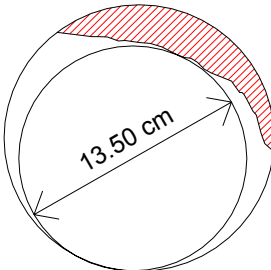

diàmetres (cm)	$N \cdot w \cdot cs / A$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$M / \omega$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$N \cdot w \cdot cs / A + M / \omega = \sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Observacions
16	214,30	18,56	232,86	compleix
15,5	228,35	20,42	248,77	compleix
15	243,83	22,53	266,36	compleix
14,5	260,93	24,94	285,87	compleix
14	279,90	27,71	307,61	compleix
13,5	301,02	30,91	331,93	compleix
13	324,62	34,61	359,23	compleix
12,5	351,11	38,93	390,04	compleix
12	380,98	44,01	424,98	compleix
11,5	414,83	50,00	464,82	compleix
11	453,39	57,13	510,52	compleix
10,5	497,60	65,69	563,29	compleix
10	548,61	76,04	624,65	compleix
9,5	607,87	88,69	696,57	compleix
9	677,29	104,31	781,60	no compleix

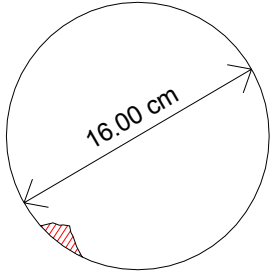

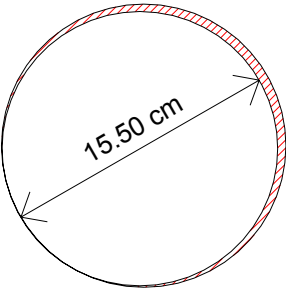

## 6.2.2 ESQUEMA DE SITUACIÓ DE LES COLUMNES DE PEDRA DEL CLAUSTRE





**6.2.3 QUADRE RESUM DE L'ESTAT DE LES COLUMNES ANALITZADES**

NÚMERO	ESQUEMA DEL DANY	Ø (cm)	TENSIÓ (Kg/cm <sup>2</sup> )	FOTOGRAFIA
1		13.5	853.13	 A substituir
2		16	232.86	 A reparar
3		15.5	664.90	 A reparar
4(*)		13.5	331.93	 A reparar







5		16	604.78	 <p>A reparar</p>
6		15.5	248.77	 <p>A reparar</p>

(\*) Tot i que la columna 4 es trobi molt malmesa, no supera la tensió admissible i per tant no es substituirà per tal de reduir l'impacte de l'actuació.







### 6.2.4 ANÀLISI DETALLADA DELS DANYS DE LES COLUMNES

Per tal de tenir constància dels desperfectes més importants de les columnes estudiades, s'ha fet un estudi gràfic i visual dels danys més importants. D'aquesta manera es pot tenir una magnitud aproximada de l'actuació que s'ha de fer al Claustre.







<b>Columna 1</b>	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Part exterior del capitell erosionada. Ornaments en bon estat	Base molt deteriorada. Columna a substituir ja que supera la tensió admissible (veure 6.2.3)	Vista lateral de la base on s'aprecia la falta de secció útil

<b>Columna 2</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input checked="" type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Capitell deteriorat. Ornaments en mal estat	Base en bon estat. Conserva tota la seva secció útil. Ornaments erosionats	Vista lateral on es veu el desgast de la superfície de pedra







<b>Columna 3</b>	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Part exterior del capitell molt erosionada. Ornaments deteriorats	Base molt deteriorada. Ornaments en mal estat	A la vista lateral s'observa el dany de la base i la columna







<b>Columna 4</b>	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Capitell i ornaments en molt bon estat de conservació	Base de la columna danyada. Ornaments de la base en bon estat	Aquí es pot veure el dany de la columna. La falta de secció és important però no es substitueix ja que no supera la tensió admissible. Així es redueix l'impacte de l'actuació

<b>Columna 5</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 3	<input checked="" type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Capitell molt eriosonat i ornamentals en mal estat	Base molt eriosonada i ornamentals en mal estat	Vista lateral de la base on s'aprecia el dany a la base

<b>Columna 6</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 5	1,3,5 columnes exteriors 2,4,6 columnes interiors
	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 4	<input checked="" type="radio"/> 6	

		
 capitell	 base	 base
Capitell i ornamentals en molt bon estat de conservació	Base eriosonada. Ornamentals eriosonats	Vista on s'aprecia el desgast de la pedra i els ornamentals

## **OBSERVACIONS GENERALS**

Com s'ha pogut observar al llarg de totes les fotografies, les columnes interiors són les que estan menys danyades a causa de la seva situació. Es considera la possibilitat de que algun dels capitells hagin sigut restaurat degut al bon estat dels ornaments i de la pedra. Per contra, les columnes exteriors són les que han patit més el pas del temps i les agressions externes com els agents atmosfèrics o la contaminació ambiental.

## 6.3 TRACTAMENT DE LES COLUMNES

### 6.3.1 SUBSTITUCIÓ

El procés consistirà en la substitució de les columnes més deteriorades. Més exactament, s'hauran de substituir aquelles columnes que tinguin la secció útil per sota dels càlculs mostrats anteriorment.

Com han demostrat el resultat de les proves, les columnes de la part exterior reben més càrrega que les interiors. Per tant, el diàmetre útil necessari per suportar les càrregues serà més gran que els interiors. D'aquesta manera es troba que el diàmetre mínim exterior ha de ser de 14.5cm mentre que l'inferior ha de ser de 9cm.

La columna a implantar serà un cilindre de 16cm de diàmetre (com les originals) i el material emprat ser la pedra de Sant Vicencs. Tindrà una llargària de 1.05m.

Per realitzar la substitució de les columnes es farà servir el sistema hidràulic emprat a la realització de les proves de càrrega. D'aquesta manera s'aconseguirà descarregar totalment les columnes a substituir i es podrà procedir a la seva execució de manera segura.

El procés de la substitució serà el següent:

1. Apuntament per la col·locació de xindris metàl·lics
2. Col·locació dels 2 xindris metàl·lics sobre els suports
3. Reomplert de la junta dels xindris metàl·lics amb l'arc amb morter expansiu
4. Execució de base de morter
5. Col·locació de base de taulers de fusta per rebre els puntals hidràulics
6. Muntatge dels 4 puntals hidràulics
7. Muntatge dels pilars secundaris instrumentats a través de placa i contraplaca
8. Col·locació del sistema de transductors de desplaçament amb suports
9. Instrumentació de les columnes a substituir
10. Col·locació del convegencímetre amb suport anclat a la pedra i el sensor desplaçament
11. Connexió dels 2 èmbols hidràulics per a la impulsió dels 4 puntals
12. Connexió del sistema de processament de dades Vishay 5000 a tots els sensors i galgues de desplaçament.

13. Calibració prèvia dels 4 puntals hidràulics i col·locació de la cèl·lula de càrrega
14. Apuntament de capitells
15. Descàrrega de les columnes a substituir
16. Extracció de les columnes
17. Neteja dels suports de les columnes
18. Implantació de les columnes noves
19. Reomplert de juntes amb morter expansiu

### **6.3.2 REPARACIÓ**

Les columnes que no hagin de ser substituïdes (veure punt 6.2.3) hauran de ser reparades. La reparació es farà efectiva amb resines epoxídiques emplenant les fisures i reconstituïnt la seva forma cilíndrica.



## **7. CONCLUSIONS GENERALS**

### **7.1 CONCLUSIONS SOBRE LES HIPÒTESIS DE CÀRREGA**

Un cop finalitzades les proves de càrrega, obtinguts els resultats i analitzades les gràfiques, es pot afirmar que no es forma cap arc de descàrrega segons descriu la hipòtesi 2 (veure punt 3.1.2) sinó que cada columna suporta la seva part de càrrega corresponent segons un model d'àrees tributàries dels pisos superiors (veure esquema de la hipòtesi 1).

Això significa que cada columna ha de suportar molta més càrrega de la que inicialment s'havia previst i a conseqüència d'això, s'haurà d'intervenir en l'estat de les columnes per tal d'assegurar l'estabilitat del Claustre quan es realitzi el canvi d'ús del forjat superior.

### **7.2 CONCLUSIONS SOBRE ELS RESULTATS**

S'ha pogut observar al llarg de les 3 proves com les columnes exteriors del Claustre (les que donen al pati interior) han de suportar més càrrega que les columnes interiors. Tanmateix les columnes exteriors són les que es troben en més mal estat i les que presenten els danys més greus per la càrrega que suporten. Per tant, s'haurà de dur a terme un procés de reparació i substitució segons els documents adjunts (veure punt 6.2.3). Aquest anàlisi s'ha efectuat només sobre les columnes centrals de l'ala nord del Claustre i en un futur s'hauria de fer extensible a la resta de columnes mitjançant el mateix sistema.

### **7.3 CONCLUSIONS SOBRE L'EXECUCIÓ DE LA PROVA**

El sistema proposat per la prova de càrrega ha resultat efectiu però amb certs aspectes a millorar per a futures proves. En primer lloc s'hauria de rectificar el sistema dels puntals hidràulics instrumentats per tal de que no presentessin pèrdues de càrrega durant la prova, ja que això fa enrederir els treballs i altera el resultat de les gràfiques. D'altre banda s'ha de tenir en compte el material utilitzat per al contacte cèl·lula de càrrega/puntal hidràulic degut a que la fusta no ha suportat a les altes càrregues de compressió sotmeses presentant signes de fatiga del material. S'hauria de usar un material suficientment resistent ja que la fusta pot posar en perill l'estabilitat i la seguretat del sistema.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

### Llibres i projectes consultats

1. Bras, X, González, A i Vandebrossche, P. “ Anàlisi de les columnes del Claustre de la Catedral de Girona”. Projecte final de carrera realitzat a la UdG l'any 2001.
2. Bassols, C i Comas, M. “Proposta d'un sistema d'instrumentació complet per a la prova de càrrega al Claustre de la Catedral de Girona”. Projecte realitzat a la UdG l'any 2002.
3. Aparicio, X. “Sistema per a la descàrrega d'un pilar del Claustre de la Catedral de Girona”. Projecte realitzat a la UdG l'any 2003
4. Martín Batlle, M, Roure Fernández, F i Sanz Rubies, J. “Extensometria I. Galgues extensomètriques”. Col·lecció TEM. 6 publicat a l'any 1992
5. Llorens, M. “Conveni de col·laboració científica entre la Universitat de Girona i el Bisbat de Girona”. Realitzat l'any 2006.

### Pàgines web consultades

6. Pàgina oficial de productes d'instrumentació Vishay ([www.vishay.com](http://www.vishay.com))  
Informació referent a les galgues extensomètriques  
[http://www.vishay.com/brands/measurements\\_group/strain\\_gages/mm.htm](http://www.vishay.com/brands/measurements_group/strain_gages/mm.htm)  
Informació referent al SAD (Sistema d'adquisició de dades)  
[http://www.vishay.com/brands/measurements\\_group/guide/inst/5000/5100.htm](http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/inst/5000/5100.htm)
7. Informació referent als transductors de desplaçament  
<http://www.idm-instrumentos.es/Sensores/posici.htm>
8. Informació referent al funcionament del SAD (Sistema d'adquisició de dades)  
<http://www.monografias.com/trabajos23/sistema-adquisicion-datos/sistema-adquisicion-datos.shtml>