

ANÀLISI DEL COMPORTAMENT D'UNA VOLTA CATALANA MITJANÇANT UN MODEL EXPERIMENTAL D'ASSAIGS ESTÀTICS I DINÀMICS.

Alumnes: Raimon Costa Tarrés i Laura Macià Casanovas

Tutor: Miquel Llorens Sulivera

12 de Juny de 2014

En el món de la rehabilitació i construcció de voltes catalanes es disposa de poca informació sobre quina és la contribució estructural dels diferents elements que es disposen sobre les voltes.

En general es considera que les costelles i l'encadellat ceràmic no tenen prestacions estructurals, essent la seva funció, adequar la geometria de la volta al pla horitzontal necessari per convertir aquest element estructural en un sostre.

Aquest projecte justifica i verifica la importància d'aquests dos elements en el comportament estructural de la volta catalana a partir d'un estudi exhaustiu basat en correlacions experimentals i comparacions amb models numèrics.

1. INTRODUCCIÓ.

El projecte presentat té com a finalitat definir la influència de les costelles i encadellats ceràmics que formen part de la volta catalana en el comportament estructural de la mateixa. En cursos anteriors s'ha posat a punt les metodologies per poder analitzar voltes ceràmiques mitjançant proves dinàmiques. En aquest projecte, es continua i s'amplia la part experimental realitzada pel projecte "Anàlisi d'una volta catalana mitjançant vibracions a partir d'un model teòric i experimental".

L'objectiu principal del projecte és aprendre sobre el comportament estructural de la volta catalana.

Per desenvolupar aquest primer objectiu, s'analitza la millora introduïda en el

comportament de les voltes ceràmiques al tenir en consideració les costelles i encadellats. Aquesta millora es verifica a través de dos mètodes d'anàlisi experimental:

- Assaigs dinàmics.
- Assaigs estàtics.

Assolir aquest objectiu, ha requerit com a pas previ:

.- aprendre a utilitzar equipaments específics relacionats amb l'adquisició de dades de caràcter estàtic i dinàmic.

.- interpretar les dades obtingudes en els diferents assaigs i establir les relacions pertinents.

Per últim, s'ha plantejat una comparació dels resultats obtinguts amb els corresponents a un model numèric, per tal de trobar-hi relació per un posterior ajustament.



El procediment seguit per assolir els objectius del projecte és el següent:

.- desenvolupar un apartat teòric, fent èmfasi en el coneixement de la volta catalana i de la teoria de les vibracions.

.- treball de caràcter experimental emprant tècniques estàtiques i dinàmiques. Aquest avalua la volta en tres situacions diferents:

- La volta aïllada.
- La volta + costelles ceràmiques.
- La volta + costelles + encadellat ceràmic.

.- comparació dels resultats obtinguts entre les diferents fases i la correlació dels resultats obtinguts amb aproximacions numèriques realitzades en un altre treball

2. LA VOLTA CATALANA.

La volta és una estructura que tenca superiorment un espai, de la mateixa manera que un arc tenca un pany o una obertura. Com en el cas de la figura de l'arc, la volta es compon d'elements constructius de menors dimensions que l'espai que cobreixen i graviten sobre el buit. Per aguantar-se, els elements que conformen una volta han de transmetre el seu propi pes i les càrregues que suporten de un a un fins als recolzaments. La diferència que tenen amb els sostres o forjats plans sotmesos a esforços de flexió, és que les voltes només suporten esforços de compressió i és per això que adopten formes apropiades que

eviten fatigues d'extensió i que transmeten les compressions a recolzaments continus, o concentrats sobre recolzaments aïllats. La gran varietat de solucions constructives per aconseguir això, combinat amb la diversitat d'espais a cobrir, determinen les nombroses formes diferents que poden adoptar les voltes ceràmiques, cada una de les quals rep el seu propi nom.

3. TEORIA DE LES VIBRACIONS.

Actualment, l'estudi i anàlisi de les vibracions mecàniques ha adquirit gran importància en la supervisió dels sistemes mecànics, sobretot d'elements de tipus rotatiu. En el camp de la construcció, fa relativament poc que s'utilitza l'anàlisi de les vibracions mecàniques per estudiar el comportament de sistemes constructius.

La forma natural d'adquirir una vibració, es mesurar la resposta d'una estructural al llarg del temps. Les vibracions en el domini del temps presenten un problema alhora de realitzar una diagnosi: aquestes senyals estan carregades de molta informació en forma molt complexa. La resposta del sistema analitzat resulta ser un senyal que conté tota la informació de forma indiferenciada. La interpretació del comportament i la identificació dels paràmetres modals resulten complicats.

SEGONS FONT D'ENERGIA QUE LA GENERA	LLIURES	Sense amortiment
		Amb amortiment
	FORÇADES	Sense amortiment
		Amb amortiment
SEGONS COMPORTAMENT DEL SISTEMA	LINEALS	
	NO LINEALS	
SEGONS LA LLEI QUE LA DESCRIU	DETERMINISTA	Periòdica
		No periòdica
	ALEATÒRIA	

Classificació de les vibracions.

Existeixen altres formes per realitzar un estudi de vibracions, entre els quals es troba fer l'anàlisi de les senyals en el **domini de la freqüència**. Per això, s'utilitza la gràfica d'amplitud davant de freqüència que és coneguda amb el nom d'espectre. Aquesta és l'eina més habitual en qualsevol tipus d'anàlisi.

Les FRF, conegudes com **Funció de Resposta en Freqüència** són funcions complexes definides en el domini de la freqüència que descriuen el comportament d'un sistema a partir d'una entrada coneguda i la seva resposta. A partir de les FRF, s'extreuen els paràmetres modals d'una peça o sistema.

Anàlisi modal.

L'anàlisi modal és una tècnica utilitzada per determinar les característiques vibratòries d'una estructura i ens subministra les freqüències i formes naturals amb què aquesta vibra. És el tipus d'anàlisi dinàmic més habitual i ha de fer-se abans de qualsevol altre, ja que les característiques vibratòries d'una estructura determinen com respon davant de càrregues dinàmiques.

4. MODEL EXPERIMENTAL.

Presentació de la volta estudiada.

La geometria de la volta estudiada és la següent:

3,50 x 3,50m de projecció en planta amb un arc directriu de 3,68 m. La distància del punt central de l'arc directriu al punt mig de la línia d'arrancada és de 0,5 m i la distància de la línia d'arrancada fins el punt central de la volta és de 1 m.

Està composta per dues fulles de 1,5 cm cadascuna amb junta horitzontal de 1 cm configurant un cantell total de 4 cm.

La volta és de tipus oberta i es recolza sobre quatre pilars de maó perforat tipus calat, col·locats a trencajunts i adherits amb morter M-7,5. Els pilars tenen unes dimensions de base de 0,40x0,30m i una alçada de 1,16m. Per donar-li millor recolzament a la volta, inicialment es van col·locar uns perfils metàl·lics "L" a l'interior del pilar, on es van soldar uns tirants d'acer corrugat de 12mm de diàmetre, per tal d'evitar que els pilars bolquin i/o es desplacin a causa de les empentes de la volta.



Volta estudiada.

Fases del model experimental.

En aquest apartat es defineixen les tres fases a partir de les quals hem realitzat les proves estàtiques i dinàmiques per tal de poder observar el comportament estructural de la volta. Afegim una quarta fase no prevista inicialment per tal de recuperar la volta en el seu estat inicial i poder repetir els assaigs de la fase primera.

- Fase 1: Volta aïllada.
- Fase 2: Volta aïllada + costelles ceràmiques.
- Fase 3: Volta aïllada + costelles + encadellat ceràmic.
- Fase 4: De-construcció de costelles + encadellat ceràmic.

Preparació del model experimental.

Fem una breu explicació del material i programes utilitzats per a l'obtenció de dades de la part experimental dins els assaigs dinàmic i estàtic, així com un petit resum del muntatge d'aquests. Tot seguit és fa un llistat del material utilitzat:

Assaig dinàmic.

- Acceleròmetres.
- LMS Pimento.
- LMS Test. Lab.
- Ansys.

Assaig estàtic.

- Sistema d'adquisició de dades.
- Software de processament de dades.
- Galgues extensiomètriques.

- Transductors de desplaçament.

Millora i simplificació del model experimental.

S'ha fet un estudi comparatiu del comportament modal de la volta estudiada a partir d'una geometria de 66 punts (repartits en tota la superfície) i un geometria de 29 punts (repartits en el perímetre), amb el programa Test.Lab amb la finalitat de simplificar el model experimental.

5. INTERPRETACIÓ I ANÀLISI DEL MODEL EXPERIMENTAL

En aquest apartat es descriu l'estudi comparatiu i estadístic de totes les dades extretes dels diferents assaigs dinàmics i estàtics fets al laboratori.

L'objectiu es analitzar el comportament de la volta en les tres situacions anteriorment descrites. Es realitzen proves estàtiques i dinàmiques per caracteritzar-lo. Un cop obtinguts els dos conjunts de dades, s'establiran les relacions entre ells.

Anàlisi de resultats del model experimental dinàmic.

L'objecte de dur a terme els assaigs dinàmics, és poder determinar algunes de les freqüències naturals de la volta i correlar-les amb el mode corresponent.

En alguns casos es pot donar el cas de que algun dels modes no aparegui. Això pot ser

degut a que la configuració de l'assaig triada no l'excita o registra convenientment.

El resultat d'aquesta part del treball serà una taula on quedarà registrada l'evolució dels diferents modes a mesura que canvien les condicions en les voltes.

nº Modes estudiat	Freq. on es troba	VOLTA FASE 1		Freq. on es troba	VOLTA FASE 1	
		Sense càrrega			Amb càrrega	
		Aresta A-A'	Aresta B-B'		Aresta A-A'	Aresta B-B'
1	15,442 Hz	2S	1A	9,719 Hz	2S	1A
2	15,873 Hz	2S	2A	12,293 Hz	1A	2S
3	18,314 Hz	1A	2S	14,741 Hz	2A	2A
4	19,288 Hz	3S	3S	17,142 Hz	3S	3S
5	25,735 Hz	2A	2A	22,212 Hz	2S	3A
6	26,198 Hz	2S	3A			

Exemple de pauta per a comportament dinàmic.

A priori es pot establir una pauta de comportament en els assaig dinàmics teòrica o esperada que pot seguir l'esquema següent i que caldrà comprovar i verificar un cop acabada la pauta.

VOLTA FASE 1	VOLTA FASE 1
Sense càrrega	Amb càrrega
$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{fase\ 1}}{m}}$	$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{fase\ 1}}{m}}$
$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{fase\ 1}}{p_{propri}}}$	$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{fase\ 1}}{p_{propri} + p_{càrrega}}}$
FREQÜÈNCIES ALTES	FREQÜÈNCIES BAIXES

Esquema de pauta per assaig dinàmic.

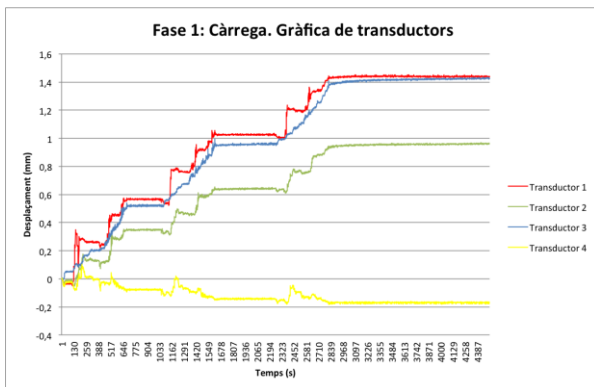
Conclusions de l'anàlisi dinàmic.

- Es poden verificar les hipòtesis plantejades anteriorment sobre la teoria que els elements projectats a sobre la volta catalana, costelles i encadellat ceràmic, contribueixen en la capacitat resistent del sistema.
- Durant la simulació modal en tots els assaigs s'ha pogut veure com els recolzaments de les voltes tenien un moviment que distorsionava la visualització dels modes en les 4 arestes de la geometria. És molt possible que per culpa de fissurament en els punts d'encastament de la volta, les lectures enregistrades en aquests punts no siguin del tot fiables. Els modes obtinguts no segueixen un ordre lògic d'aparició segons l'increment de valor de les freqüències. Les combinacions dels modes haurien de ser superiors a mesura que pugen les freqüències. No obstant això, aquest fet no impedeix extreure una pauta de comportament modal de la volta.

Anàlisi de resultats del model experimental estàtic.

En aquest apartat consolidem la pauta de comportament de la volta segons els assaigs estàtics realitzats. A continuació es presenta algunes de les gràfiques elaborades a partir de les dades extretes al laboratori. A cada

fase s'han generat 4 gràfiques de transductors i 4 de galgues per representar la prova de càrrega, el període d'estabilització, la descàrrega i l'estabilització de la descàrrega, excepte en la fase 1, que per perill de col·lapse de la volta es va decidir fer només càrrega i descàrrega.



Gràfica de transductors a Fase 1: càrrega.

Per entendre i poder comparar millor els resultats, es recull en la següent taula els resultats corresponents als diferents transductors i galgues.

ASSAIG	LECTURA	FASE 1	FASE 2	FASE 3
CÀRREGA	TRANSDUCTOR 1 (mm)	1,4421	1,0518	0,7508
	TRANSDUCTOR 2 (mm)	0,9621	0,7617	0,5175
	TRANSDUCTOR 3 (mm)	1,4228	1,3969	0,9054
	TRANSDUCTOR 4 (mm)	-0,1644	-0,02423	0
	GALGA 10 (µε)	9	19	15
	GALGA 11 (µε)	10	14	-20
	GALGA 12 (µε)	0	-3	3
	GALGA 13 (µε)	-12	-16	0
	GALGA 14 (µε)	-9	10	4
	GALGA 15 (µε)	8	18	11
	GALGA 16 (µε)	-25	-22	-19
	GALGA 17 (µε)	-6	-4	-3
	GALGA 18 (µε)	-62	-40	-28
GALGA 19 (µε)	-50	-22	-24	
GALGA 20 (µε)	134	104	85	

Exemple de pauta per a comportament estàtic.

Conclusions de l'anàlisi estàtic.

- La contribució de les costelles i l'encadellada milloren la capacitat resistent de la volta en un 52 %.
- La volta catalana estudiada en aquest projecte és capaç d'aguantar 300 kg/m² o el que és el mateix, 3675 kg (càrrega total).
- Els valors màxims i mínims de tracció i compressió enregistrats per les galgues de ceràmica són els següents:

LECTURA	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Valor Màxim de tracció (kg/cm ²)	1,5	2,7	1,65
Valor Màxim de compressió(kg/cm ²)	-9,3	-3,3	-4,2

El valor màxim de tracció en totes les fases de la volta és de 2,7 kg/cm² i el valor màxim de compressió en totes les fases, és de -9,3 kg/cm². Així doncs, podem dir que són valors màxims completament admissibles pel tipus de material.

- Totes les conclusions, gràfiques i pautes de comportament són específiques per la volta estudiada al laboratori.

Obtenció del mòdul de Young dinàmic.

En aquest apartat del treball es mostra el procediment seguit per aconseguir el mòdul de Young dinàmic dels elements que conformen la volta.

Partint d'un mòdul de Young teòric estimatiu, es vol obtenir un mòdul de Young real, o que s'ajusti al màxim al valor real del material, a partir de la comparació dels resultats obtinguts en el model experimental i el model teòric.

Per establir aquesta comparació necessitarem simular el comportament modal de la volta tan en el model experimental com en el model teòric. És per això que ens hem ajudat del programari ANSYS i LMS TEST-LAB per simular una anàlisi dinàmica en el model teòric i el model experimental, respectivament.

Un cop acabada la comparació, es poden donar dos resultats:

1. El valor del mòdul de Young dinàmic de la volta està entre **3.732.400.000 N/mm²** i **3.913.000.000 N/mm²**.
2. El valor del mòdul de Young dinàmic de la volta és de **3.822.700.000 N/mm²**, obtingut a partir de la mitjana dels valors possibles.

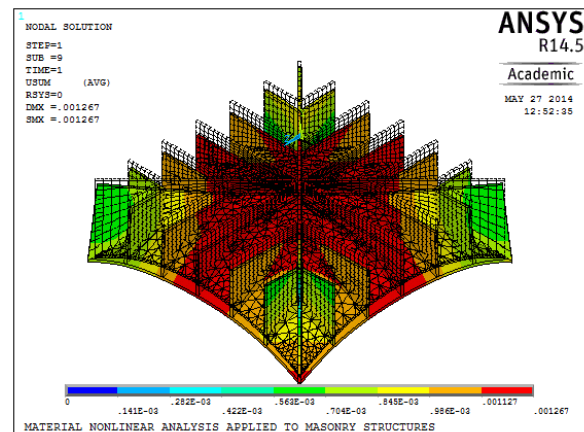
6. COMPARACIÓ DEL MODEL EXPERIMENTAL I EL MODEL NUMÈRIC.

Es realitza un anàlisi comparatiu entre les dades del model experimental extretes en l'apartat anterior (part d'estàtica) amb el d'un model numèric realitzat per l'alumne Sokheng Tang.

El treball de Tang, incorpora en el model numèric simulat mitjançant Ansys, el comportament no lineal del material, incloent-hi el fenomen del craking (trencament del material a tracció) i crushing (trencament del material a compressió).

L'objectiu és poder ajustar el model numèric al model experimental.

Per poder fer la comparació ens hem fixat si el moviment i les deformacions de la volta han estat els mateixos i si els valors màxims de la volta en càrrega sumant els valors màxims d'estabilització de càrrega, s'aproximen al model numèric.



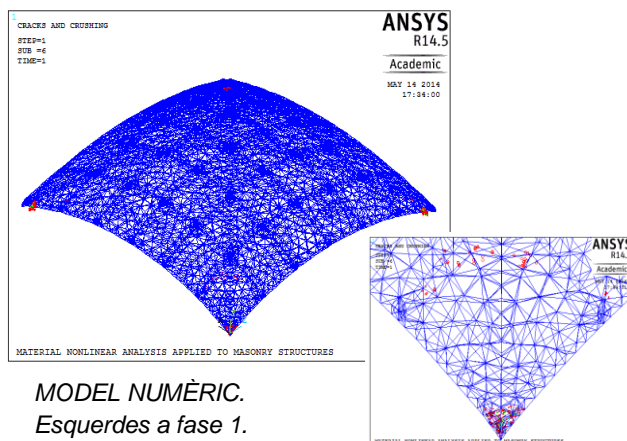
Imatge de Model numèric.

Comparació de l'estat final de la volta.

Es compara l'estat final de la volta entre els dos models a partir de les esquerdes aparegudes. Tot i disposar d'informació a cada fase del model numèric, la comparació es fa a partir d'un sumatori de les tres fases ja que del model experimental només

disposem d'informació en l'estat final de la volta.

A través del model numèric, s'observa com les esquerdes queden localitzades a les cantonades de la volta, en concret als punts on es troben situats els pilars. La fase que ha propiciat més danys ha estat la fase 1 per ser la fase on la volta resulta ser menys rígida.



*MODEL NUMÈRIC.
Esquerdes a fase 1.*

Pel que fa el model experimental trobem que moltes de les patologies i les més significatives també queden localitzades en els recolzaments de la volta ja que aquesta empeny en direcció els pilars. Com a conseqüència surten esquerdes generalment a 45° a la part interior dels pilars. També cal destacar que en algunes zones de tracció a l'intradós de la volta o de compressions inferiors a l'intradós que a l'extradós provoquen patologies tals com esquerdes i canvis de nivells en alguns dels rajols en aquestes zones.



Canvi de nivell de dovelles, pròxim al punt 9.



Esquerda en el material d'aferratge i rajols en un dels recolzament .

Conclusions de la comparació entre models.

- El model numèric mostra una curvatura de deformació més simple que el model experimental. No obstant això, de forma general, el model numèric i el model experimental són coincidents: els dos models conclouen que els

desplaçaments i tensions experimentats per l'estructura s'atenuen a mesura que s'afegeixen a la volta simple inicial, la contribució de les costelles i els encadellats ceràmics superiors. Això implica que progressivament l'estructura adquireix rigidesa.

- Els valors de deformació entre els dos models divergeixen de forma lleugera amb uns valors en el model numèric força similars que en el model experimental. Així doncs, proporcionalment són comparables.
- L'estat final de la volta en el model numèric presenta esquerdes focalitzades en els recolzaments de la volta. Aquest fet es repeteix en el model experimental, però físicament s'ha pogut veure com també apareixen altres esquerdes i canvis de nivells d'algunes dovelles a l'intradós de la volta.
- L'estat inicial dels dos models amb algunes divergències en la seva geometria i configuració estructural pot ser el causant d'algunes de les diferències entre els resultats dels models.

7. LÍNIES DE FUTUR.

S'ha assolit l'objectiu de crear les pautes de comportament estàtic i dinàmic a partir d'assaig realitzats a laboratori així com comparar els resultats obtinguts del model experimental estudiat amb el model numèric creat per l'alumne Sokheng Tang sobre la volta catalana en qüestió.

Vist els resultats i extretes les conclusions, veiem que el model numèric no s'ajusta suficientment a la realitat, és a dir, al model experimental. Es proposa a partir d'aquí, recopilar i transmetre tota la informació d'aquest projecte al model numèric per tal de millorar-lo i acotar-lo a la realitat.

D'altra banda seria interessant millorar la geometria del sistema introduïda en el programari d'anàlisi modal contemplant la asimetria de la volta provocada per les deficiències en l'excussió en el moment de la construcció. Per aconseguir la geometria exacte de la volta es pot utilitzar una estació total i situar-la a sota de la volta catalana.

Pel què fa a la instrumentació i material d'assaig i anàlisi de resultats, seria favorable potenciar-lo i millorar-lo.

Per últim, seria molt interessant estudiar el comportament modal de la volta catalana de manera tridimensional mitjançant acceleròmetres 3D (acceleròmetres triaxials piezoelèctrics).

9. BIBLIOGRAFIA.

9.1 Llibres i projectes consultats.

MORENO GARCIA, Francisco. *Arcos y Bóvedas*. Barcelona: Ediciones Ceac, 2000. Monografias ceac de la construcció.

HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. *Arcos, bóvedas y cúpulas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004.

HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago i Javier GARCIA-GUITÍERREZ MOSTEIRO. *Las bóvedas de Gustavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1999.

GÜELL ARTERO, Pau. *Anàlisi d'una volta catalana mitjançant vibracions a partir d'un model teòric i experimental*. Projecte Final de Carrera de la Llicenciatura Arquitectura Tècnica de la Universitat de Girona, UdG, 2011.

SALCEDO DESPLANS, Àlex. *Proves de càrrega al claustre de la catedral de Girona*. Projecte Final de Carrera de la Llicenciatura Arquitectura Tècnica de la Universitat de Girona, UdG, 2007.

TANG, Sokheng. *Non-linear analysis of masonry vaults*. Projecte Final de Carrera. Universitat Politècnica de Girona, UdG, 2014.

MERUANE, Viviana. *Dinámica Estructural. Apuntes para el curso ME706*. Facultat de ciències Físiques i Matemàtiques. Universitat de Xile.

TRUNÓ, Angel. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004.

L. SHMITZ, Tony i K. SCOTT SMITH. *Mechanical Vibrations*. Nova York: Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, 2012.

9.2 Normativa aplicable.

Espanya, Ministeri de foment (Abril 2009). *Código Técnico de la Edificación, documento básico sobre la Seguridad estructural, Acciones en la edificación*. Direcció general d'Arquitectura, habitatge i sòl.

Espanya, Ministeri de foment (Abril 2009). *Código Técnico de la Edificación, documento básico sobre la Seguridad estructural, Bases de calculo*. Direcció general d'Arquitectura, habitatge i sòl.

9.3 Pàgines web consultades.

ANSYS, Inc. (n.d.). *Academic Technical Support*. Obtinguda el 2 de Febrer de 2014.
<http://www.ansys.com/Support>

LMS, Simens S.A. (1 D'octubre de 2012). *Support Section*. Obtinguda el 18 de Febrer de 2014.
<http://www.lmsintl.com/support/current-releases>

Sinai S.L., Ingenieria de mantenimiento (n.d.). *Curso de análisis de vibraciones, fundamentos de análisis de vibraciones*. Obtinguda el 14 de Febrer de 2014.



www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada_fourier.html

FELIPE GIRALDO, Julián (22 de Març de 2013). *Modes de vibració*. Obtinguda el 20 de Març de 2014.

www.prezi.com/reziuf3dbipj/modos-de-vibracion/

SOSA, Javier (n.d.). *Galgas extensiométricas, Strain Gages 1*. Universitat Nacional de la Plata. Facultat de Enginyeria. Obtinguda el 28 de Març de 2014.

www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf

Dinàmica estructural (n.d.) Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Estructuras. Argentina. Obtinguda el 2 d'Abril de 2014.

www.efn.uncor.edu/departamentos/estructura_estic/DINAMICA-revA.pdf

G. FERTER, Demeter (1995). *Mechanical and Structural Vibrations*. Nova York. Obtinguda el 11 d'Abril de 2014.

<http://books.google.es/books?hl=ca&lr=&id=7wwcVQ389NgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=mechanical+and+structural+vibrations+theory+and+applications+demeter&ots=1POhEfZaHu&sig=AztvUqdwiJNB60OzbXD-Yln2QfEv=onepage&q=mechanical+and+structural+vibrations+th>

J. P. HARTOG, Den (1985). *Mechanical Vibrations*. Nova York. Courier dover

publications: Ed. Obtinguda el 7 de Maig de 2014.

http://books.google.es/books/about/Mechanical_Vibrations.html?id=-Pu5YlgY4QsC&redir_esc=y