

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

**Títol: ANÀLISI DINÀMICA DELS TIRANTS DELS EDIFICIS DEL SECTOR C
CAMPUS EMPRESARIAL DE TELEFÓNICA DE MADRID**

Document: Memòria

Alumne: Antoni Clarés Garcia

Tutor: Dr. Miquel Llorens Sulivera

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Medis Continus i Teoria de les Estructures

Convocatòria: Juny/2020

PREÀMBUL

En primer lloc, el meu agraïment al meu supervisor, el Dr. Miquel Llorens, per donar-me la oportunitat de fer aquest treball. Agraïxo la seva ajuda i guia durant el transcurs del treball i sobretot trobar temps per aconsellar-me i ajudar-me amb qualsevol dels problemes que m'hagi trobat.

En segon lloc a 3STECH, per la responsabilitat de portar aquest projecte, veure noves línies d'estudi i de seguiment estructural. També agrair els medis que han posat a la meva disposició per l'adquisició de dades i el post-procés d'aquestes.

Finalment un últim agraïment a tot el professorat que m'ha ensenyat i format durant el transcurs de la meva trajectòria de formació com a enginyer industrial. Ells són qui m'han donat el coneixement per afrontar problemes, seguir aprenent i continuar millorant.

Antoni Clarés Garcia, Vic, juny del 2020.

RESUM

En el nord de Madrid està ubicat el campus del Districte Telefónica, aquest és un complex format per 12 edificis, anomenats en funció de la seva situació en els punts cardinals (*Norte-1, Sur-1...*). En cada cantonada de la planta rectangular que forma l'espai del complex hi ha una torra, corresponents a *Norte-1, Sur-1, Este-1 i Oeste-1*. Aquestes torres són les úniques de característica diferent respecte els altres 8 edificis. Els 8 edificis restants tenen la peculiaritat, de tenir una part de l'estructura en voladís subjectada per tirants.

Aquest document té com a objectiu el seguiment al llarg del temps de l'estat estructural dels tirants, detectar possibles anomalies en aquests i establir les mesures correctores.

El projecte fa front a un problema històricament recurrent, com és l'auscultació d'elements estructurals per extreure'n característiques pròpies de l'objecte a estudi, així com les seves condicions de contorn que tenen major influència en el seu comportament.

El procediment proposat és la caracterització, mitjançant l'anàlisi modal experimental de les primeres freqüències naturals de vibració dels tirants. Aquest es tracte d'un estudi no destructiu i per tant repetible en el temps, amb la intenció de crear un històric de dades per així poder comparar i veure l'evolució dels elements estructurals.

El primer que cal estudiar és l'element en si, la seva disposició i funció dins de l'estructura. Començant per veure com va ser constituït i implementat per els dissenyadors que van projectar i fabricar aquest element i saber com interactuen els esforços de l'edifici amb aquests.

Seguidament s'haurà de definir quin és el millor sistema per a l'adquisició de dades, saber i tenir clar que s'ha d'obtenir per a resoldre els dubtes que es plantegen i estar preparat per a detectar possibles problemes que no s'hagin previst.

A continuació es farà un post-procés de les dades, comparar-les amb dades adquirides en el passat i preparar-ho per a auscultacions futures.

Finalment s'estudiaran els casos més complexes i anòmals de forma individual, per intentar donar resposta al seu comportament, utilitzant simulacions i formulacions teòriques, així desenvolupar correctament el problema i intentar donar magnitud a la gravetat d'aquest, per saber si és un problema que afecta a la seguretat dels usuaris.

ÍNDIX

| | |
|--|----|
| PREÀMBUL | 3 |
| RESUM | 4 |
| NOMENCLATURA | 7 |
| 1. INTRODUCCIÓ | 8 |
| 1.1 Antecedents | 8 |
| 2. ESTAT DE L'ART | 11 |
| 2.1 Base teòrica | 11 |
| 2.1.1 Generalitats de la dinàmica i l'adquisició dinàmica experimental | 12 |
| 2.1.2 Identificació del dany | 17 |
| 2.2 Normativa | 18 |
| 2.3 Materials | 18 |
| 3. ESTRUCTURA | 19 |
| 3.1 Sistema de tirants | 19 |
| 3.2 Barres del sistema de tirants | 20 |
| 3.3 Posició dels tirants dins del complex de Telefónica | 20 |
| 4. METODOLOGIA D'ADQUISICIÓ DE DADES | 22 |
| 4.1 Equip d'adquisició | 22 |
| 4.2 Definició de l'assaig | 23 |
| 5. ADQUISICIÓ DE DADES | 24 |
| 5.1 Preparació de l'adquisició | 24 |
| 5.2 Resultats de l'adquisició | 25 |
| 6. ANÀLISI DE RESULTATS | 29 |
| 6.1 Detecció de casos anòmals | 29 |
| 6.2 Determinació de la causa | 33 |
| 6.3 Determinació de les condicions de contorn | 35 |
| 7. ANÀLISI DELS TIRANTS | 39 |
| 7.1 Definició del model numèric | 39 |
| 7.1.1 Software | 39 |
| 7.1.2 Sistema d'unitats | 40 |
| 7.1.3 Paràmetres i propietats mecàniques de la barra | 40 |
| 7.1.4 Definició de les condicions de contorn en el model numèric | 41 |
| 7.1.5 Definició del mallat en el model numèric | 41 |
| 7.1.6 Ajust del model numèric | 42 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 7.2 | Estudi de les hipòtesis | 45 |
| 7.2.1 | Influència de l'esmoreïment..... | 45 |
| 7.2.2 | Influència de la càrrega axial | 46 |
| 7.2.3 | Influència de les condicions de contorn | 49 |
| 8. | PRESSUPOST | 53 |
| 9. | CONCLUSIONS..... | 54 |
| | ÍNDIX DE FIGURES | 56 |
| | ÍNDIX DE TAULES | 57 |
| 10. | RELACIÓ DE DOCUMENTS | 58 |
| 11. | BIBLIOGRAFIA | 59 |
| 12. | ANNEX – Fotografies adquisició 2020 | 60 |
| 13. | ANNEX – Resposta dinàmica experimental dels tirants, 2020 | 62 |
| 14. | ANNEX – Plànols dels tirants i els seus elements | 86 |
| 15. | ANNEX – Disseny en CAD del sistema de tirants | 93 |
| 16. | ANNEX – Plànol de situació del districte Telefónica..... | 94 |

NOMENCLATURA

| | |
|----------------|---|
| FEM | Mètode d'elements finits; en anglès Finite Element Method |
| FEA | Anàlisi d'elements finits; en anglès Finite Element Analysis |
| SHM | Monitoratge de la salut estructural; en anglès Structural Health Monitoring |
| CAD | Disseny assistit per ordinador; en anglès Computer Aided Design |
| FRF | Funció de resposta en freqüència; en anglès Frequency Response Function |
| MAC | Criteri d'assegurament modal; en anglès Modal Assurance Criterion |
| EOM | Equacions de moviment; en anglès Equations of Motion |
| ϵ | Deformació unitària |
| R | Radi de curvatura |
| k | Curvatura |
| E | Mòdul elàstic/mòdul de Young |
| I | Moment d'inèrcia de la secció transversal |
| ν | Coefficient de Poisson |
| V | Esforç tallant |
| T | Esforç axial |
| \bar{x} | Mitjana aritmètica |
| σ | Desviació |
| $\bar{\sigma}$ | Desviació mitjana |
| N | Numero de mostres |
| IC | Interval de confiança |
| z | Distribució normal inversa |
| $[M]$ | Matriu de massa estructural |
| $[C]$ | Matriu d'esmoreïment estructural |
| $[K]$ | Matriu de rígides estructural |
| $\{\ddot{u}\}$ | Vector d'acceleració nodal |
| $\{\dot{u}\}$ | Vector de velocitat nodal |
| $\{u\}$ | Vector de desplaçament nodal |
| $\{F\}$ | Vector de càrrega aplicada |
| α | Coefficient de massa |
| β | Coefficient de rigidesa |
| δ | Decrement logarítmic |
| ζ | Esmoreïment del sistema |
| n | Numero de cicles entre mostres |
| X_t | Amplitud de la primera mostra considerada |
| $X(t + Nt)$ | Amplitud de la segona mostra considerada |
| ω_n | Freqüència natural |
| ρ | Massa per unitat de longitud |
| A_T | Àrea de la barra del tirant |
| f_{yd} | Valor de càlcul de la propietat del material |

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Els acceleròmetres així com els dispositius de mesura d'esforços, desplaçaments, deformacions unitàries, tensions i altres, són part essencial d'empreses que basen el seu model de negoci amb el tractament de les dades adquirides, dels sensors instal·lats en elements estructurals, el que és anomenat avui dia com SHM, **Structural Health Monitoring**, és un concepte que cobreix un nínxol de mercat que és bastant desconegut pel món en general i que vincula conceptes i pràctiques d'enginyeria més semblants al món universitari si es compara amb l'enginyeria aplicada a l'àmbit industrial o constructiu.

Per aquest motiu és molt comú que sorgeixin problemes que no tenen una solució comercial, com en el cas que s'estudia en aquest document. Molts casos es tracten de solucions fetes a mida per l'aplicació, on hi ha una gran part de plantejament i recerca de com afrontar el problema.

El cas d'estudi, es centra en els edificis de la ciutat de les comunicacions, la seu central a Madrid de Telefónica. Aquest és un campus de 12 edificis d'oficines més dos edificis d'accés i serveis generals tals com administració, restaurants, una clínica i un gimnàs ubicats en un solar de 170000 m² situat al costat de la M40.

La distribució consisteix en agrupacions en quatre fases idèntiques de tres edificis, ubicats en les cantonades del terreny, definint així el perímetre del campus. Els edificis són anomenats en funció de la seva situació geogràfica en els punts cardinals, l'emplaçament es mostra en la Figura 1 i el plànol de situació en l'annex 16.



Figura 1: Plànol d'emplaçament del districte Telefónica de Madrid [1].

Els edificis van ser projectats per l'estudi de l'arquitecte Rafael de la Hoz, on destaquen les singulars façanes dels edificis d'oficines, formades per una doble pell de vidre exterior que protegeix del sol.

Una coberta comuna, vincula tots els edificis de menor entitat situats en el perímetre, deixant les quatre torres fora a les cantonades del recinte (Norte-1, Sur-1, Este-1 i Oeste-1).

La característica estructural alhora que estètica, és la part en voladís de l'edifici, on un sistema de tirants subjecten l'estructura de la coberta fins al sostre de la planta baixa, creant una sensació d'amplitud en el pas dels usuaris. En la Figura 2 es pot veure el detall estructural mencionat, de la zona en voladís i dels tirants visibles en la planta de coberta.



Figura 2: Façana de l'edifici Norte-3 [1].

La direcció d'obra i execució del campus de Telefónica, coneguda com a direcció facultativa, volia establir un mètode de seguiment dels tirants que formen la part en voladís dels edificis *Norte-2*, *Norte-3*, *Sur-2*, *Sur-3*, *Este-2*, *Este-3*, *Oeste-2* i *Oeste-3*. Aquest requeriment va quedar redactat en el llibre de l'edifici, on s'especifica que cada 5 anys l'estructura ha de ser revisada.

La proposta que va convèncer més, va ser una auscultació periòdica dels tirants mitjançant l'anàlisi modal. L'auscultació consistia en fer aquesta adquisició dinàmica per tots 48 tirants del campus.

Com a punt de partida d'aquest estudi, es pren l'adquisició de dades dels mateixos elements feta per Joan Llorens a l'any 2011, aquesta adquisició és el punt de referència zero de l'estat dels tirants. En el document [2], es descriu la metodologia de l'assaig que es va utilitzar en el 2011, on es determina l'ús d'acceleròmetres adherits en els tirants per adquirir les freqüències i els modes de vibració. Les dades serviran per a realitzar una primera comparativa històrica dels elements i veure la seva evolució en el temps.

En el cas de veure una gran variació de les dades en un element serà indicatiu que no es comporta com estava previst en el seu disseny i s'està degradant de forma prematura i anòmla.

1.2 Objecte

En el moment de la construcció dels edificis del districte C campus empresarial de Telefónica, no es van realitzar les mesures sobre els tirants, per tant, no resulta possible determinar l'evolució d'aquests al llarg del temps. Sense una referència clara de valors en el moment de la construcció, no és possible saber si l'estructura pateix o no una degradació. Per aquest motiu el treball tracta d'establir una base que haurà de permetre realitzar el seguiment estructural per als propers anys.

El seguiment permet comparar els valors obtinguts amb els passats i per futures adquisicions. Això facilita la detecció de possibles anomalies en aquests i establir, si procedeix les mesures per a la seva correcció.

El procediment utilitzat és la caracterització, mitjançant l'anàlisi modal experimental, de les primeres freqüències naturals de vibració dels elements. Es tracta d'un assaig no destructiu i per tant repetible en el temps, formant una base de dades que permet comparar valors i veure l'evolució històrica del comportament estructural.

La desconeixença de la degradació dels materials i les unions del sistema, fan que els dissenyadors i projectistes de l'estructura hagin acceptat aquest sistema d'auscultació, d'aquesta manera saber si el dimensionament, l'elecció de materials i la seva execució ha estat correcta, o en cas contrari detectar el problema a temps i procedir amb mesures correctores per retornar a l'estructura a un estat de comportament òptim.

Per tant amb aquest estudi, es donarà resposta a les qüestions que es plantegen mitjançant l'adquisició de dades dinàmiques directament en els elements estructurals i el seu posterior post-procés, sempre prenent com a dades de referència, l'auscultació feta l'any 2011.

1.3 Abast

Aquest estudi es planteja amb unes etapes que han de ser abordades de forma sistemàtica, ja que el coneixement adquirit en cada punt proporciona les dades necessàries per avançar al següent.

El document s'organitza de la següent manera:

- Introducció a la teoria i l'adquisició dinàmica.
- Estudi dels tirants i de l'estructura dels edificis.
- Definició de la metodologia d'adquisició de dades i la distribució dels sensors sobre els tirants.
- Equip d'adquisició, freqüències i modes esperats.
- Descripció de l'adquisició de dades en l'estructura.
- Resultats i comparació de les dades adquirides amb les del 2011.
- Identificació de casos anòmals i plantejament de causes.
- Post-procés de dades, extracció de modes utilitzant FEA, **Finite Element Analysis**.
- Estudi dels casos anòmals, formulació d'hipòtesis i estudi d'aquestes.
- Anàlisi de resultats i redacció de conclusions.
- Recomanacions per a futures adquisicions i noves línies d'estudi.

2. ESTAT DE L'ART

2.1 Base teòrica

Podem definir l'anàlisi modal com un procés que permet descriure una estructura en paràmetres dinàmics, tals com freqüència, mode de vibració i esmorteïment. Tota estructura ve determinada per unes freqüències naturals i un mode de vibració associada a aquestes. Aquests paràmetres depenen de la rigidesa i de la massa de l'edifici. Les consideracions anteriors són d'aplicació a la totalitat d'un edifici o a parts discretitzades d'aquests. Així es pot analitzar de manera independent el comportament general de l'estructura o un element en concret d'aquesta com es realitza en el càlcul estàtic. De la mateixa manera que en el càlcul estàtic és necessari establir les condicions d'unió d'aquest element amb la resta de l'estructura. En aquest cas es pot analitzar el comportament de cada un dels tirants posttensats de forma discreta.

Dos tirants en les mateixes condicions, han de presentar les mateixes freqüències naturals. La variació en algun dels paràmetres que defineixen l'element, generen freqüències diferents. En aquest cas els paràmetres que ho defineixen són entre altres paràmetres geomètrics dels tirants, material de fabricació, tensió al qual està sotmès i les condicions de contorn. En aquest estudi, les propietats a determinar són la tensió i les condicions de contorn.

La utilització de tirants, és degut a que l'edifici està format per una estructura principal de base quadrada amb una part d'aquesta en voladís. Aquest voladís està unit de la coberta fins al sostre de la planta baixa per un sistema de 6 tirants.

El sistema de tirants és utilitzat, ja que és ben conegut que la fàbrica i les estructures de formigó tenen un comportament pobre quan es troben en tensió, els tirants contribueixen a garantir una connexió eficient de les parts constituents del complex estructural.

En la Figura 3 es mostren les corbes de comportament típiques tensió/deformació del formigó i de l'acer.

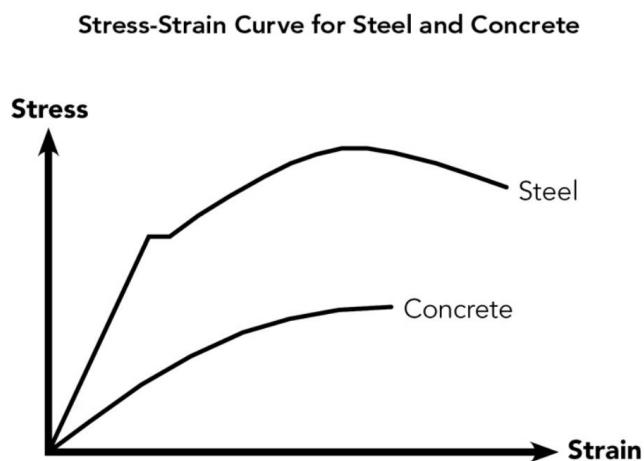


Figura 3: Corbes tensió/deformació típiques de l'acer i el formigó [3].

2.1.1 Generalitats de la dinàmica i l'adquisició dinàmica experimental

L'anàlisi estructural tracta essencialment en trobar el comportament d'una estructura física quan aquesta és sotmesa a una força. L'acció de la càrrega pot ser aplicada mitjançant el pes d'usuaris en una estructura, neu, vent, etc. Un altre tipus d'excitació externa podria ser un terratrèmol o una explosió.

La principal diferència entre la dinàmica i l'estàtica, és que l'acció aplicada tingui acceleració suficient en comparació a la freqüència natural de l'element.

Si una càrrega s'aplica lentament, les forces d'inèrcia (la segona llei del moviment de Newton) poden ignorar-se, i l'anàlisi es pot simplificar com anàlisi estàtic. Per tant la dinàmica estructural, és un tipus d'anàlisi que cobreix el comportament en estructures subjectes a una càrrega dinàmica.

En aquest estudi s'utilitza un programa d'elements finits per representar el comportament de l'estructura utilitzant les dades de l'adquisició experimental, però en un programa com l'ANSYS hi ha varies famílies d'anàlisi dinàmica:

- **Modal:** Mitjançant la definició de les condicions de contorn, s'obtenen freqüències naturals i els seus corresponents modes de vibració.
- **Harmònic:** Aplicant diferents excitacions sinusoidals d'un rang de freqüències, es pot extreure la resposta de la variació sinusoidal per a cada freqüència i la resposta mínima i màxima del rang de freqüències.
- **Espectre:** Utilitzant la resposta específica d'un històric de dades, es pot visualitzar la resposta màxima durant aquell període d'adquisició.
- **Aleatori:** Aquest anàlisi utilitza un ampli rang de freqüències, aquest no comprova una freqüència o amplitud específica en un moment determinat en el temps, sinó que estadísticament mostra la resposta de l'estructura a un determinat entorn de vibracions aleatòries.
- **Transitòries:** Si es defineixen càrregues variables en el temps, s'obté una resposta variable en el temps.

El mètode utilitzat en aquest document és l'anàlisi modal, per tant per caracteritzar els elements, les dades que s'extreuen són les freqüències naturals i els corresponents modes de deformació.

La freqüència natural o freqüència ressonant, és la freqüència a la qual l'estructura deformable oscil·larà en ser pertorbada.

El mode de vibració és important ja que ens proporciona la informació necessària per saber si realment estem capturant les freqüències naturals que volem observar, ja que cada freqüència natural, segons el seu ordre, té un mode de vibració característic. Això ens permet discernir si capturem l'ordre correcte de freqüències o bé si aquestes són freqüències de cos rígid.

Qualsevol element rígid té 6 graus de llibertat en un sistema tridimensional, 3 de desplaçament i 3 de rotació, per tant un element tindrà 6 modes de cos rígid, pròxims als 0 Hz. Aquests modes d'acord amb la primera llei de Newton, la llei d'inèrcia, haurien d'estar en moviment i rotació constant, sempre i quan s'hi apliqui energia.

En l'adquisició experimental dels elements, les dades que es visualitzaran durant l'assaig es mostren en la següent Figura 4, totes les gràfiques de l'adquisició es poden trobar en l'annex 13.

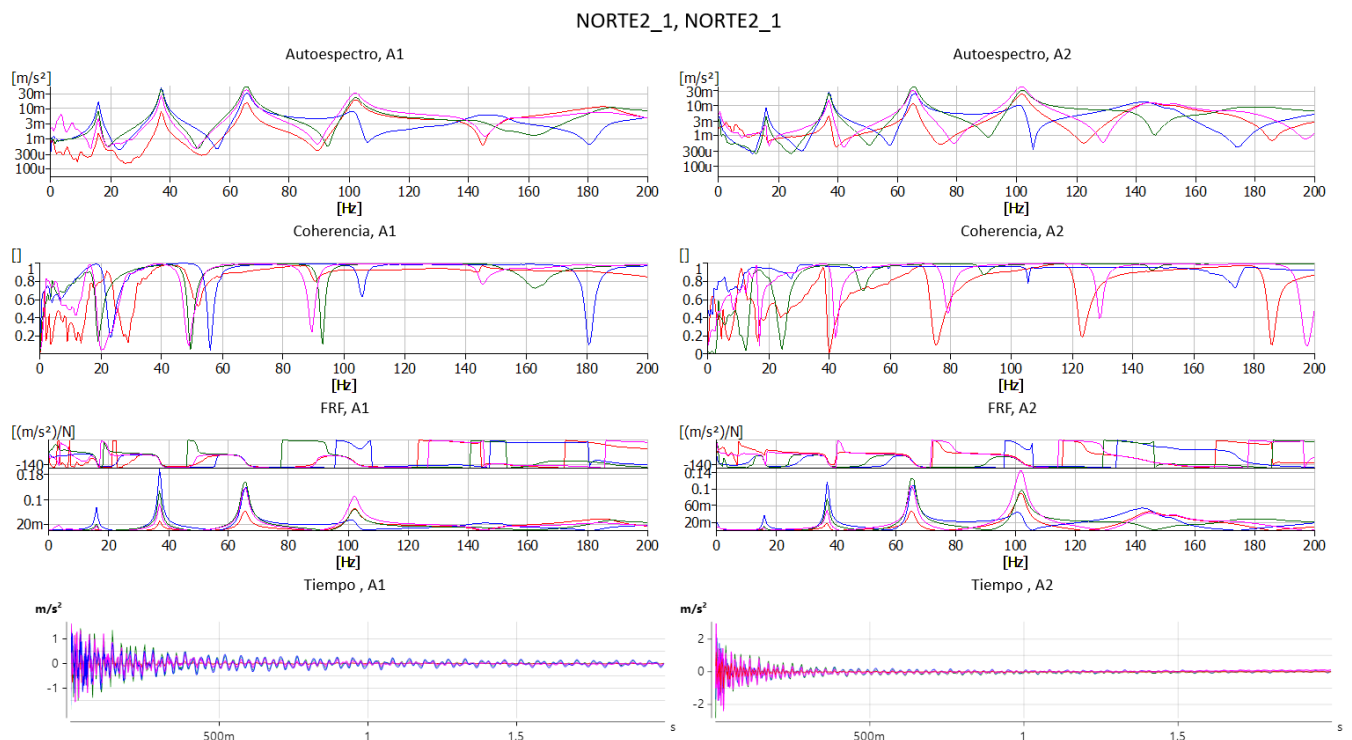


Figura 4: Visualització de la resposta dinàmica experimental dels elements.

Aquestes dades ens proporcionen informació sobre la qualitat de l'adquisició durant el procediment d'aquesta. Com es pot veure es disposen de dades duplicades per cada adquisició (A1 i A2), això és degut a l'ús de dos acceleròmetres.

A continuació es descriuen les gràfiques de la Figura 4.

Funció de resposta en freqüència *FRF*.

La funció de resposta en freqüència, o funció de transferència **FRF**, és la que descriu les característiques dinàmiques d'un sistema lineal (Bendat i Piersol [4]). També es pot definir com la descripció matemàtica en el domini de les freqüències entre els espectres de Fourier de l'entrada i la sortida d'un sistema.

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad \text{exp (1)}$$

Les freqüències de cos rígid es poden observar en el gràfic de la funció de resposta en freqüència, com es mostra en la Figura 5.

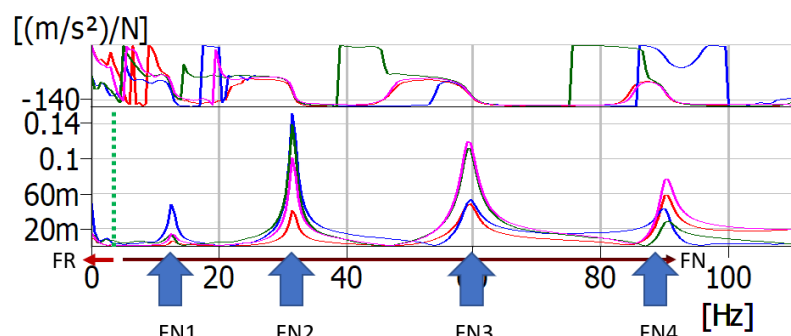


Figura 5: Funció de resposta en freqüència, modes de cos rígid.

En la figura, es pot veure un gràfic de funció de resposta en freqüència d'un dels elements. La línia de punts marca l'última freqüència de cos rígid, aquestes es poden diferenciar de les freqüències naturals si la freqüència fonamental (primera freqüència natural) és 10 vegades més gran que l'última freqüència de cos rígid. En aquest cas les 4 freqüències naturals són fàcilment diferenciables.

Cal fer menció, que en l'adquisició experimental d'aquest document només es volen visualitzar les 4 primeres freqüències naturals ja que a partir de la quarta hi ha casos que és difícil saber si el que es visualitza és o no una freqüència natural.

En el cas que es mostra en la Figura 6, és difícil discriminar si la resposta mostrada entre 120 i 140 Hz és la cinquena freqüència natural de l'element.

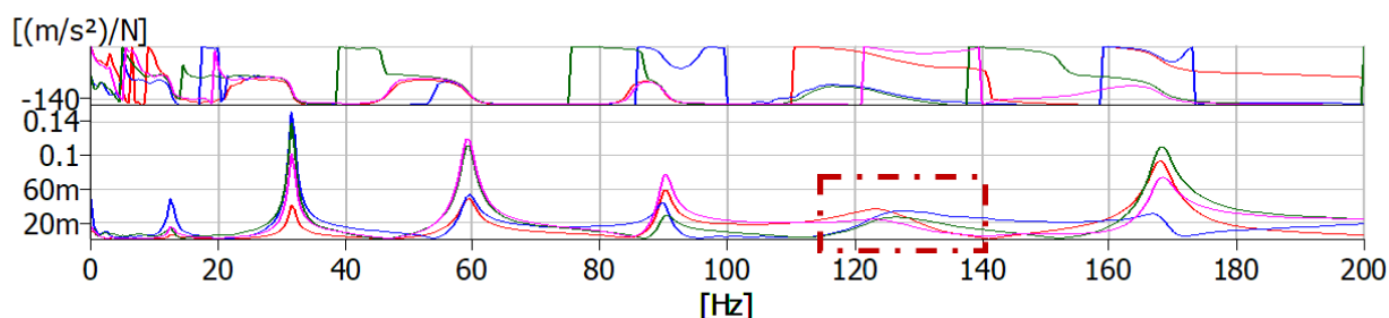


Figura 6: Funció de resposta en freqüència, cas cinquena freqüència natural.

Per minimitzar la incertesa en la visualització de les freqüències ressonants, és recomanable impactar vèries vegades en el mateix punt de l'estructura, altrament conegut com a ponderació múltiple.

Tant en la Figura 5 com en la Figura 6, es poden veure quatre línies de visualització, quatre impactes en el mateix punt, on si aquestes quatre coincideixen en un valor pic, serà evident que estarem visualitzant una ressonància. Pel mateix motiu, si és possible, s'haurà d'utilitzar més d'un acceleròmetre, per tenir redundància en la visualització de les dades.

Autoespectre.

L'autoespectre o funció de densitat de potencia espectral, és definida per la transformada de Fourier de la funció d'autocorrelació [4].

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad \text{exp (2)}$$

Utilitzant l'autoespectre també es fa visible el problema d'adquisició de freqüències naturals més enllà de la quarta (Figura 7).

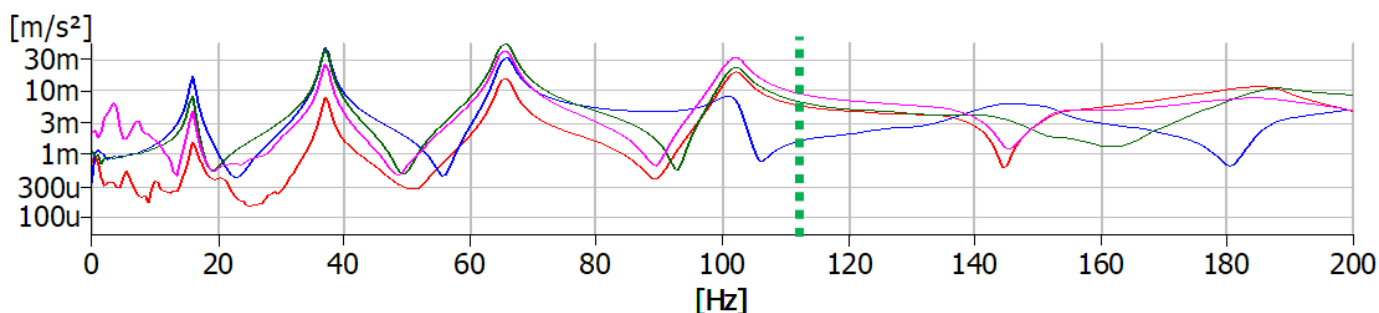


Figura 7: Funció de densitat de potencia espectral.

Coherència.

La funció de coherència és una mesura de la consistència que existeix entre senyals d'entrada i sortida, és a dir, veure si la senyal de sortida és únicament un producte de la senyal d'entrada o existeix un altre tipus de senyal (soroll), que pogués afectar a la senyal de sortida.

Matemàticament, per a sistemes lineals, la funció de coherència pot ser interpretada com la porció fraccional del quadrat de la mitjana de la sortida $y(t)$, que és contribuït per la senyal d'entrada $x(t)$ en una freqüència específica f , Bendat i Piersol [4].

La funció de coherència varia entre 0 i 1, sent 0 quan no existeix coherència entre senyals i 1 quan la coherència és perfecte. La funció de coherència està definida per la relació entre les funcions de transferència:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad \text{exp (3)}$$

Segons Julius S. Bendat [5], quan la funció de coherència és més gran que 0 però menor o igual a 1, es poden donar una o més de les següents quatre condicions principals:

- Soroll estrany present en les mesures.
- Errors de resolució presents en les estimacions espectrals.
- El sistema que relaciona $y(t)$ amb $x(t)$ no és lineal.
- La sortida de $y(t)$ és deguda a $x(t)$ i altres entrades.

Amb la visualització de la coherència, és possible detectar les freqüències de cos rígid, com per exemple, en el rang de 0 a 16 Hz de la Figura 8 es pot veure una senyal poc saturada producte d'aquest fet.

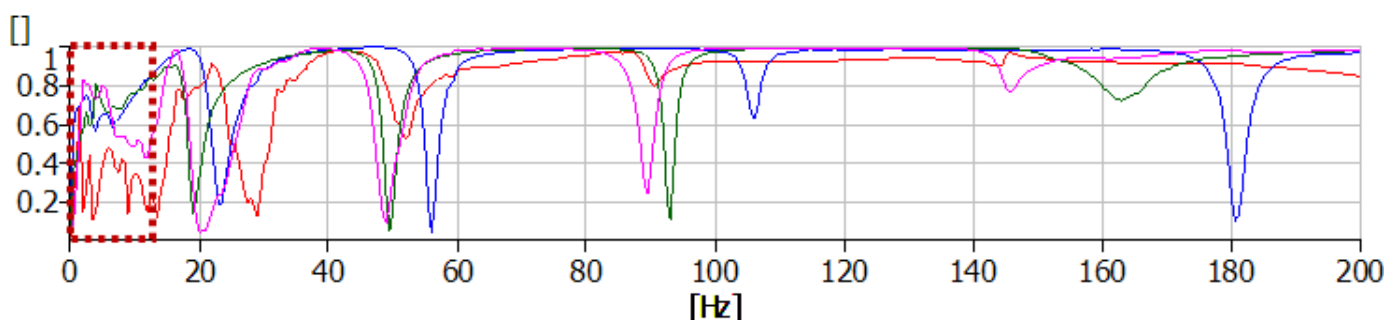


Figura 8: Funció de densitat de potència espectral.

Un altre mètode per comprovar que les senyals del principi de la coherència són degudes a freqüències del cos rígid és aplicant el mètode del MAC, **Modal Assurance Criterion**, aquest és un indicador estadístic que normalment es mostra com una matriu, sensible a grans diferències en els modes de vibració, mostra si hi ha una bona consistència entre aquests.

La matriu conté tots els valors de comparació de tots els parells de vectors. Quan comparem vectors que descriuen el mateix mode físic de vibració produeixen valors pròxims a la unitat, en cas de valors inferiors podria indicar modes pobrament excitats. Si comparem vectors de modes diferents, aquests s'haurien d'aproximar a zero.

Taula 1: Modal Assurance Criterion (MAC).

| Mode N ^o | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 | Mode 4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Mode 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Mode 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Mode 3 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Mode 4 | 0 | 0 | 0 | 1 |

En el cas que estiguem capturant modes de cos rígid, en la Taula 1 fora de la diagonal, apareixerien valors considerables diferents de zero.

Temps.

Aquesta funció mostra el temps necessari que necessita l'element per esmorteir l'excitació induïda com a senyal d'entrada. La Figura 9, mostra com la senyal d'entrada es va atenuant fins a quedar saturada al cap d'un segon. Aquesta visualització és útil per establir el temps d'adquisició mínim.

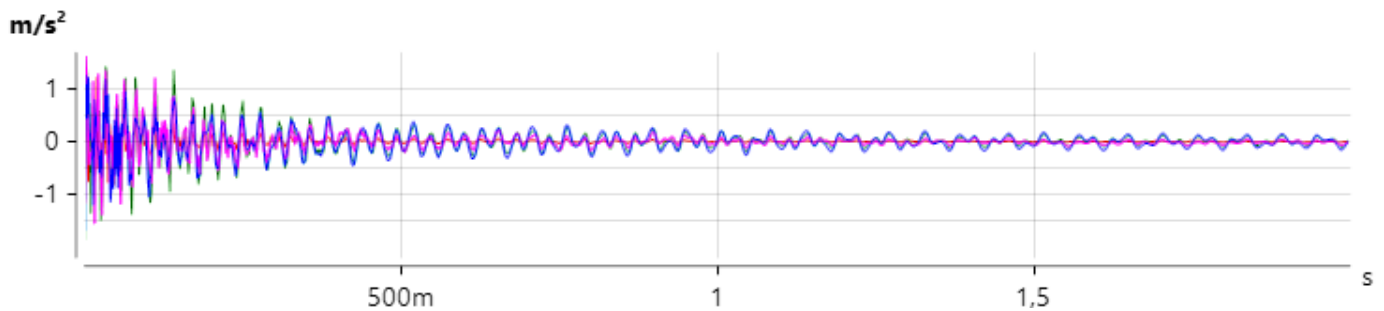


Figura 9: Funció de temps.

2.1.2 Identificació del dany

L'apartat conté una revisió de la literatura tècnica que suposa la detecció i la caracterització de danys estructurals mitjançant tècniques que examinen els canvis en la resposta de les vibracions estructurals mesurades.

Els mètodes d'identificació dinàmica es classifiquen segons les dades i la tècnica d'anàlisi necessàries. Les categories d'anàlisi inclouen canvis en els modes de vibració mesurats, canvis en la curvatura del mode de vibració/deformació unitària del mode de vibració i veure variacions de les vibracions utilitzant models d'elements finits.

Aquests sistemes s'han escollit ja que són els mètodes d'identificació amb una relació més pròxima amb l'estudi d'aquest document.

Canvis en els modes de vibració.

L'ús dels modes de vibració per detectar dany en les estructures és un tema que ha estat estudiat per varis investigadors en els últims anys.

Salawu i Williams [6] van mostrar com en una reparació d'un pont d'autopista del Regne Unit, fent una comparativa de les freqüències naturals, abans i després de la restauració, aquestes no havien sofert un canvi substancial, mentre que utilitzant l'indicador MAC es mostraven valors clarament superiors a zero fora de la diagonal de la matriu indicant quins modes havien estat afectats.

Yang, et al. [7] van desenvolupar un algoritme que relacionava els modes de vibració amb la rigidesa de l'element, capaç de detectar les zones amb dany estructural.

Canvis en la curvatura dels modes/en la deformació unitària dels modes de vibració.

Una alternativa a utilitzar els canvis dels modes de vibració per obtenir informació espacial sobre els canvis de vibracions és utilitzar derivades dels modes, com és la curvatura del mode.

Per a bigues, la curvatura i la deformació a flexió estan directament relacionades per la següent expressió:

$$\varepsilon = \frac{y}{R} = ky \quad \text{exp (4)}$$

On ε és la deformació unitària, R és el radi de curvatura, i k és la curvatura o $1/R$.

Els problemes pràctics de mesurar la deformació unitària directament o extreure-la dels desplaçaments o acceleració és discutit per varis investigadors.

Chance, et al. [8] van utilitzar assaigs experimentals, on mesuraven les esquerdes amb galgues extensomètriques, i models d'elements finits per extreure'n els modes de vibració i curvatures, les quals feia servir per detectar fissures. L'estudi mostra una bona correlació entre el model numèric i l'assaig experimental, també es pot veure com de sensible és el canvi de la curvatura del mode quan l'element té una fissura.

Nwosu, et al. [9] en el seu estudi, mostra com l'ús de les freqüències naturals com indicadors del creixement de les fissures no és un bon sistema. Per obtenir millors resultats s'ha d'utilitzar el moment a flexió com a indicador.

En general, els millors resultats s'obtenen en mesurar la deformació unitària directament, en lloc de mesurar la curvatura directament.

Models d'elements finits.

Un estudi de Shen i Chu [10] detectava variacions en el domini freqüència/temps quan en el model representava l'existència d'una fissura que s'obria i es tancava en diferents esgrons temporals.

Krawczuk i Ostachowicz [11] van elaborar un model d'una biga amb fissura que s'obria i es tancava, on en aquest, es podia detectar la variació de la rigidesa i de la freqüència segons el nivell d'obertura de l'esquerda.

2.2 Normativa

Les normes relacionades amb l'estat estructural dels tirants de l'edifici hauran de ser les incloses en el Codi Tècnic de l'edificació.

A continuació s'exposen les legislacions/normes més rellevants pel context d'aquest document.

- **DB-SE:** Aquesta norma estableix el requisits tècnics que garanteix el correcte comportament estructural de l'edifici, davant accions o actes en que es pugui sotmetre durant la construcció i el seu ús [12].
- **DB-SE-A:** La norma verifica la seguretat estructural dels elements metàl·lics realitzats amb acer en edificació. Aquesta fa referència a la seguretat davant de condicions adequades d'utilització i també aspectes relatius a la durabilitat [13].

2.3 Materials

L'acer, el formigó i el vidre són els materials predominants de l'estructura, però dins d'aquestes dues famílies hi ha diverses tipologies que han estat utilitzades per la construcció d'aquest edifici.

El document es centrarà en els tirants d'acer on les seves característiques es mostren a continuació.

Es pot saber de quin material estan constituïts els tirants, gràcies als plànols adjunts de l'informe [1] i mostrats en l'annex 14.

El material és acer F1140, l'equivalent en nomenclatura AISI és la 1045.

- **Acer AISI 1045:** Aquest és un acer al carboni, no aliat, formulat per a la formació primària en productes forjats. Amb una resistència moderada entre els acers al carboni, utilitzat normalment per a la fabricació de maneguets, cargols, bieles, eixos i cadenes.

L'acer AISI 1045 pot ser tractat tèrmicament amb flama o per enduriment per inducció.

Taula 2: Propietats mecàniques de l'acer inoxidable AISI 1045 [14].

| AISI 1045 | Unitats | Valors |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| Densitat | kg/m ³ | 7800 |
| E, Mòdul de Young | MPa | 190000 |
| ν , Coeficient de Poisson | - | 0.29 |
| Coeficient d'Expansió Tèrmica | K ⁻¹ | 12e ⁻⁶ |

3. ESTRUCTURA

L'estructura de l'estudi esta formada pels següents elements:

3.1 Sistema de tirants

Els tirants de l'estudi, estan formats per un conjunt de barres d'acer de 100mm de diàmetre i de longitud variable en funció del tram. En la següent Figura 10, es mostra el conjunt de barres del sistema de tirants, que hi ha en el voladís de cada edifici del campus de Telefónica.

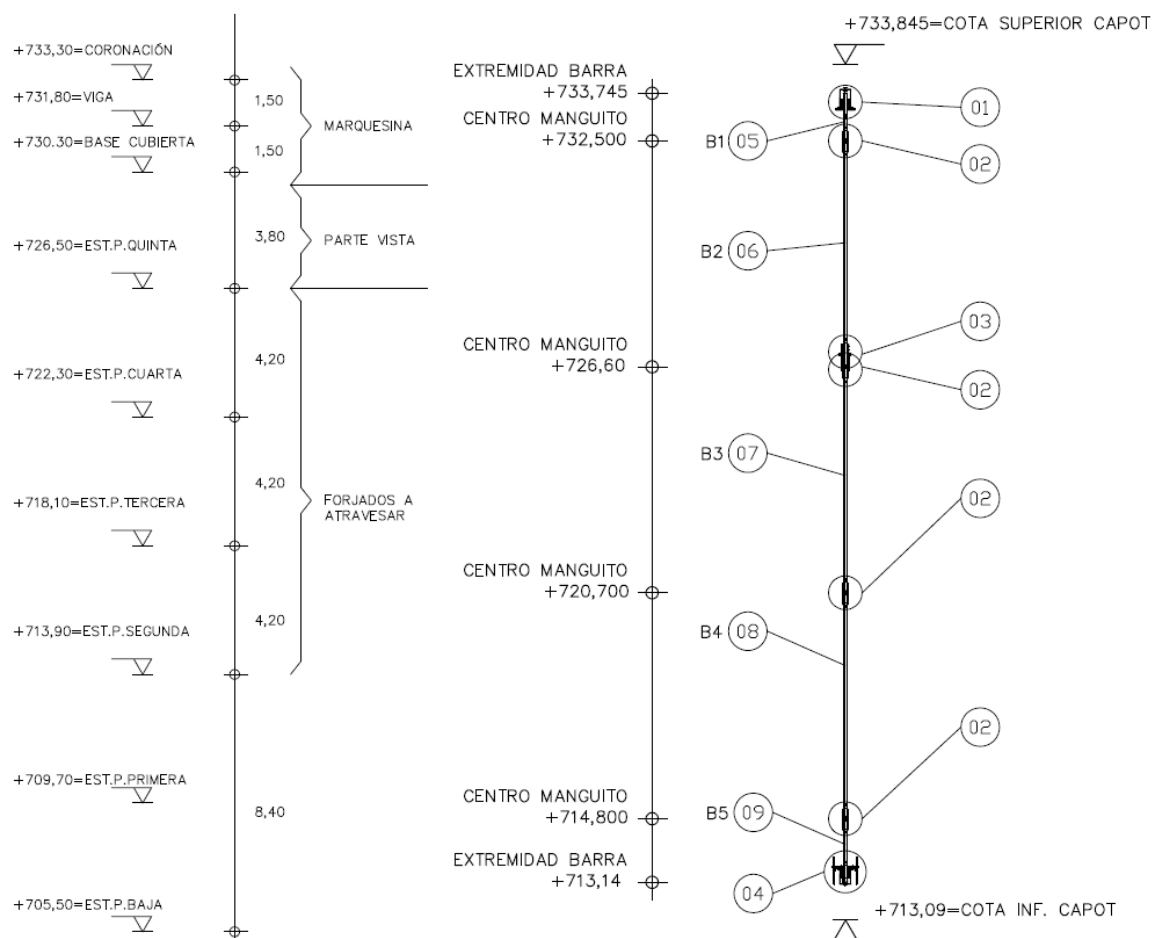
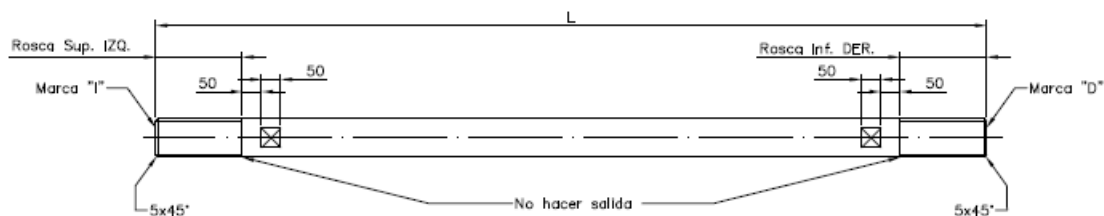


Figura 10: Sistema de tirants [1].

3.2 Barres del sistema de tirants

En la següent Figura 11, es mostren les característiques de cada barra que formen el sistema de tirants. En el caixetí de la figura es pot veure com es relaciona la longitud total de la barra i la longitud de rosca depenent de la seva disposició, Figura 10.



| Barra n° | Ref. plano 150-020-000 | Rosca Sup. IZQ | Rosca Inf. DER. | L | CANTIDAD |
|----------|------------------------|----------------|-----------------|------|----------|
| B1 | ⑤ | 550 | 225 | 1195 | 12 unid. |
| B2 | ⑥ | 225 | 585 | 5800 | 12 unid. |
| B3 | ⑦ | 225 | 225 | 5800 | 12 unid. |
| B4 | ⑧ | 225 | 225 | 5800 | 12 unid. |
| B5 | ⑨ | 225 | 450 | 1610 | 12 unid. |

Figura 11: Barra M100x4 [1].

3.3 Posició dels tirants dins del complex de Telefónica

El sistema de suspensió és una solució constructiva aplicada en el conjunt dels 8 edificis que mostra la Figura 12, on cada edifici té 6 tirants. Com es tracta de varis edificis, es va optar per definir cada tirant amb l'edifici al que correspon, donant-los un numero del 1 al 48. Així la identificació de cada tirant consta del nom de l'edifici al que correspon i a un número, per exemple *Este-2 tirant 25*.

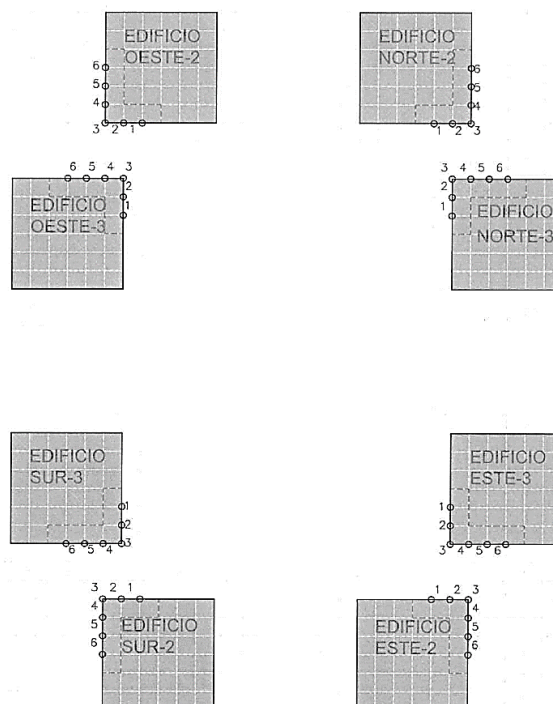


Figura 12: Posició dels tirants dins del complex de Telefónica [2].

Els tirants són visibles en la planta de coberta dels diferents edificis, així mateix segons la seva nomenclatura, en els edificis *Norte-2*, *Norte-3*, *Este-2* i *Este-3*, correspondrà a la cinquena planta i en la resta dels edificis a la planta quarta.

Segons l'informe de protocol [1], els tirants en les plantes inferiors després d'aplicar un posttesat es va procedir a la injecció de morter en les beines, mentre que la unió superior del tirant és un ancoratge (Figura 10, veure annex 14), que es situa per sobre de les bigues metàl·liques i al qual transmet les càrregues. El pas a través d'aquestes es realitza per unes beines construïdes a tal efecte. A continuació, es pot observar la secció genèrica.

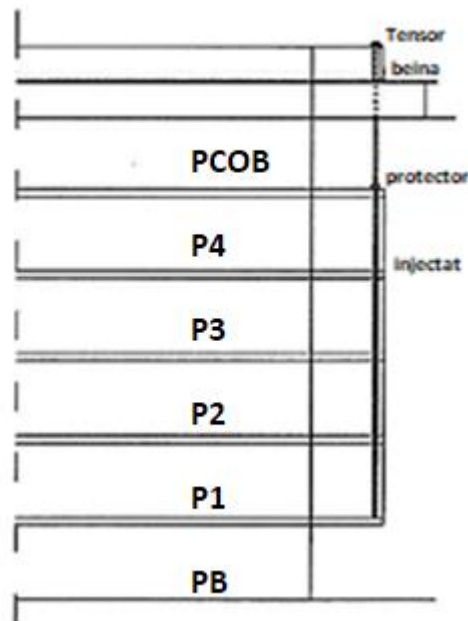


Figura 13: Secció transversal del sistema de tirants.

De la part visible del tirant només es pot accedir a la meitat inferior corresponent a la planta de coberta.

4. METODOLOGIA D'ADQUISICIÓ DE DADES

4.1 Equip d'adquisició

Per a poder determinar una freqüència natural i el seu corresponent mode de vibració s'ha d'induir una senyal vibratòria en l'element i mesurar la senyal de sortida.

El mètode d'introduir la senyal vibratòria per les mesures de les freqüències modals, és excitant els tirants utilitzant un martell d'impacte instrumentat de *PCB Piezotronics* de 160 grams, les vibracions són recollides per mitjà d'acceleròmetres uniaxials *Hottinger, Brüel & Kjaer* model 45007 002 de 4.8 grams de pes, capaços de treballar en un rang de freqüències de 0.4 a 6000Hz.

La informació és adquirida per un analitzador de senyal *Hottinger, Brüel & Kjaer* model 3053, capaç de captar 131k mostres cada segon, juntament amb el mòdul de bateria model 2831 i utilitzant el software *BK Connect* instal·lat en un ordinador portàtil, el qual emmagatzema la informació. Per aquest cas la configuració bàsica de l'adquisició és la següent, Figura 14.



1.n- Punt d'impacte; 2- Acceleròmetre; 3- Portàtil;
4- Martell d'impacte; 5- Analitzador de senyal.

Figura 14: Configuració bàsica de l'adquisició.

4.2 Definició de l'assaig

Per la caracterització dels tirants es proposa fer una adquisició completa de tots els tirants, d'on s'estudiarà el comportament estàndard d'aquests en funció de si esta en un rang de valors mig.

En cas de detectar un comportament anòmal, valors fora del rang mig en algun dels tirants, es procedirà a la realització de la caracterització completa d'aquest.

Com s'ha comentat, per la caracterització s'utilitza l'anàlisi modal, on és necessari determinar les freqüències naturals per a cada tirant i el seu mode de vibració. Per a observar el mode de vibració de l'element, s'ha d'obtenir durant l'assaig, el desplaçament que ha sofert el tirant en varis punts (punts nodals). La definició d'aquests punts és essencial per a la correcta observació dels modes de vibració.

Per a configurar correctament l'assaig s'han de preveure els modes que s'esperen observar, i per tant establir els punts on volem obtenir la informació. En la Figura 15 es poden observar el modes esperats. Com s'ha dit, només hi ha accés a la part inferior del tirant, així que els modes de vibració que s'han d'obtenir han de coincidir amb la meitat inferior mostrats en la imatge.

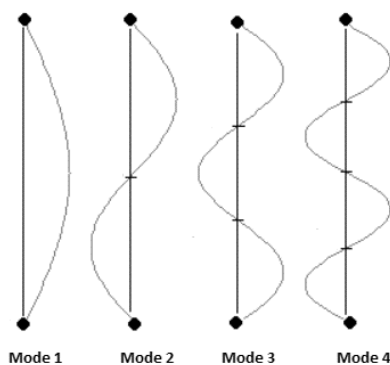


Figura 15: Modes de deformació esperats.

La configuració final de l'assaig és la que es pot observar en detall en la Figura 16. En aquesta es pot veure la definició dels quatre punts on es realitzen els impactes, en dos d'aquests punts d'ells es situen els acceleròmetres. Aquesta distribució correspon en situar el punt 1 i el 4 en els extrems accessibles del tirant i situar dos punts entre ells per capturar correctament el mode, el punt 4 també ajuda a identificar si la zona del tirant en contacte amb el forjat es mobilitza juntament amb el tirant o és un punt fixe.

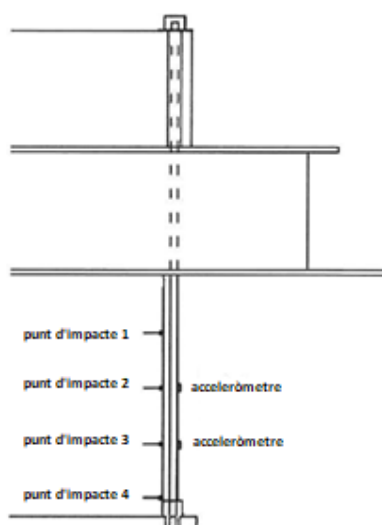


Figura 16: Configuració de l'assaig.

5. ADQUISICIÓ DE DADES

5.1 Preparació de l'adquisició

Per a començar amb l'adquisició haurem d'establir quin rang de freqüències capturar, per fer això un cop l'equip està instal·lat cal establir l'ample de banda on es trobaran les primeres freqüències naturals del tirant i el temps d'adquisició. En un primer impacte es comprova que les primeres freqüències es troben al voltant dels 100Hz.

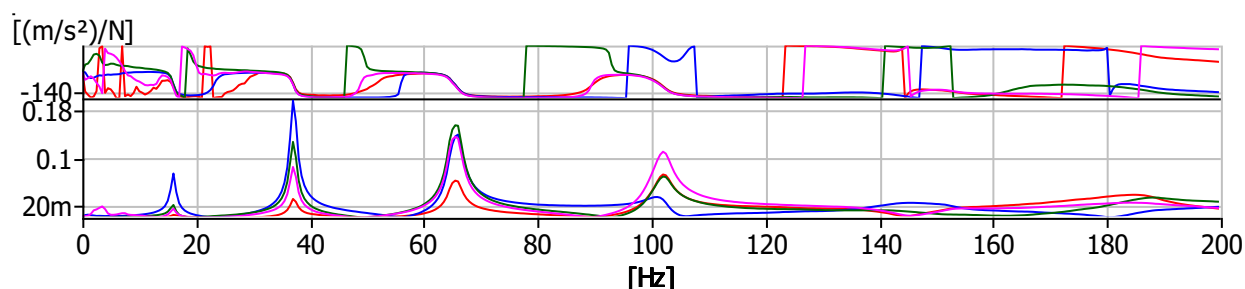


Figura 17: Configuració de l'ample de freqüències.

Per evitar l'efecte de *aliasing* o solapament, i tal com descriu Nyquist, definim l'ample de banda amb un valor de 2 vegades el màxim de la freqüència que volem observar, així que el nostre ample de banda és de 200Hz i 2 segons (Si observem en la Figura 18, la senyal queda esmorteïda al cap d'un segon).

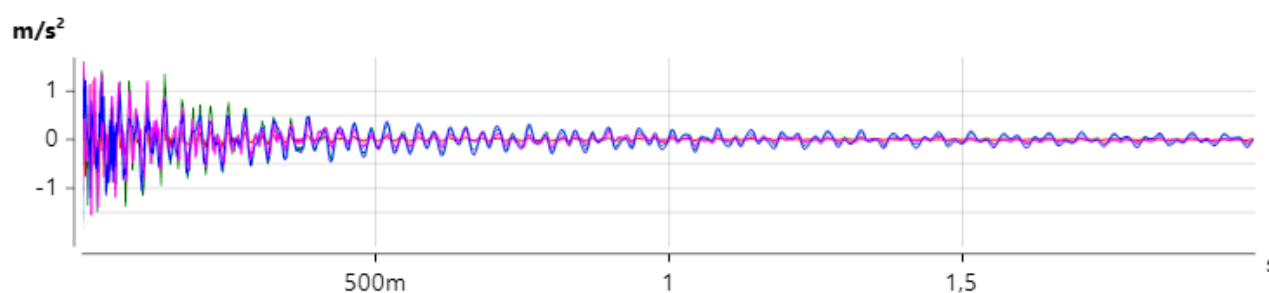
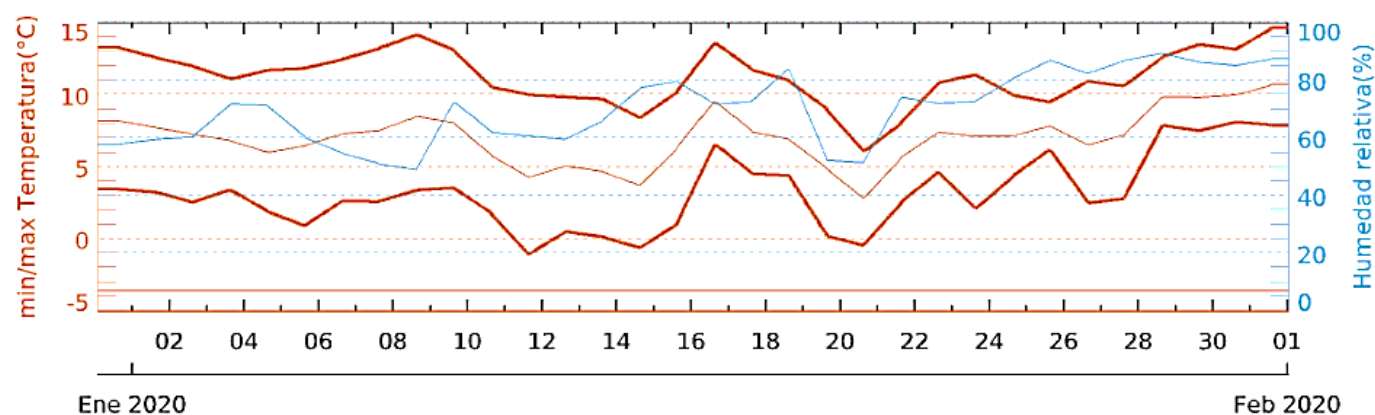
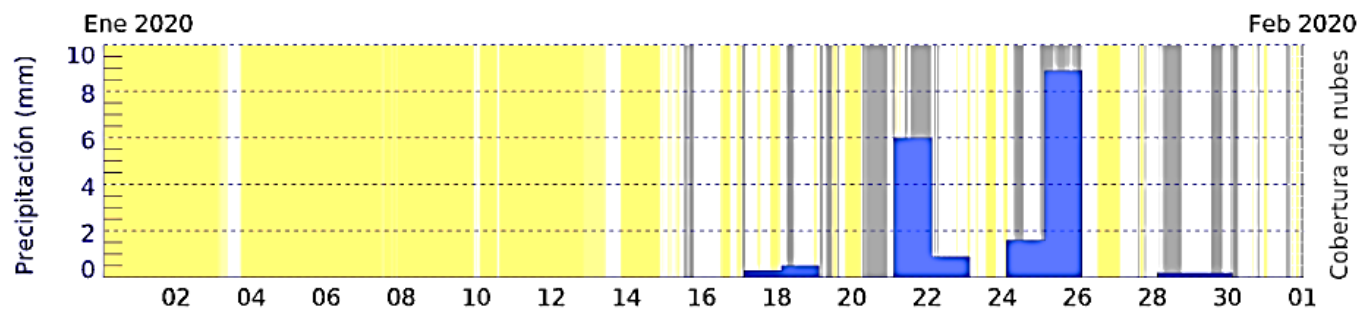


Figura 18: Configuració esmorteïment i temps d'adquisició.

Els dies de l'adquisició es van realitzar en les dates 29 i 30 de gener del 2020, on les condicions meteorològiques per aquells dies van ser les següents:

Temperatures màximes, mínimes, mitja i humitat relativa.



Precipitacions.**5.2 Resultats de l'adquisició**

En aquest apartat es presenten les dades adquirides durant els assaigs. Les taules mostren els tirants per edifici i les quatre primeres freqüències naturals de cada tirant, on els valors entre parèntesis corresponen a les dades del 2011 [2] i així oferir una ràpida comparativa amb les dades adquirides a data del document.

Taula 3: Freqüències dels tirants del Norte-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Norte-2 | 1 | 1 | 2020 | 15.50 | 37.00 | 65.00 | 101.50 |
| | | | 2011 | (15.63) | (37.60) | (63.96) | (98.88) |
| | 2 | 2 | 2020 | 16.00 | 37.50 | 66.00 | 100.50 |
| | | | 2011 | (16.36) | (37.60) | (65.43) | (98.14) |
| | 3 | 3 | 2020 | 17.00 | 41.50 | 76.50 | 117 |
| | | | 2011 | (17.33) | (42.48) | (77.15) | (115.23) |
| | 4 | 4 | 2020 | 16.00 | 37.50 | 65.5 | 101.00 |
| | | | 2011 | (16.11) | (37.35) | (65.67) | (100.10) |
| | 5 | 5 | 2020 | 15.50 | 36.00 | 64.00 | 98.00 |
| | | | 2011 | (15.38) | (36.13) | (63.96) | (97.66) |
| | 6 | 6 | 2020 | 16.00 | 37.00 | 65.5 | 102.5 |
| | | | 2011 | (15.87) | (36.87) | (65.19) | (---) |

Taula 4: Freqüències dels tirants del Norte-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Norte-3 | 7 | 1 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 59.50 | 89.00 |
| | | | 2011 | (14.65) | (33.69) | (59.08) | (90.33) |
| | 8 | 2 | 2020 | 17.50 | 40.50 | 70.00 | 105.00 |
| | | | 2011 | (17.33) | (40.04) | (68.85) | (104.49) |
| | 9 | 3 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.50 | 90.00 |
| | | | 2011 | (13.43) | (31.98) | (58.11) | (89.36) |
| | 10 | 4 | 2020 | 15.50 | 36.00 | 64.00 | 98.50 |
| | | | 2011 | (14.89) | (34.42) | (60.79) | (93.75) |
| | 11 | 5 | 2020 | 19.00 | 46.00 | 81.50 | 123.00 |
| | | | 2011 | (15.14) | (30.03) | (52.98) | (84.23) |
| | 12 | 6 | 2020 | 19.50 | 48.00 | 86.00 | 131.00 |
| | | | 2011 | (19.78) | (48.10) | (86.18) | (130.62) |

Taula 5: Freqüències dels tirants del Sur-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Sur-2 | 13 | 1 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.00 | 89.5 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (58.59) | (88.13) |
| | 14 | 2 | 2020 | 14.50 | 33.50 | 59.50 | 92.00 |
| | | | 2011 | (14.40) | (33.69) | (60.06) | (---) |
| | 15 | 3 | 2020 | 12.50 | 30.50 | 56.50 | 88.00 |
| | | | 2011 | (12.45) | (30.76) | (56.88) | (---) |
| | 16 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.00 | 59.50 | 91.50 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.96) | (59.08) | (---) |
| | 17 | 5 | 2020 | 13.00 | 31.00 | 55.50 | 87.50 |
| | | | 2011 | (12.70) | (30.76) | (55.18) | (86.67) |
| | 18 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.50 | 91.50 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.23) | (58.11) | (---) |

Taula 6: Freqüències dels tirants del Sur-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Sur-3 | 19 | 1 | 2020 | 13.00 | 31.00 | 57.00 | 84.50 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (56.64) | (85.45) |
| | 20 | 2 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 60.00 | 94.50 |
| | | | 2011 | (14.16) | (32.96) | (58.59) | (89.36) |
| | 21 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.50 | 56.00 | 85.50 |
| | | | 2011 | (12.45) | (30.52) | (55.91) | (84.72) |
| | 22 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 60.00 | 93.00 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.69) | (60.55) | (---) |
| | 23 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.50 | 91.50 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (58.35) | (90.58) |
| | 24 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.50 | 91.00 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (58.59) | (90.82) |

Taula 7: Freqüències dels tirants del Este-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Este-2 | 25 | 1 | 2020 | 14.00 | 34.00 | 61.50 | 95.00 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.20) | (60.55) | (93.02) |
| | 26 | 2 | 2020 | 15.00 | 34.50 | 62.50 | 95.00 |
| | | | 2011 | (14.89) | (34.91) | (62.74) | (94.48) |
| | 27 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.00 | 56.00 | 87.50 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.27) | (56.88) | (88.87) |
| | 28 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 61.00 | 94.50 |
| | | | 2011 | (14.16) | (33.94) | (61.52) | (93.99) |
| | 29 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 59.00 | 91.00 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (59.33) | (91.55) |
| | 30 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 58.50 | 90.00 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.98) | (58.35) | (90.09) |

Taula 8: Freqüències dels tirants del Este-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Este-3 | 31 | 1 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 61.50 | 92.00 |
| | | | 2011 | (14.16) | (34.42) | (61.77) | (92.04) |
| | 32 | 2 | 2020 | 14.50 | 34.50 | 62.00 | 94.50 |
| | | | 2011 | (14.65) | (34.91) | (62.99) | (95.21) |
| | 33 | 3 | 2020 | 12.50 | 31.50 | 59.00 | 90.00 |
| | | | 2011 | (12.94) | (32.23) | (60.06) | (91.55) |
| | 34 | 4 | 2020 | 14.50 | 34.50 | 62.50 | 94.00 |
| | | | 2011 | (14.40) | (34.42) | (62.50) | (94.48) |
| | 35 | 5 | 2020 | 13.50 | 33.50 | 61.00 | 94.50 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.69) | (61.52) | (93.51) |
| | 36 | 6 | 2020 | 14.00 | 34.00 | 62.00 | 94.50 |
| | | | 2011 | (14.16) | (34.18) | (62.26) | (94.97) |

Taula 9: Freqüències dels tirants del Oeste-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Oeste-2 | 37 | 1 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 57.50 | 88.50 |
| | | | 2011 | (13.43) | (31.74) | (57.37) | (86.91) |
| | 38 | 2 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 61.00 | 95.50 |
| | | | 2011 | (14.40) | (33.94) | (60.55) | (94.24) |
| | 39 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.50 | 56.00 | 89.50 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.27) | (55.91) | (88.87) |
| | 40 | 4 | 2020 | 13.00 | 32.50 | 58.00 | 92.00 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.47) | (58.35) | (91.80) |
| | 41 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.50 | 90.50 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.47) | (58.35) | (91.58) |
| | 42 | 6 | 2020 | 13.50 | 33.00 | 59.00 | 93.00 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (59.08) | (---) |

Taula 10: Freqüències dels tirants del Oeste-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| Oeste-3 | 43 | 1 | 2020 | 13.00 | 31.50 | 57.50 | 91.00 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (57.13) | (87.89) |
| | 44 | 2 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 60.00 | 93.00 |
| | | | 2011 | (14.16) | (33.45) | (59.57) | (92.77) |
| | 45 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.00 | 56.00 | 86.00 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.52) | (56.15) | (84.96) |
| | 46 | 4 | 2020 | 14.00 | 32.50 | 58.50 | 92.00 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (58.84) | (92.04) |
| | 47 | 5 | 2020 | 13.00 | 31.50 | 57.00 | 90.00 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (57.13) | (89.84) |
| | 48 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 58.00 | 92.00 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (58.35) | (---) |

La informació de les taules es representa en la Figura 19. En el gràfic es mostren les dades adquirides en el 2011 [2] i el 2020, de les quatre primeres freqüències naturals per cada tirant, mostrats en l'eix vertical i l'horitzontal respectivament.

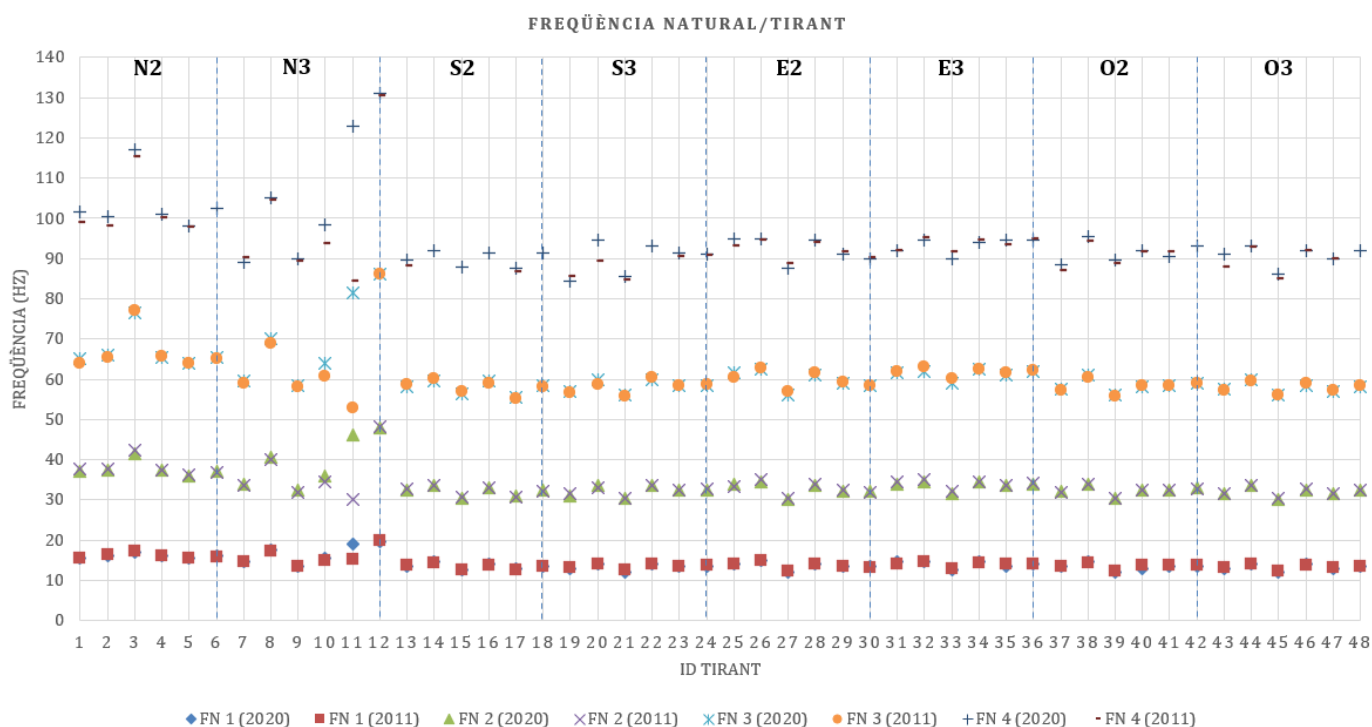


Figura 19: Gràfic de les quatre freqüències naturals per tirant.

Una primera observació que es pot fer si es comparen les dades del 2011 amb les del 2020 del gràfic anterior, es pot veure com la majoria de valors coincideixen, excepte en els tirants 10 i 11 del edifici Norte-3, tal i com es pot veure més endavant en detall en la Figura 20, on només es mostren les dades de l'edifici Norte-3.

En el següent apartat es farà un estudi més exhaustiu per veure si efectivament es tracta de dades anòmales.

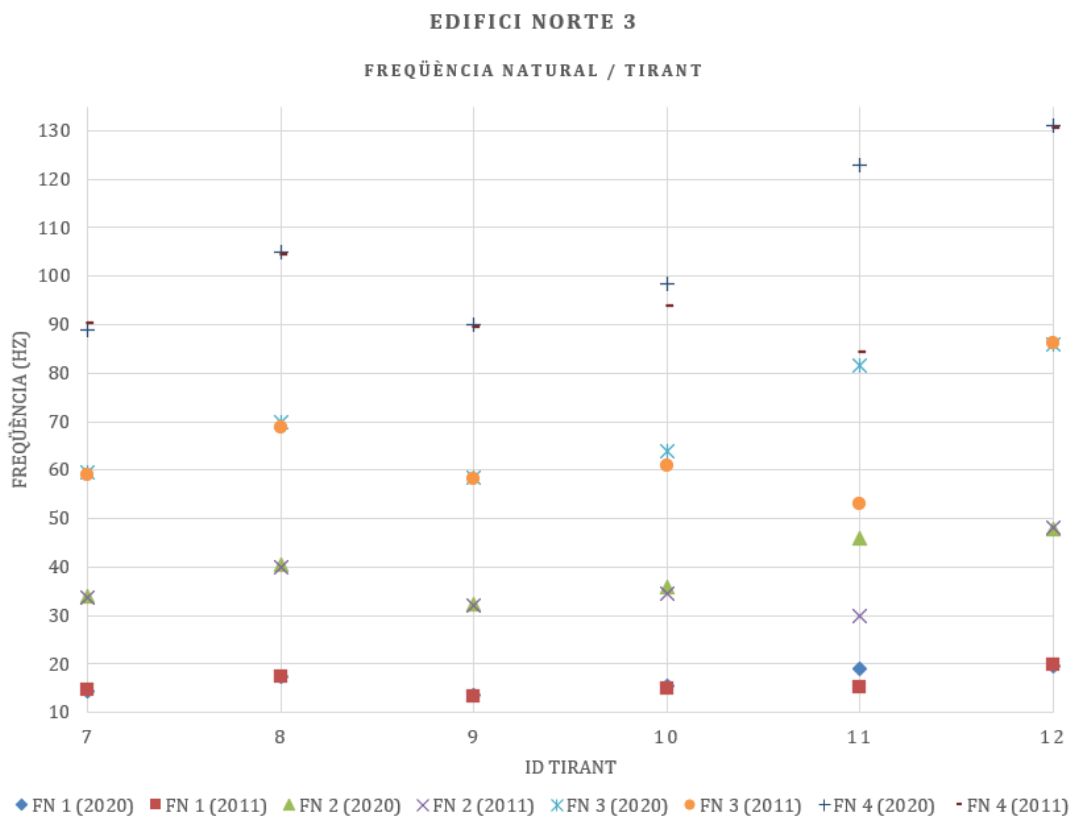


Figura 20: Gràfic de les quatre freqüències naturals per tirant del edifici Norte 3.

6. ANÀLISI DE RESULTATS

En aquest apartat es pretén estudiar, si els tirants presenten un comportament similar entre ells. Per això s'analitza si aquests es comporten dins d'un rang de dades acotat. Es tracta de veure si les freqüències dels tirants de tots els edificis, tenen valors similars dins de cada freqüència natural.

6.1 Detecció de casos anòmals

El primer pas pel tractament de dades, és el càlcul de la mitjana aritmètica, utilitzant la següent expressió:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{exp (5)}$$

Seguidament la desviació i la desviació mitjana és calculada:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{exp (6)}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad \text{exp (7)}$$

La raó d'utilitzar **N-1** enlloc de **N** en el denominador, està explicat en varis llibres de text especialitzats d'anàlisi estadístic.

Una baixa desviació indica que la majoria dels valors de la mostra tendeixen a estar agrupats a prop de la zona de la mitja, mentre que un valor de desviació alt indica que els valors estan allunyats de la mitja.

Finalment s'estableixen els intervals de confiança per un valor del 95%.

$$IC = \bar{x} \pm \frac{z \bar{\sigma}}{\sqrt{N}} \quad \text{exp (8)}$$

El límit superior es troba amb l'equació amb suma i el límit inferior amb l'equació amb resta.

On **z** es la distribució normal inversa.

A continuació, en la Taula 11, es mostren les dades per la primera freqüència.

Taula 11: Valors estadístics per la primera freqüència.

| | Freqüència 1 | |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|
| Any d'adquisició | 2020 | 2011 |
| Mínima | 12.00 | 19.78 |
| Màxima | 19.50 | 12.21 |
| Mitjana aritmètica | 14.20 | 14.17 |
| Desviació mitjana | 0.17 | 0.15 |
| Límit inferior Confiança 95% | 14.15 | 14.12 |
| Límit Superior Confiança 95% | 14.25 | 14.21 |

Una primera lectura indica, que els valors es troben relativament agrupats. Per veure amb més profunditat aquests valors es presenten en el diagrama de caixes de la següent Figura 21.

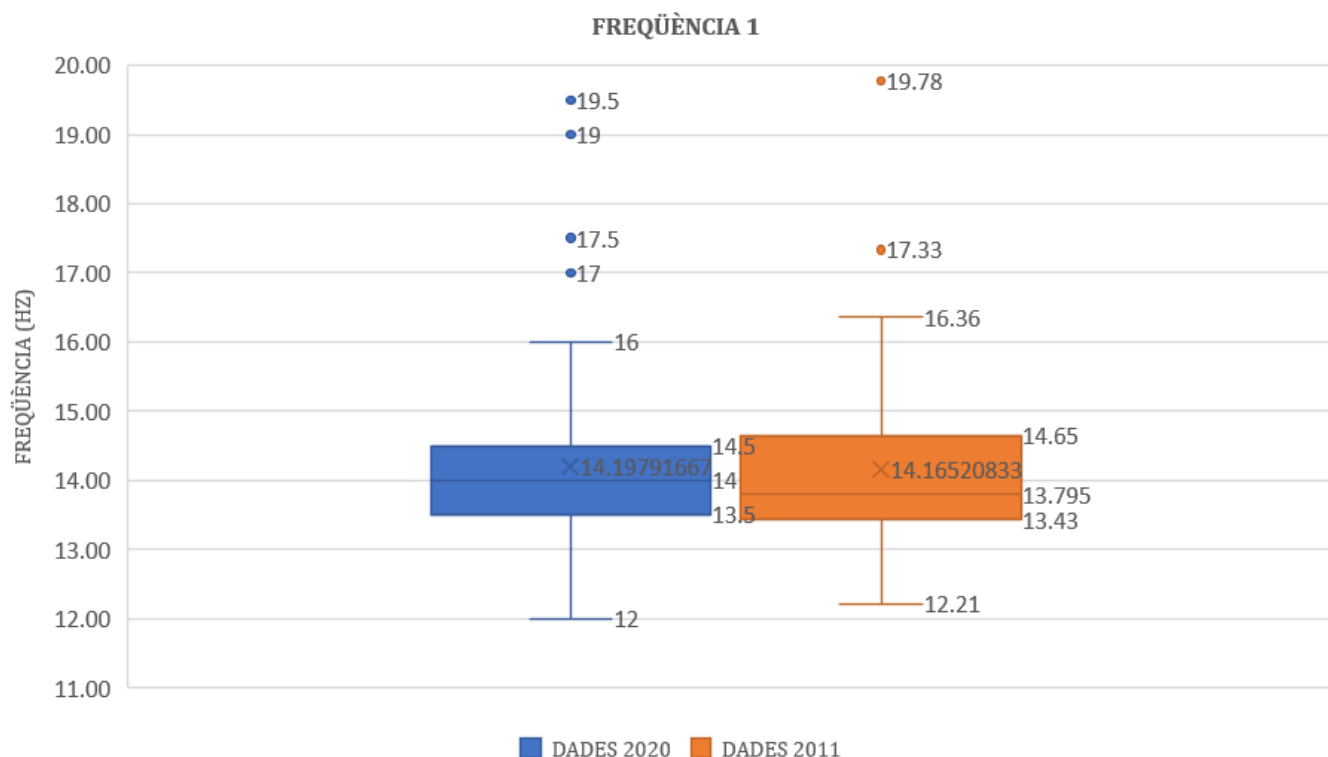


Figura 21: Diagrama de caixes per la primera freqüència.

Es pot veure com una part significativa dels valors es troba al voltant de la part mitja. També podem veure 4 valors extrems per l'adquisició del 2020, corresponents als tirants 3 del Norte-2 i als tirants 8, 11 i 12 del Norte-3. L'adquisició del 2011 mostra tres valors extrems corresponents als tirants 3 del Norte-2, 8 i 12 del Norte-3.

Si analitzem la segona freqüència observem la mateixa tendència a tenir valors agrupats, Taula 12.

Taula 12: Valors estadístics per la segona freqüència.

| Freqüència 2 | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Any d'adquisició | 2020 | 2011 |
| Mínima | 30.00 | 30.03 |
| Màxima | 48.00 | 48.10 |
| Mitjana aritmètica | 34.04 | 33.74 |
| Desviació mitjana | 0.35 | 0.31 |
| Límit inferior Confiança 95% | 33.94 | 33.65 |
| Límit Superior Confiança 95% | 34.14 | 33.83 |

Observant el diagrama de caixes, Figura 22, ens indica valors extrems pels mateixos tirants vistos per la primera freqüència.

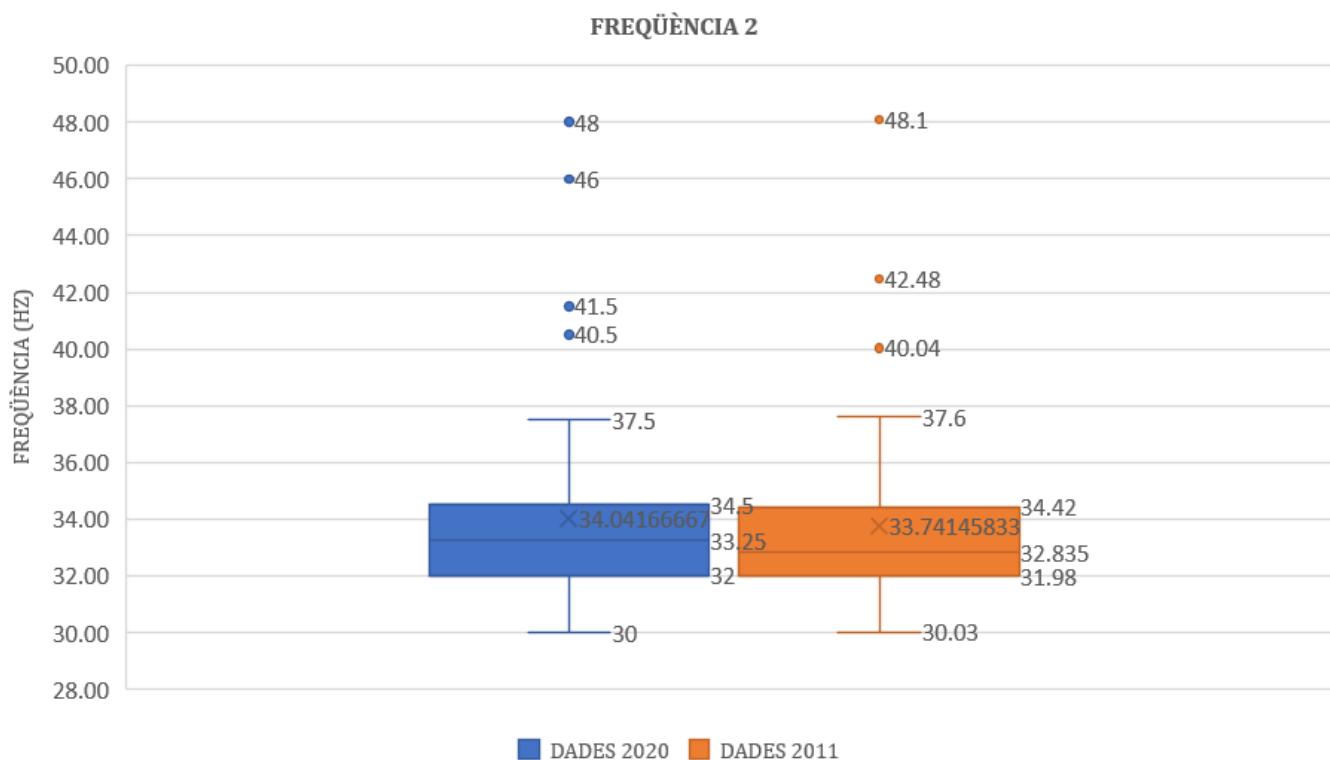


Figura 22: Diagrama de caixes per la segona freqüència.

Per la tercera i quarta freqüència els valors extrems, segueixen sortint pels mateixos tirants que en les freqüències anteriors.

Taula 13: Valors estadístics per la tercera freqüència.

| Freqüència 3 | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Any d'adquisició | 2020 | 2011 |
| Mínima | 55.50 | 52.98 |
| Màxima | 86.00 | 86.18 |
| Mitjana aritmètica | 61.31 | 60.65 |
| Desviació mitjana | 0.58 | 0.50 |
| Límit inferior Confiança 95% | 61.15 | 60.51 |
| Límit Superior Confiança 95% | 61.48 | 60.79 |

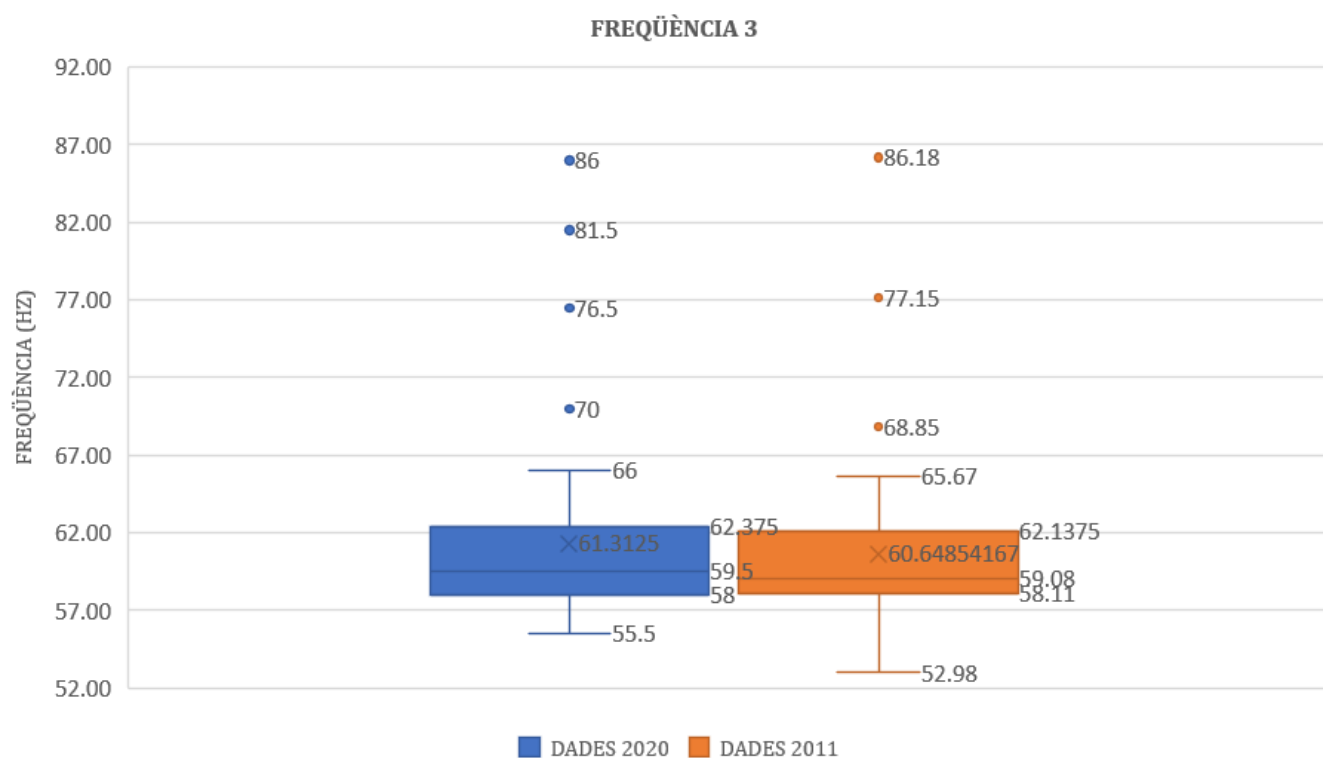


Figura 23: Diagrama de caixes per la tercera freqüència.

Taula 14: Valors estadístics per la quarta freqüència.

| | Freqüència 4 | |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|
| Any d'adquisició | 2020 | 2011 |
| Mínima | 84.50 | 84.23 |
| Màxima | 131.00 | 130.62 |
| Mitjana aritmètica | 94.64 | 93.33 |
| Desviació mitjana | 0.81 | 2.88 |
| Límit inferior Confiança 95% | 94.41 | 92.52 |
| Límit Superior Confiança 95% | 94.86 | 94.14 |

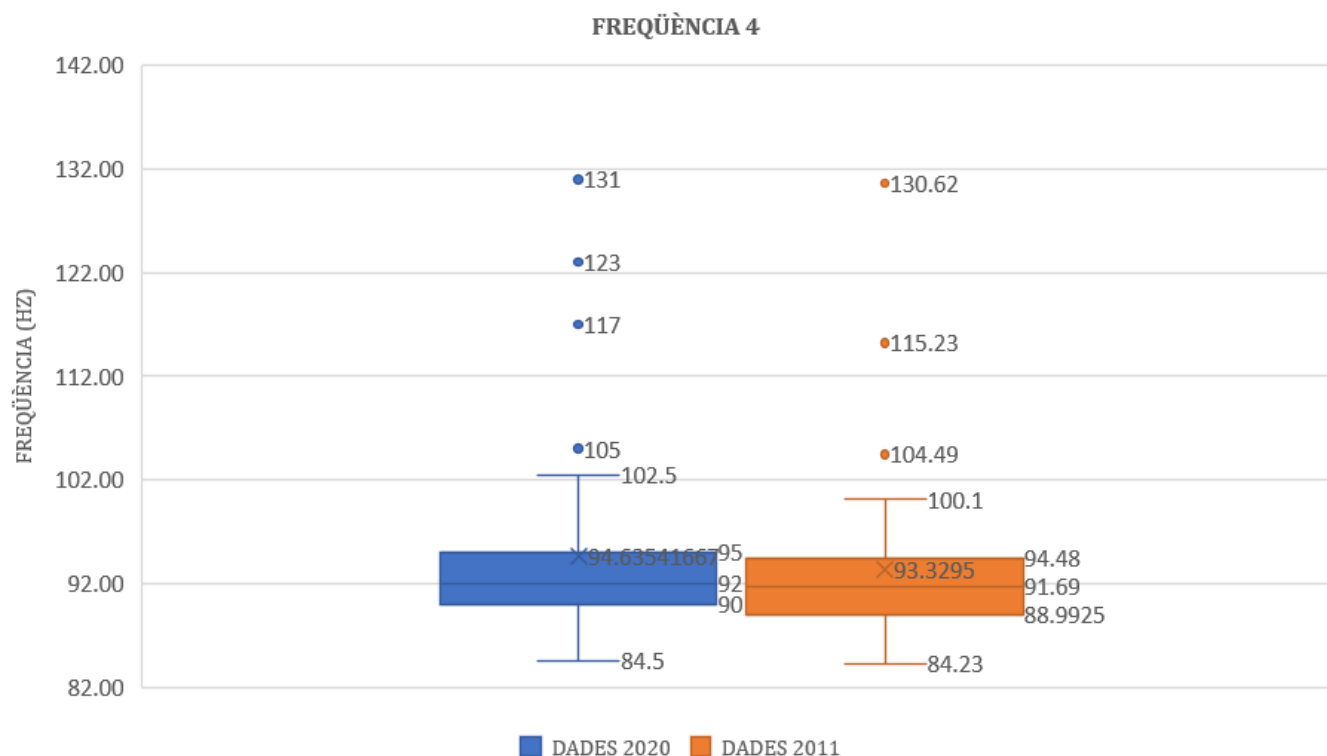


Figura 24: Diagrama de caixes per la quarta freqüència.

D'aquest estudi se n'extreu que hi han 3 tirants, el tirant 3 de l'edifici *Norte-2*, el tirant 8 i 12 de l'edifici *Norte-3*, situats en valors extrems, que coincideixen tant per l'adquisició del 2011 com per l'adquisició del 2020. Aquests tirants s'hi ha d'afegir el tirant 11 de l'edifici *Norte-3*, on s'ha pogut veure amb l'adquisició del 2020 com aquest també està en un rang extrem.

Tot aquest estudi confirma el que podíem veure en la Figura 19 i Figura 20 de l'apartat anterior, on es podia veure que els resultats de les adquisicions 2011 i 2020 no es solapaven entre ells, sobretot en el cas de l'edifici *Norte-3*. Això indica que hi hagut una evolució de les freqüències al llarg del temps, una tendència a augmentar, degut en algun canvi en l'estat de tensions o en les condicions de contorn.

6.2 Determinació de la causa

Seguidament s'intenta buscar la raó per la qual els tirants mencionats mostren un comportament anòmal. Per això es buscarà la correlació que hi ha entre les freqüències naturals per a cada tirant, ja que segons la tesis de Juan Carlos Araiza [15], on mostra que hi ha una relació clara entre la tensió d'un element estructural i la seva freqüència natural, també descriu com la modificació de les condicions del suport, força una variació en el rati d'entre la primera i segona freqüència natural.

Aquest rati entre les dues primeres freqüències, no es veu afectat per l'estat de càrregues, la variació és deguda en essència, per la no linearitat de la resposta càrrega/deformació del material, per tant, per l'alteració de la rigidesa amb la càrrega.

En les següents figures es mostra la correlació entre les freqüències per intentar detectar si el comportament dels tirants detectats fora del rang, és degut a un canvi de les condicions de contorn.

La Figura 25 és la correlació relacionada amb les condicions de contorn, on si hi ha algun tirant de comportament anòmal lluny de la línia de tendència, serà possiblement degut a una variació de les condicions de contorn.

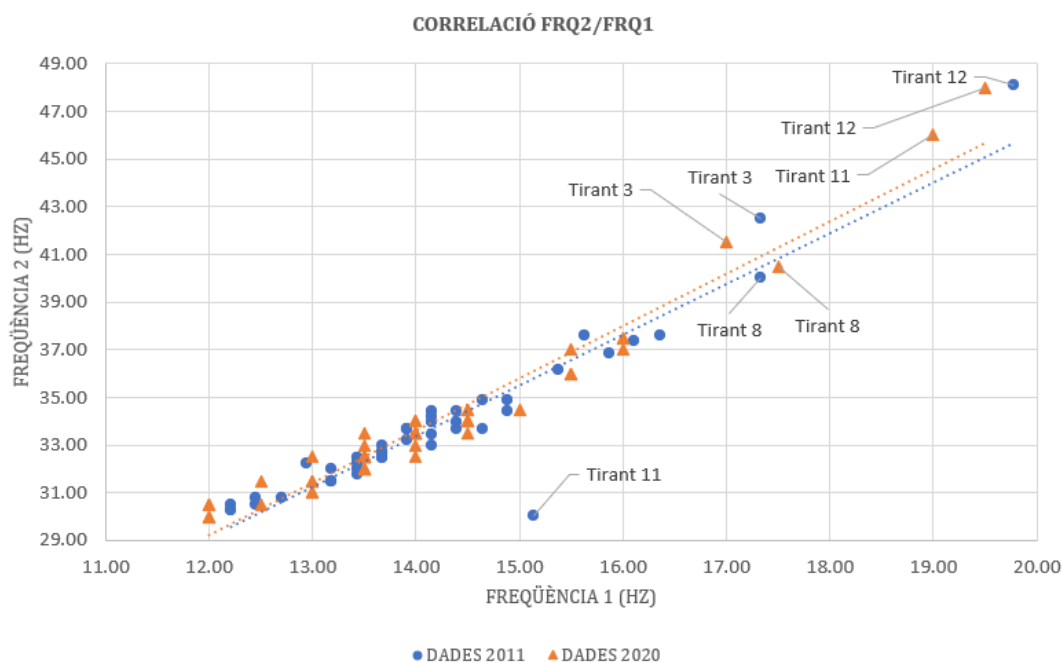


Figura 25: Correlació entre la freqüència 2 i la freqüència 1.

Es pot veure clarament com en la correlació entre la primera i segona freqüència natural, Figura 25, el tirant 11 està clarament fora de la línia de tendència. També es pot veure com els tirants 3, 8 i 12 mostren uns valors fora del grup i alguns d'ells fora de la línia de tendència. També cal destacar que cap tirant ha variat tant com el 11, de les dades adquirides en el 2011 respecte les del 2020, fet que ja es destacava en la Figura 19.

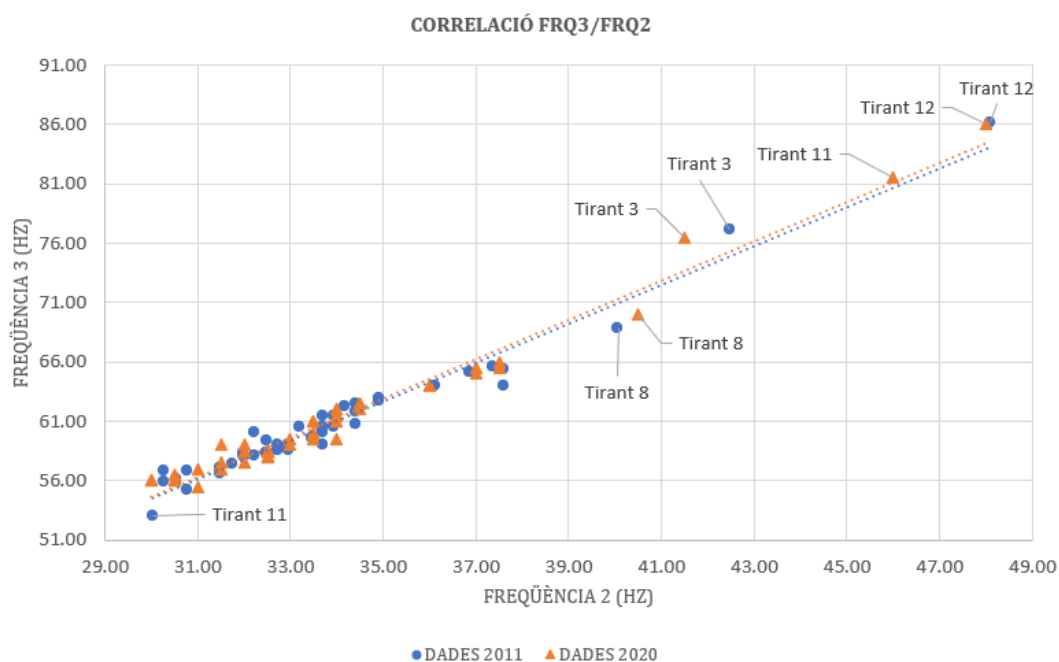


Figura 26: Correlació entre la freqüència 3 i la freqüència 2.

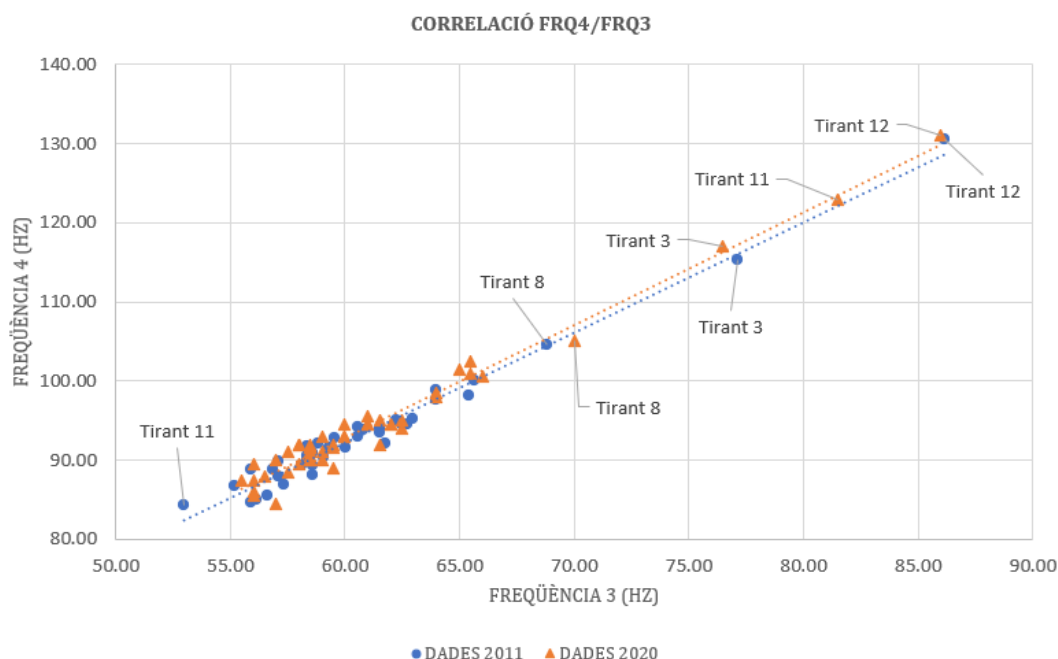


Figura 27: Correlació entre la freqüència 4 i la freqüència 3.

Els tirants destacats en la Figura 25, per la correlació entre la segona i tercera freqüència natural (Figura 26) i la correlació entre la tercera i quarta freqüència natural (Figura 27), tot i mostrar valors fora del grup, mostren valors en la línia de tendència.

6.3 Determinació de les condicions de contorn

Un cop demostrat que els valors anòmals són deguts a les condicions de contorn i no a l'estat de càrregues, podem analitzar la restricció de graus de llibertat que més s'assemblen a les condicions d'unió que es troben els tirants amb la resta d'elements estructurals.

En la tesi de Juan Carlos Araiza [15], també es demostra com elements amb condicions de contorn lliure-lliure, la relació entre la divisió de la segona freqüència amb la primera freqüència natural és pròxima a un valor de 4, mentre que per condicions embegut-embegut el valor és pròxim a 2.75.

En les taules següents apareix aquesta relació, entre la segona i primera freqüència natural, per tots els tirants de cada edifici i amb les adquisicions 2011 i 2020.

Taula 15: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Norte-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | F2/F1 |
| Norte-2 | 1 | 1 | 2020 | 15.50 | 37.00 | 2.39 |
| | | | 2011 | (15.63) | (37.60) | (2.41) |
| | 2 | 2 | 2020 | 16.00 | 37.50 | 2.34 |
| | | | 2011 | (16.36) | (37.60) | (2.30) |
| | 3 | 3 | 2020 | 17.00 | 41.50 | 2.44 |
| | | | 2011 | (17.33) | (42.48) | (2.45) |
| | 4 | 4 | 2020 | 16.00 | 37.50 | 2.34 |
| | | | 2011 | (16.11) | (37.35) | (2.32) |
| | 5 | 5 | 2020 | 15.50 | 36.00 | 2.32 |
| | | | 2011 | (15.38) | (36.13) | (2.35) |
| | 6 | 6 | 2020 | 16.00 | 37.00 | 2.31 |
| | | | 2011 | (15.87) | (36.87) | (2.32) |

Taula 16: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Norte-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Norte-3 | 7 | 1 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 2.34 |
| | | | 2011 | (14.65) | (33.69) | (2.30) |
| | 8 | 2 | 2020 | 17.50 | 40.50 | 2.31 |
| | | | 2011 | (17.33) | (40.04) | (2.31) |
| | 9 | 3 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.43) | (31.98) | (2.38) |
| | 10 | 4 | 2020 | 15.50 | 36.00 | 2.32 |
| | | | 2011 | (14.89) | (34.42) | (2.31) |
| | 11 | 5 | 2020 | 19.00 | 46.00 | 2.42 |
| | | | 2011 | (15.14) | (30.03) | (1.98) |
| | 12 | 6 | 2020 | 19.50 | 48.00 | 2.46 |
| | | | 2011 | (19.78) | (48.10) | (2.43) |

Taula 17: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Sur-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Sur-2 | 13 | 1 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (2.39) |
| | 14 | 2 | 2020 | 14.50 | 33.50 | 2.31 |
| | | | 2011 | (14.40) | (33.69) | (2.34) |
| | 15 | 3 | 2020 | 12.50 | 30.50 | 2.44 |
| | | | 2011 | (12.45) | (30.76) | (2.47) |
| | 16 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.00 | 2.36 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.96) | (2.41) |
| | 17 | 5 | 2020 | 13.00 | 31.00 | 2.38 |
| | | | 2011 | (12.70) | (30.76) | (2.42) |
| | 18 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.23) | (2.40) |

Taula 18: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Sur-3.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Sur-3 | 19 | 1 | 2020 | 13.00 | 31.00 | 2.38 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (2.39) |
| | 20 | 2 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 2.39 |
| | | | 2011 | (14.16) | (32.96) | (2.33) |
| | 21 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.50 | 2.54 |
| | | | 2011 | (12.45) | (30.52) | (2.45) |
| | 22 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 2.39 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.69) | (2.42) |
| | 23 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (2.42) |
| | 24 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (2.39) |

Taula 19: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Este-2.

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Este-2 | 25 | 1 | 2020 | 14.00 | 34.00 | 2.43 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.20) | (2.39) |
| | 26 | 2 | 2020 | 15.00 | 34.50 | 2.30 |
| | | | 2011 | (14.89) | (34.91) | (2.34) |
| | 27 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.00 | 2.50 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.27) | (2.48) |
| | 28 | 4 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 2.39 |
| | | | 2011 | (14.16) | (33.94) | (2.40) |
| | 29 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 2.37 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (2.42) |
| | 30 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 2.37 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.98) | (2.43) |

Taula 20: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Este-3

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Este-3 | 31 | 1 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 2.34 |
| | | | 2011 | (14.16) | (34.42) | (2.43) |
| | 32 | 2 | 2020 | 14.50 | 34.50 | 2.38 |
| | | | 2011 | (14.65) | (34.91) | (2.38) |
| | 33 | 3 | 2020 | 12.50 | 31.50 | 2.52 |
| | | | 2011 | (12.94) | (32.23) | (2.49) |
| | 34 | 4 | 2020 | 14.50 | 34.50 | 2.38 |
| | | | 2011 | (14.40) | (34.42) | (2.39) |
| | 35 | 5 | 2020 | 13.50 | 33.50 | 2.48 |
| | | | 2011 | (13.92) | (33.69) | (2.42) |
| | 36 | 6 | 2020 | 14.00 | 34.00 | 2.43 |
| | | | 2011 | (14.16) | (34.18) | (2.41) |

Taula 21: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Oeste-2

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | F2/F2 |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | |
| Oeste-2 | 37 | 1 | 2020 | 13.50 | 32.00 | 2.37 |
| | | | 2011 | (13.43) | (31.74) | (2.36) |
| | 38 | 2 | 2020 | 14.50 | 34.00 | 2.34 |
| | | | 2011 | (14.40) | (33.94) | (2.36) |
| | 39 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.50 | 2.54 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.27) | (2.48) |
| | 40 | 4 | 2020 | 13.00 | 32.50 | 2.50 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.47) | (2.38) |
| | 41 | 5 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.47) | (2.38) |
| | 42 | 6 | 2020 | 13.50 | 33.00 | 2.44 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (2.39) |

Taula 22: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Oeste-3

| Edifici | Id | Tirant | Any | Freqüència (Hz) | | |
|---------|----|--------|------|-----------------|----------------|--------|
| | | | | 1 ^a | 2 ^a | F2/F1 |
| Oeste-3 | 43 | 1 | 2020 | 13.00 | 31.50 | 2.42 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (2.39) |
| | 44 | 2 | 2020 | 14.00 | 33.50 | 2.39 |
| | | | 2011 | (14.16) | (33.45) | (2.36) |
| | 45 | 3 | 2020 | 12.00 | 30.00 | 2.50 |
| | | | 2011 | (12.21) | (30.52) | (2.50) |
| | 46 | 4 | 2020 | 14.00 | 32.50 | 2.32 |
| | | | 2011 | (13.67) | (32.71) | (2.39) |
| | 47 | 5 | 2020 | 13.00 | 31.50 | 2.42 |
| | | | 2011 | (13.18) | (31.49) | (2.39) |
| | 48 | 6 | 2020 | 13.50 | 32.50 | 2.41 |
| | | | 2011 | (13.43) | (32.47) | (2.42) |

El valor mig per les dades del 2011 és 2.38, mentre que el valor mig per les dades del 2020 és 2.40. Aquests valors s'aproximen a unes condicions de contorn embegut-embegut, on cal destacar el valor obtingut pel tirant 11 de l'edifici Norte-3 amb les dades del 2011, on amb un valor de 1.98 està molt lluny del valor mig, a diferència dels valors obtinguts pels altres tirants.

7. ANÀLISI DELS TIRANTS

Com s'ha demostrat en l'apartat 6, una sèrie de tirants presentaven valors fora d'un comportament normal, tan per l'adquisició del 2011 com per la del 2020. Aquests tirants són:

- Edifici *Norte-2*: Tirant 3.
- Edifici *Norte-3*: Tirant 8, 11 i 12.

Un d'aquests tirants, el tirant 11, ha destacat per mostrar valors fora de la tendència per la correlació entre la freqüència 2 i la freqüència 1, apartat 6.2 Figura 25, on també mostrava estar molt lluny del valor mig pel que fa a la relació de la divisió de la segona amb la primera freqüència natural, apartat 6.3 Taula 16.

El comportament d'aquest tirant ja mostrava un comportament poc usual en les Figura 19 i Figura 20, on es podia veure com aquest, havia experimentat un increment substancial entre l'adquisició 2011 i 2020.

Aquest apartat tracta d'aprofundir i justificar les possibles raons que poden explicar aquestes anomalies, centrant-se de forma específica, en l'increment experimentat pel tirant 11 de l'edifici *Norte-3*.

7.1 Definició del model numèric

L'objectiu del modelat amb elements finits és afirmar si realment tot el que es determinava en els apartats 6.2 i 6.3 d'aquest document és factible, per tant en aquest estudi s'hauria de trobar que realment l'increment de la freqüència entre l'adquisició del 2011 i el 2020 pel tirant 11 de l'edifici *Norte-3*, és degut a un canvi en les condicions de contorn i no per un increment de la càrrega axial en el tirant.

7.1.1 Software

L'estructura ha estat modelada mitjançant el mètode dels elements finits. L'eina utilitzada ha estat l'ANSYS WORKBENCH 2020.

L'estructura ha estat inicialment sotmesa a un càlcul estàtic. Posteriorment, s'ha relacionat aquesta aproximació amb els resultats del càlcul modal.

Per aquest anàlisi s'han considerat les següents càrregues:

Càrrega de tesat de 90 Tones, segons el document *Protocolo de Tesado de la Marquesina* [1].

Els paràmetres per definir el sistema estàtic i el càlcul modal depenen de:

- La geometria dels tirants.
- El material dels tirants.
- La càrrega aplicada.
- Les condicions de contorn.

7.1.2 Sistema d'unitats

Les unitats de les magnituds utilitzades per aquest estudi són les mostrades en la següent taula.

Taula 23: Magnituds relacionades i les seves unitats.

| Magnitud | Unitats |
|-----------------|-------------------|
| Longitud | m |
| Massa | kg |
| Mòduls/Tensions | MPa |
| Força | kN |
| Temps | s |
| Densitat | kg/m ³ |
| Freqüència | Hz |

7.1.3 Paràmetres i propietats mecàniques de la barra

La següent taula mostra els paràmetres de les barres que formen el sistema de tirants.

Taula 24: Paràmetres dels tirants.

| Paràmetres | Valors |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Material | Acer al carboni F-1140 |
| Definició del material | AISI 1045 |
| Longitud (m) | Veure gràfics Figura 10 i Figura 11 |
| Definició de la barra | Ø 100 |
| Diàmetre (mm) | 100 |
| Àrea de la barra (mm ²) | 7854 |
| Massa per metre lineal (kg/m) | 61.26 |
| E , Mòdul de Young (MPa) | 190000 |
| ν , Coeficient de Poisson | 0.29 |
| Límit elàstic (MPa) | 460 |
| Inèrcia (mm ⁴) | 6250000 |

7.1.4 Definició de les condicions de contorn en el model numèric

En la Figura 28, es poden veure els paràmetres de contorn aplicats en el model, tal com les restriccions de desplaçament en els ancoratges i al llarg de la barra excepte en la part vista, corresponent a la barra B2_06, mostrada en la Figura 10. El contacte definit per les connexions (ancoratges i maneguts) és del tipus *Bonded*, aquesta definició no permet la separació entre elements.

S'ha aplicat una càrrega de tesat de 90 tones i una càrrega equivalent a la de servei en l'ancoratge inferior del sistema de suspensió.

Per simplificar el model i optimitzar el temps de càlcul, les parts del tirant que s'han modelat són des de l'ancoratge de la part vista fins l'ancoratge superior de la coronació de la coberta, Figura 10.

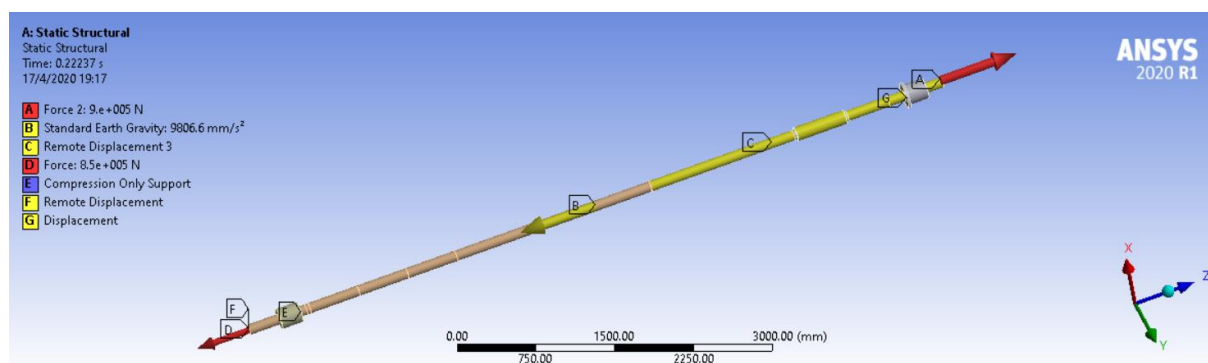


Figura 28: Sistema de tirants en l' ANSYS.

7.1.5 Definició del mallat en el model numèric

Per mallar aquest sistema s'ha utilitzat principalment els elements *SOLID186* i *CONTA 174*. Un nombre de 2089 elements i 8556 nodes. En la Figura 29 pot veure la regularitat del mallat en els elements més sensibles, que són aquells han de representar el moviment en el moment de visualitzar els modes i adquirir les propietats de les definicions dels estats de càrrega i condicions de contorn.

L'element *SOLID186* és un element de tipus quadràtic, definit per 20 nodes amb 3 graus de llibertat per node. Aquest element suporta plasticitat, rigidesa per estrès i no linearitat, com és el cas del model utilitzat.

L'element *CONTA 174* és una definició utilitzada per representar contactes, aquest element és posicionat en la superfície de la definició *SOLID186*. Aquest adquireix les mateix propietats que l'element *SOLID186* amb el que esta connectat, apareix contacte quan la superfície de l'element travessa una superfície objectiu associada.

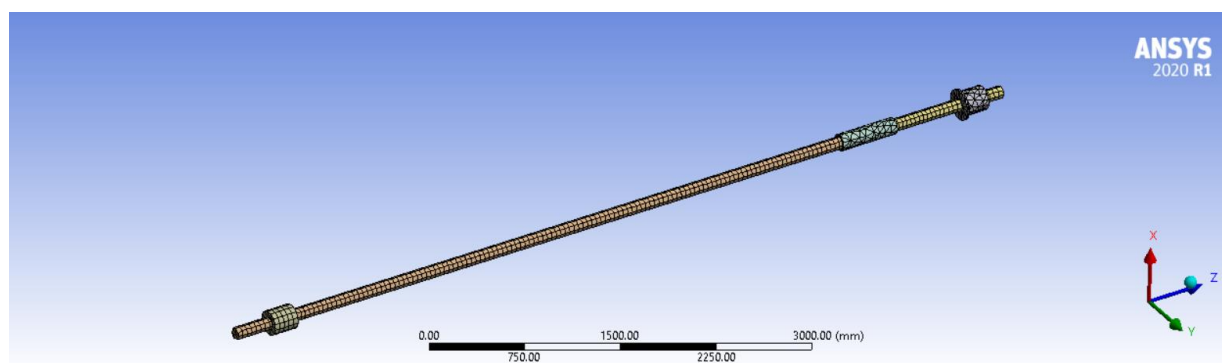


Figura 29: Mallat en l' ANSYS.

En la figura següent es pot veure la qualitat dels elements utilitzats, sobretot veure com hi ha un gran nombre d'elements situats per sobre d'una qualitat del 0.85.

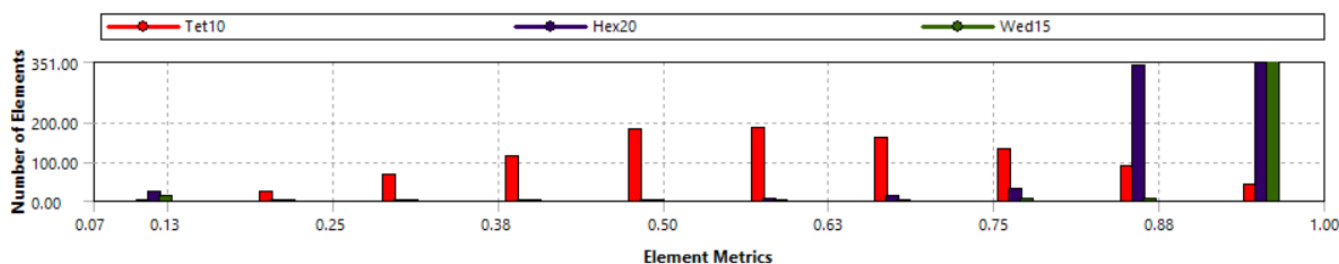


Figura 30: Qualitat dels elements utilitzats.

7.1.6 Ajust del model numèric

El primer pas per que el model estructural dinàmic sigui representatiu de les dades experimentals, és l'ajust del *Damping ratio* o esmorteïment del sistema. Cal tenir en ment l'expressió que ens relaciona l'estructura amb les equacions de moviment, *EOM*, expressada en forma matricial:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad \text{exp (9)}$$

La matriu d'esmoreïment és definida com:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{exp (10)}$$

On el coeficient de massa α , i el coeficient de rigidesa β , són relacionats amb l'esmoreïment ζ , per la definició de Rayleigh:

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta \omega_n \right) \quad \text{exp (11)}$$

Per això s'ha d'obtenir les amplituds dels cicles seleccionats, com es pot veure en la Figura 31, on és la resposta de l'adquisició 2020 del tirant 43 de l'edifici *Oeste-3*, on proporciona uns valors dins del rang de comportament agrupat. Tot i així per aquest estudi s'han de tenir en compte una sèrie de consideracions.

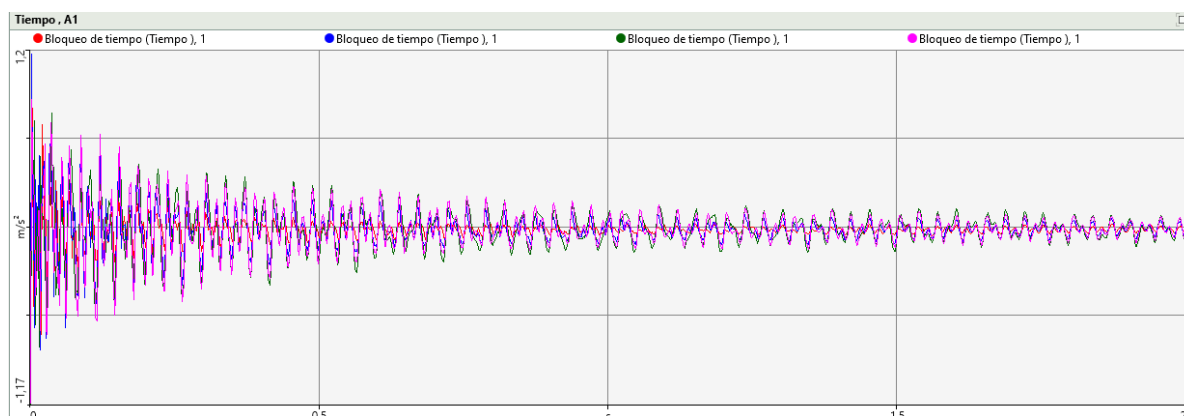


Figura 31: Gràfic de la resposta experimental del sistema, tirant 43, extreta amb el software BK Connect.

Al principi de la Figura 31 es pot veure, com l'excitació induïda produeix una afectació en la senyal, per una resposta transitària que conté les freqüències d'excitació produïdes pel martell. Per analitzar les vibracions lliures del tirant, que contenen els harmònics, cal obviar aquesta part.

Tanmateix, l'esmoreïment fa que les vibracions disminueixin amb el temps, en un moment determinat, el senyal està massa atenuat, amb una forta incidència en les freqüències altes, per tant no és útil per l'estudi.

Per aquests motius, s'escullen com a mostres, l'octau i el catorzè cicle, on els valors són mostrats en la taula següent:

Taula 25: Amplituds extrems de l'anàlisi experimental.

| Cicle | Amplitud (m/s ²) |
|-------|------------------------------|
| 8 | 0.621 |
| 14 | 0.361 |

Seguidament es pot trobar el decrement logarítmic δ , utilitzant la següent expressió:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{X_t}{X(t + Nt)} \rightarrow \delta = 0.090 \quad \text{exp (12)}$$

On n és el número de cicles entre les mostres escollides, X_t és l'amplitud de la primera mostra considerada i $X(t + Nt)$ és la segona mostra considerada.

En aquest cas $n = 6$, X_t la amplitud de l'octau cicle i $X(t + Nt)$ és la amplitud del catorzè cicle.

Una vegada obtingut el decrement logarítmic, es pot trobar l'esmoreïment del sistema ζ :

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \rightarrow \zeta = 0.014 \quad \text{exp (13)}$$

Una vegada s'han aplicat tots els paràmetres en el sistema, ja es poden trobar les primeres freqüències naturals en el model numèric i els modes de vibració.

Abans de visualitzar els modes en el model d'elements finits cal tenir en ment la Figura 15, on es preveïen quins modes s'han d'obtenir. L'observació física dels modes de vibració suposa una eina útil per a verificar la correspondència entre freqüència numèrica i experimentals. El valor numèric de les freqüències numèriques i experimentals aparellades, deuen respondre el mateix mode de vibració.

A continuació es mostren els modes de vibració obtinguts en el model d'elements finits.

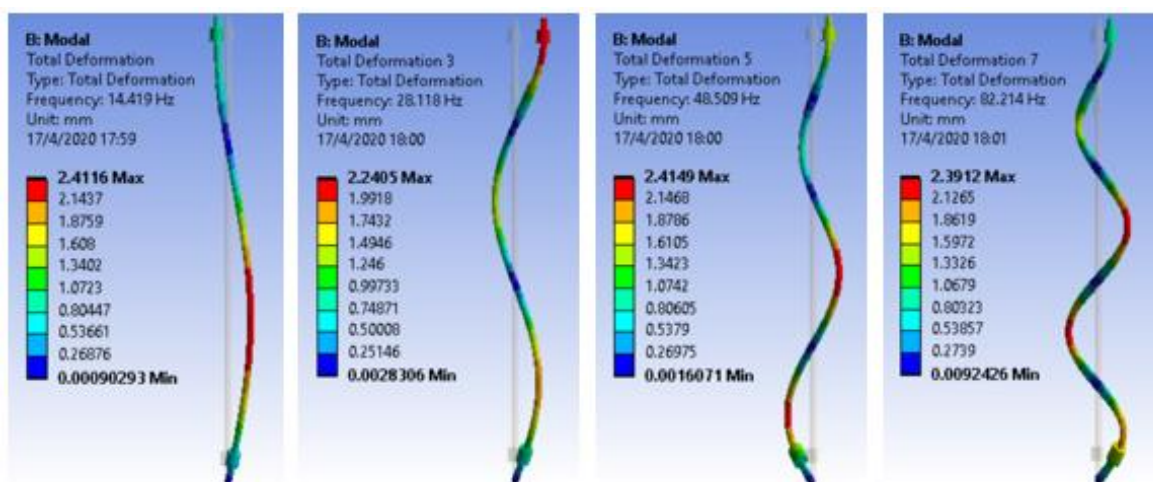


Figura 32: Modes de vibració obtinguts en el model d'ANSYS.

Com es pot veure, aquests coincideixen amb els modes esperats. Són de magnitud semblant a l'adquisició 2011 del tirant 11 edifici *Norte-3*, Taula 4 i a l'adquisició 2020 del tirant 43 edifici *Oeste-3*, Taula 10.

Taula 26: Freqüències naturals obtingudes del model numèric.

| Freqüència (Hz) | | | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 14.419 | 28.118 | 48.509 | 82.214 |

Veient els resultats obtinguts del model d'elements finits mostrat anteriorment, el primer que s'ha d'observar és com el model obté uns resultats molt pròxims als experimentals, raó per la qual dona validesa al model i les característiques d'aquest.

Una vegada validat el model d'elements finits amb el qual s'està treballant, es pot procedir amb la formulació d'hipòtesis.

7.2 Estudi de les hipòtesis

Per donar resposta al comportament anòmal, s'estudiaran diverses hipòtesis que es plantegen en base de la probabilitat estudiada en l'apartat d'anàlisi de resultats d'aquest document. Per fer això es modificaran les condicions de contorn, s'analitzarà la influència de l'esmoreïment, i s'avaluarà fins en quin punt un increment de la freqüència pot ser degut a un increment de la càrrega axial.

7.2.1 Influència de l'esmoreïment

En aquest apartat es comprovarà la influència de l'esmoreïment del sistema sobre les freqüències naturals. Primer s'ha d'estudiar la resposta del sistema pel tirant 11 del edifici *Norte-3* per l'adquisició del 2020, es mostra en la següent figura.

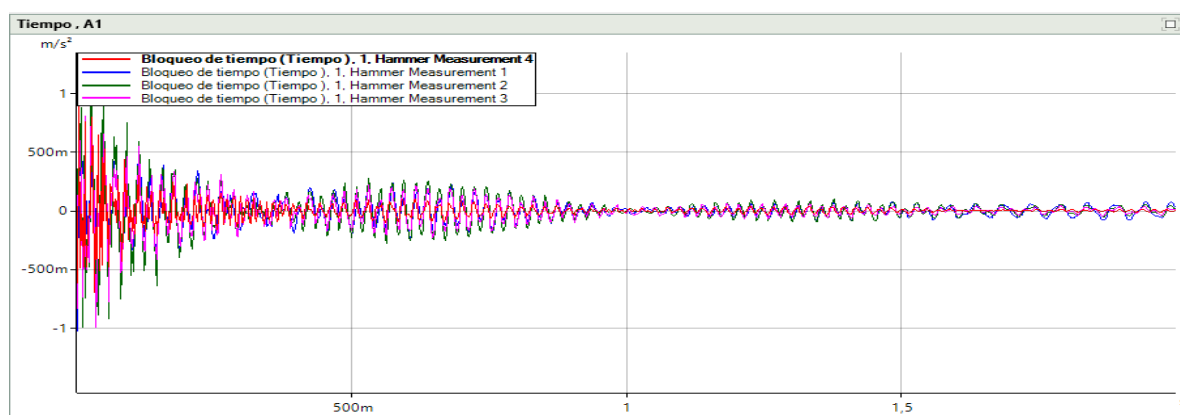


Figura 33: Gràfic de la resposta experimental del sistema, tirant 11, extreta amb el software BK Connect.

Com es pot observar, la resposta del sistema pel tirant 11, presenta unes característiques diferents a les dels altres tirants. Això es pot veure si la comparem amb la Figura 31.

Es repeteix l'anàlisi fet al principi de l'apartat 7.1.6, però en aquest cas amb la resposta del sistema del tirant 11. S'obtenen els següents paràmetres que seran posteriorment aplicats al model numèric.

- Decrement logarítmic $\delta = 0.1713$
- Esmoreïment del sistema $\zeta = 0.0270$

Un cop aplicat s'obtenen les dades mostrades en la Taula 27.

Taula 27: Freqüències naturals obtingudes del model numèric, cas tirant 11.

| Freqüència (Hz) | | | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 14.419 | 28.118 | 48.509 | 82.214 |

Conclusió parcial.

Com es pot comprovar, aplicar l'esmoreïment característic del tirant 11, no resulta en aquest cas rellevant o suficient, ja que no modifica de forma substancial, la resposta freqüència de l'element.

7.2.2 Influència de la càrrega axial

Seguidament s'analitzarà fins a quin punt, un increment d'esforç axial en el tirant pot modificar la resposta en la freqüència d'aquest.

Per tant, aquest anàlisi parteix de la premissa de que la càrrega axial dels tirants pot haver variat.

Quan això succeeix, com va ser demostrat experimentalment en la tesis de Juan Carlos Araiza [15], en el cas de que l'esforç axial en el tirant augmenti, les seves freqüències també ho faran, sobretot la primera i la segona freqüència natural que mostren ser les més sensibles aquest canvis.

Per aquest motiu es fa un càlcul paramètric i iteratiu fixant les condicions de contorn descrites en l'apartat 7.1.4 però permetent a la variable corresponent a la càrrega axial, adoptar diversos valors.

Es capturen les 4 primeres freqüències naturals corresponents a cada increment de càrrega i es mostren en la Taula 28.

Taula 28: Freqüències naturals en funció de la càrrega axial, obtingudes del model d'ANSYS.

| Estat | Càrrega (N) | Freqüència (Hz) | | | |
|-------|--------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 1 | 1.00 | 8.568 | 21.763 | 41.259 | 74.333 |
| 2 | 2.50e ⁵ | 10.632 | 23.826 | 43.512 | 76.739 |
| 3 | 5.00e ⁵ | 12.353 | 25.710 | 45.661 | 79.069 |
| 4 | 8.50e ⁵ | 14.419 | 28.118 | 48.509 | 82.214 |
| 5 | 9.50e ⁵ | 14.956 | 28.766 | 49.292 | 83.090 |
| 6 | 1.00e ⁶ | 15.218 | 29.084 | 49.680 | 83.524 |
| 7 | 1.20e ⁶ | 16.221 | 30.320 | 51.200 | 85.237 |
| 8 | 1.40e ⁶ | 17.165 | 31.504 | 52.676 | 86.914 |
| 9 | 1.60e ⁶ | 18.060 | 32.641 | 54.112 | 88.558 |
| 10 | 1.80e ⁶ | 18.912 | 33.737 | 55.511 | 90.170 |
| 11 | 1.95e ⁶ | 19.526 | 34.534 | 56.537 | 91.359 |
| 12 | 2.20e ⁶ | 20.509 | 35.820 | 58.207 | 93.305 |
| 13 | 2.40e ⁶ | 21.262 | 36.814 | 59.508 | 92.832 |

En quan es comparen els esforços axials corresponents a la situació del tirant 11 per les freqüències adquirides en el 2011 i les adquirides en el 2020, s'observa que, de ser l'esforç axial, el responsable de l'increment en la freqüència experimentada pel tirant 11, aquest increment hauria de ser notable.

Taula 29: Increment de l'esforç axial associat a les freqüències adquirides en el 2011 i el 2020.

| Estat | Càrrega (N) | Freqüència (Hz) | | | |
|---------------------|--------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 6 | 1.00e ⁶ | 15.218 | 29.084 | 49.680 | 83.524 |
| 10 | 1.80e ⁶ | 18.912 | 33.737 | 55.511 | 90.170 |
| Δ axial | 0.80e ⁶ | | | | |
| Δ percentual | 180% | | | | |

A continuació, es comparen els resultats obtinguts amb la formulació mostrada en la publicació *The Dynamical Identification of the Tensile Force in Ancient Tie-rods* de Lagomarsino i Calderini [16] de base teòrica, amb l'objectiu de detectar possibles discrepàncies entre els resultats del model numèric i la formulació. Aquesta formulació es mostra a continuació.

$$\omega n = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{n^2 \pi^2 EI}{\rho l^4} + \frac{T}{\rho l^2}} \quad \text{exp (14)}$$

On n ($n = 1, 2, \dots$) és el mode de vibració corresponent a la freqüència natural ωn , E el mòdul d'elasticitat, I el moment d'inèrcia de la secció transversal de l'element, ρ és la massa per unitat de longitud i finalment T és la càrrega axial.

El primer que es vol mostrar és la precisió de resultats entre mètodes, quan utilitzem la primera i segona freqüència natural amb els corresponents modes de vibració, es mostra en la Figura 34.

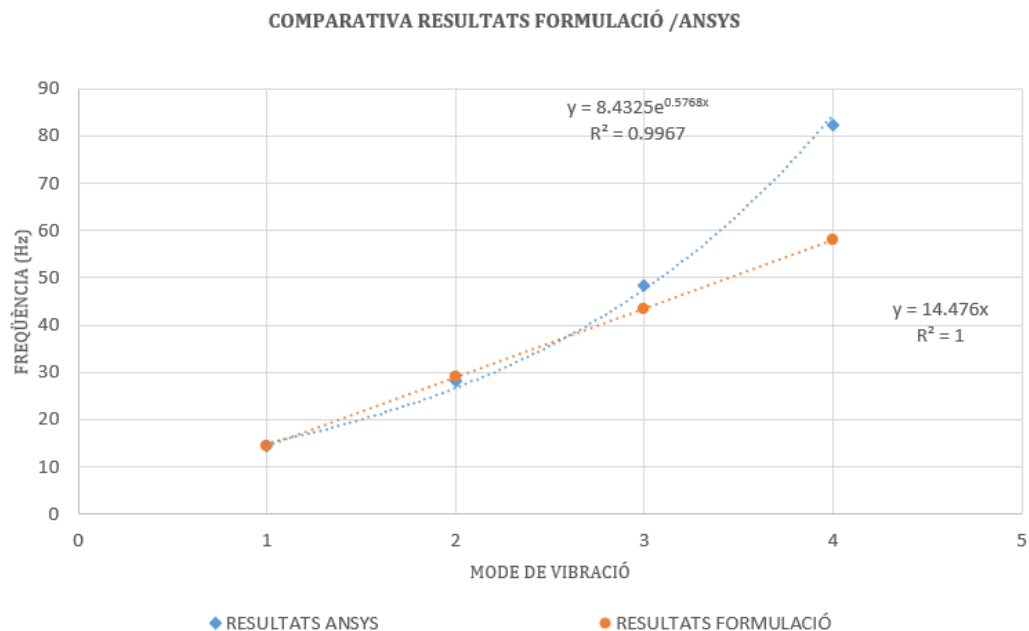


Figura 34: Comparativa de resultats entre ANSYS i la formulació de Lagomarsino et al.

Per tant és recomanable, si es vol fer una comparativa entre mètodes, fer-ho amb la primera freqüència natural i el corresponent primer mode de vibració.

En la següent figura, es mostra una comparativa entre els resultats de la formulació de Lagomarsino et al., amb els resultats d'ANSYS pel cas del tirant 11.

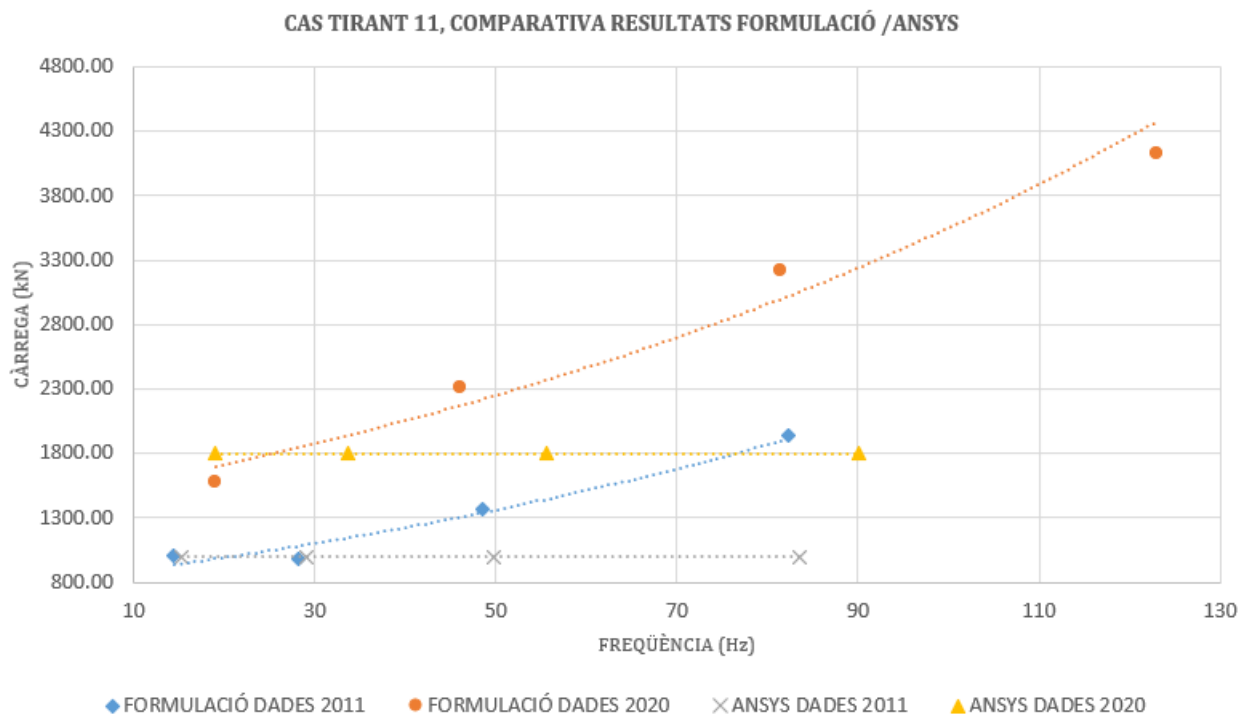


Figura 35: Cas tirant 11, Comparativa de resultats entre ANSYS i la formulació de Lagomarsino et al.

Es pot veure, si només ens fixem en la primera freqüència, que novament s'obté un increment notable de la càrrega axial.

Conclusió parcial.

Els resultats relatius a l'esforç axial obtinguts amb la freqüència natural, utilitzant el programa d'elements finits o les fórmules provinents de la literatura especialitzada, donen valors similars per la freqüència fonamental. A mesura que passem a freqüències superiors, els valors es bifurquen de forma significativa. Per tant, per a garantir la fiabilitat de les conclusions, l'anàlisi s'haurà de fer en base de la freqüència fonamental.

L'increment del valor de la càrrega axial en el tirant 11 necessari per fer que la freqüència fonamental mesurada en el 2011 passi a ser un valor mesurat en el 2020, és incompatible amb el funcionament de l'estructura.

Donada a la proximitat dels tirants adjacents i la rigidesa dels forjats, sembla improbable que l'increment de l'esforç axial en el tirant 11, pugui produir-se sense afectar als tirants confrontants.

Comentari addicional.

Per comprovar la seguretat del tirant davant de possibles increments de càrrega, s'ha de comprovar quines càrregues axials pot suportar el tirant, per això utilitzem la següent formula:

$$f_{yd} = \frac{T}{A_T} \rightarrow T = f_{yd} \cdot A_T = \frac{460}{1,10} \cdot 7854 \cdot 10^{-3} = \mathbf{3284 \text{ kN}} \quad \text{exp (15)}$$

On A_T és l'àrea de la barra del tirant i f_{yd} és el límit elàstic del material dividit pel coeficient de seguretat.

Els valors aproximats en la que es mouen el càlculs efectuats, varien entre 850 i els 1800 kN, si prenem els resultats associats al càlcul iteratiu de la hipòtesis d'augment de la càrrega axial.

Per tant, es troba lluny dels valors crítics.

7.2.3 Influència de les condicions de contorn

Les condicions de contorn solen tenir un efecte notable sobre la resposta dinàmica de l'estructura. En aquesta secció s'analitzarà la dependència entre la resposta freqüencial del tirant i la rigidesa de rotació pròpia dels extrems d'aquest.

En la següent figura s'observa com les condicions de contorn definides en els apartats anteriors, se li afegeix un suports elàstics simulant l'efecte rigiditzador del maneguet que uneix la barra B2_06 amb la B3_07, mostrat en la Figura 10.

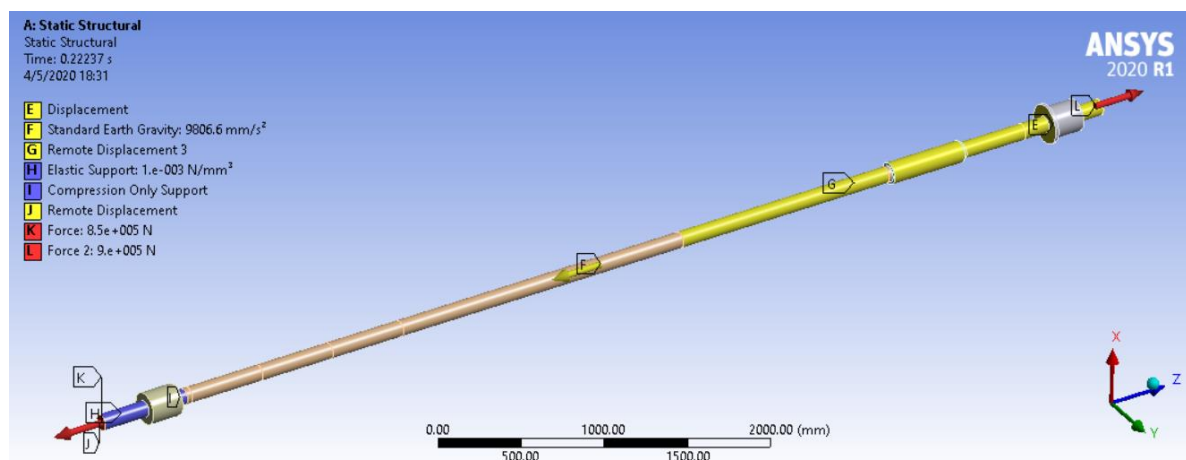


Figura 36: Sistema de tirants en l'ANSYS, condicions de contorn maneguet inferior.

S'incrementa de forma iterativa la rigidesa del suport elàstic, amb l'objectiu de que la primera freqüència natural del sistema, augmenti de 14.42 Hz, del model ajustat, a un valor pròxim als 19.00 Hz, valor experimental mesurat en el 2020. Els resultats es tabulen a continuació, veure Taula 30.

Taula 30: Freqüències naturals en funció de la rigidesa del maneguet inferior, obtingudes del model ANSYS.

| Estat | Suport elàstic (N/mm ³) | Freqüència (Hz) | | | |
|-------|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 1 | 0.001 | 14.438 | 28.134 | 48.534 | 82.234 |
| 2 | 0.01 | 14.607 | 28.274 | 48.765 | 82.417 |
| 3 | 0.015 | 14.695 | 28.350 | 48.892 | 82.519 |
| 4 | 0.2 | 16.486 | 30.316 | 52.873 | 86.188 |
| 5 | 0.5 | 17.392 | 31.710 | 56.775 | 91.155 |
| 6 | 1 | 17.886 | 32.600 | 59.790 | 96.289 |
| 7 | 2.5 | 18.273 | 33.355 | 62.527 | 101.607 |
| 8 | 5 | 18.439 | 33.692 | 63.731 | 103.852 |
| 9 | 10 | 18.547 | 33.918 | 64.528 | 105.233 |
| 10 | 15 | 18.590 | 34.018 | 64.883 | 105.823 |

Com es pot veure en la Taula 30, l'aproximació del valor mig, s'aprecia a partir de l'estat 7.

En la següent Figura 37, es mostra la relació de l'augment de la rigidesa del maneguet amb l'augment de les quatre primeres freqüències naturals, el comportament de la modificació d'aquesta condició de contorn obeeix una tendència exponencial incremental.

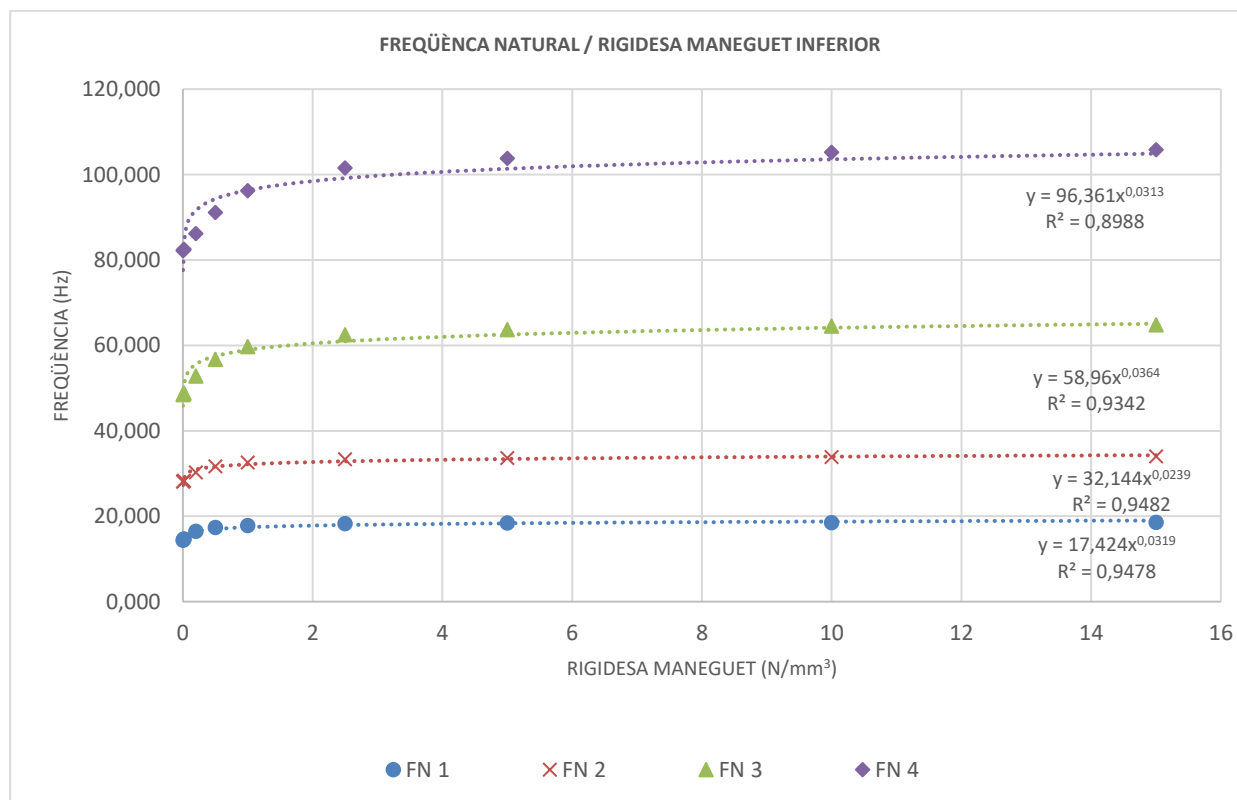


Figura 37: Gràfic freqüència natural per cada cas d'estat de rigidesa del maneguet inferior.

Com en el cas anterior, ara es varia la rigidesa de l'ancoratge superior, corresponent a l'extrem de la barra superior, mostrat en la Figura 38.

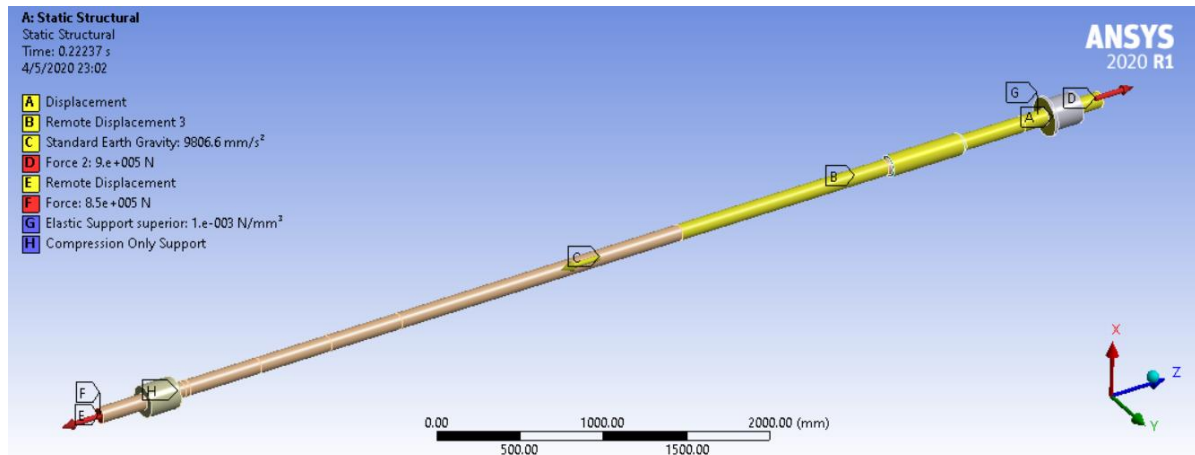


Figura 38: Sistema de tirants en l'ANSYS, condicions de contorn maneguet superior.

Els resultats del càlcul iteratiu es mostren en la següent taula.

Taula 31: Freqüències naturals en funció de la rigidesa del maneguet superior, obtingudes del model ANSYS.

| Estat | Suport elàstic (N/mm ³) | Freqüència (Hz) | | | |
|-------|-------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a |
| 1 | 0.001 | 14.496 | 28.308 | 48.558 | 82.227 |
| 2 | 0.01 | 15.057 | 29.951 | 49.034 | 82.352 |
| 3 | 0.015 | 15.288 | 30.806 | 49.323 | 82.424 |
| 4 | 0.2 | 16.932 | 41.412 | 65.385 | 87.357 |
| 5 | 0.5 | 17.165 | 42.763 | 74.764 | 102.873 |
| 6 | 1 | 17.251 | 43.167 | 76.872 | 112.718 |
| 7 | 2.5 | 17.308 | 43.404 | 77.781 | 115.670 |
| 8 | 5 | 17.331 | 43.493 | 78.077 | 116.362 |
| 9 | 10 | 17.348 | 43.559 | 78.284 | 116.807 |
| 10 | 15 | 17.358 | 43.596 | 78.402 | 117.055 |

Com en el cas del maneguet inferior, modificar la rigidesa de l'ancoratge, provoca un augment de les quatre primeres freqüències naturals, en un tendència exponencial incremental, veure Figura 39.

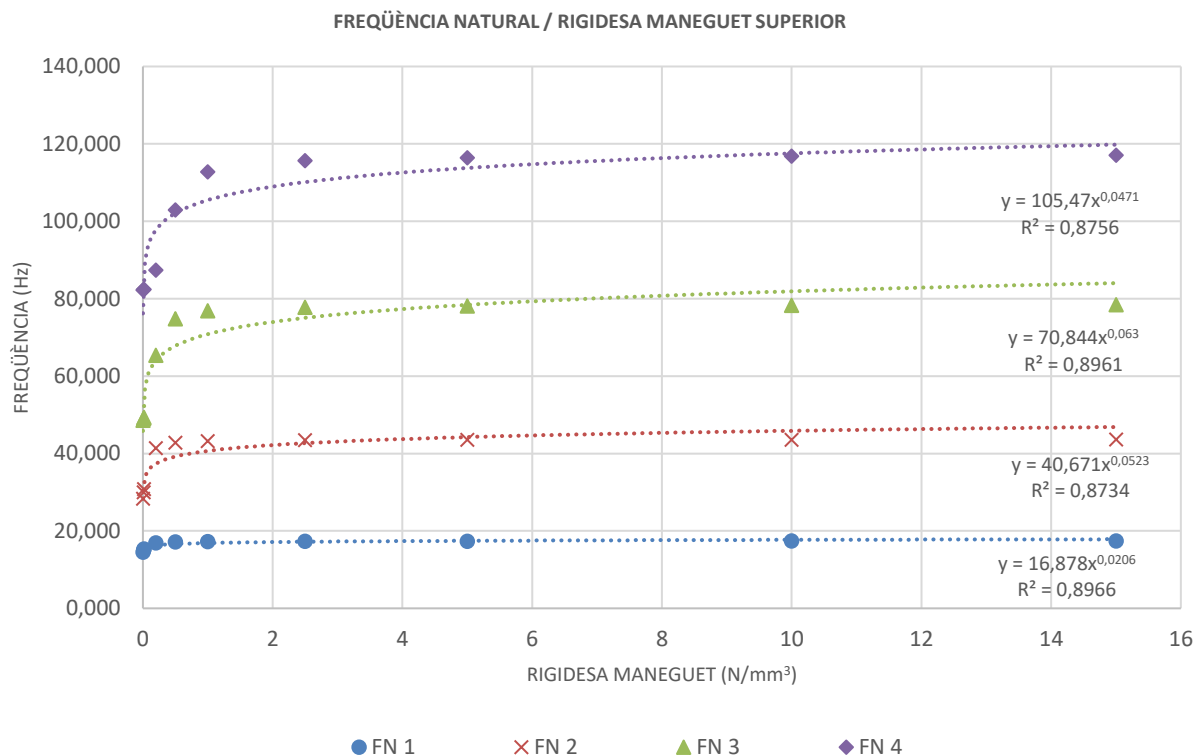


Figura 39: Gràfic freqüència natural per cada cas d'estat de rigidesa del maneguet superior.

Conclusió parcial.

Un augment de la rigidesa en les condicions de les connexions, es tradueix en una restricció al gir en els extrems i comporta un increment del valor de les freqüències naturals.

Aquest canvi en les condicions extremes del tirant pot haver ser degut a diferents circumstàncies. S'entén que no afecten a la part oculta del tirant, ja que ni una lleugera pèrdua de secció de la barra, ni la degradació de la injecció efectuada en les parts ocultes, donarien com a resultat un canvi tan acusat en el valor de les freqüències.

8. PRESSUPOST

El valor estimat del projecte es mostra en la següent Taula 32, el qual té un cost sense IVA de vint mil cinc-cents setanta-set euros amb setanta-vuit cèntims.

Taula 32: Pressupost total de la realització del present estudi.

| Concepte | Cost unitari | Quantitat | Cost Total |
|--|---------------------|------------------|-------------------|
| <i>Hores Treballades</i> | 30 €/h | 423 h | 12690.00 € |
| <i>Desplaçaments</i> | 360 € | | 360.00 € |
| <i>Allotjament</i> | 120 €/nit | 2 nits | 240.00 € |
| <i>Dietes</i> | 96 € | | 96.00€ |
| <i>Equip d'adquisició dinàmica</i> | 5000 € | | 5000.00 € |
| <i>Llicència software equip dinàmica</i> | 1500 €/any | 100 dies | 410.96€ |
| <i>Llicència software Ansys Workbench 2020</i> | 6500 €/any | 100 dies | 1780.82 € |
| Total | | | 20577.78 € |

9. CONCLUSIONS

Respecte als tirants 3 de l'edifici Norte-2, 8 i 12 de l'edifici Norte-3.

Aquests tirants van donar valors alts i fora del grup tant per l'adquisició del 2011 com l'adquisició del 2020, com s'ha demostrat en l'apartat 6, però aquests tirants no han experimentat un increment substancial en l'adquisició del 2020. Per tant, la seva situació és estacionària, veure Figura 19.

Respecte al tirant 11 l'edifici Norte-3.

El tirant 11, s'havia vist en les Figura 19 i Figura 20, un comportament poc usual, on a simple vista es podia veure un alt increment de la seves quatre primeres freqüències naturals, entre les adquisicions del 2011 i el 2020.

Aquest tirant també ha destacat per mostrar valors fora de la tendència, per la correlació entre la freqüència 2 i la freqüència 1, apartat 6.2 Figura 25, on també mostrava estar molt lluny del valor mig pel que fa a la relació de la divisió de la segona amb la primera freqüència natural, 6.3 Taula 16, on s'ha vist que aquestes freqüències són especialment sensibles a la definició de les condicions de contorn.

Totes aquestes comprovacions dels apartats mencionats, apuntaven que la causa d'aquesta variació en el comportament per aquest tirant era degut a, una variació de les condicions de contorn i per tant es podia descartar un augment de la càrrega axial, fet que també era candidat a produir un augment així. Això ha quedat totalment descartat en l'apartat 7.2.2.

Un altre raonament per descartar aquesta hipòtesis és per la observació del funcionament de l'estructura. Els tirants estan units per una placa rígida, el forjat, l'increment de la càrrega axial necessària per a causar un augment de la freqüència fonamental observada en l'adquisició del 2020, hauria d'haver afectat també als altres tirants de l'edifici.

A la vista dels estats de càrrega indicats [1], l'increment de la càrrega en el tirant necessària per a modificar la freqüència fonamental, no pot ser degut a una sobrecàrrega local de la planta, ja que la magnitud no seria suficient per a provocar-ho.

Únicament podria ser degut a una redistribució de les càrregues degut a la modificació geomètrica dels tirants, al seu allargament o escurçament, però de ser així l'efecte hauria de ser observable en els diferents tirants.

En el cas que es donés aquest increment de la càrrega, l'esgotament dels tirants estaria molt lluny del rang de valors considerats com un problema crític, apartat 7.2.2.

També s'ha vist que tot i utilitzar la resposta del tirant 11 per definir l'esmoreïment, aquest no juga un paper essencial a l'hora d'ajustar el model fins adquirir uns valors similars a l'adquisició del 2020.

La causa més plausible a la variació del comportament del tirant 11, resulta ser l'estudiada en l'apartat 7.2.3. Els valors de la rigidesa necessària per a modificar la resposta en la freqüència dels tirants, són compatibles amb situacions reals d'aquests mecanismes.

Aquests canvis poden estar relacionats amb una possible variació de les condicions inicials dels dispositius d'ancoratge situats en els extrems dels tirants en les cotes, +732.5 i +726.5, aproximadament, veure Figura 10.

Si tenim en compte l'interval de temps i la degradació mesurada, es pot dir que avança lentament.

Suggeriments finals.

Per completar i complementar els resultats d'aquest estudi, es suggereixen una sèrie d'actuacions.

Si es vol detectar com els elements d'unió entre barres dels tirants han estat afectats pel pas del temps, s'haurà de comprovar físicament aquesta degradació. Per aquest motiu caldrà una inspecció in situ dels tirants 3 de l'edifici *Norte-2*, 8, 11 i 12 de l'edifici *Norte-3*, per veure com es troben els maneguts situats en les cotes +732.5 i +726.5, veure Figura 10.

A més de la inspecció, es proposa monitoritzar amb acceleròmetres triaxials sense fils, col·locats a diversos punts de la superfície dels tirants, durant un període de temps aproximat d'un any, incloent lectures de temperatura superficial.

Amb aquests acceleròmetres es podria treure un espectre de resposta de l'element, quan aquest sigui excitat pel vent. Utilitzant el desplaçament, velocitat o acceleració respecte la freqüència, es podria incloure en un programa d'elements finits i veure com evoluciona tant les freqüències naturals com les tensions i desplaçaments en la barra al llarg del temps. D'aquesta manera crear un històric de dades més complert i entendre com aquests es degraden amb el temps.

Una possible nova línia d'estudi relacionada amb la correlació entre les condicions de contorn o el dany i la resposta acceleració/temps dels elements estructurals, podria ser comprovar si utilitzant el coeficient de massa α , i el coeficient de rigidesa β , relacionats amb l'esmoreïment ζ per la definició de Rayleigh, és possible detectar comportaments anòmals i si aquests estan relacionats amb el dany o amb l'estat de les unions de l'element d'estudi.

Per fer això caldria trobar el millor sistema per extreure el decrement logarítmic δ de cada element per obtenir l'esmoreïment, posteriorment els coeficients α i β , i finalment fer una comparativa d'aquests coeficients per tots 48 tirants.

ÍNDIX DE FIGURES

| | | | |
|---|---|-------------------------------------|----|
| Figura 1: Plànol d'emplaçament del districte Telefónica de Madrid [1]. | 8 | | |
| Figura 2: Façana de l'edifici Norte-3 [1]. | 9 | | |
| Figura 3: Corbes tensió/deformació típiques de l'acer i el formigó [3]. | 11 | | |
| Figura 4: Visualització de la resposta dinàmica experimental dels elements. | 13 | | |
| Figura 5: Funció de resposta en freqüència, modes de cos rígid. | 13 | | |
| Figura 6: Funció de resposta en freqüència, cas cinquena freqüència natural. | 14 | | |
| Figura 7: Funció de densitat de potencia espectral. | 14 | | |
| Figura 8: Funció de densitat de potencia espectral. | 15 | | |
| Figura 9: Funció de temps. | 16 | | |
| Figura 10: Sistema de tirants [1]. | 19 | | |
| Figura 11: Barra M100x4 [1]. | 20 | | |
| Figura 12: Posició dels tirants dins del complex de Telefónica [2]. | 20 | | |
| Figura 13: Secció transversal del sistema de tirants. | 21 | | |
| Figura 14: Configuració bàsica de l'adquisició. | 22 | | |
| Figura 15: Modes de deformació esperats. | 23 | | |
| Figura 16: Configuració de l'assaig. | 23 | | |
| Figura 17: Configuració de l'ample de freqüències. | 24 | | |
| Figura 18: Configuració esmorteïment i temps d'adquisició. | 24 | | |
| Figura 19: Gràfic de les quatre freqüències naturals per tirant. | 28 | | |
| Figura 20: Gràfic de les quatre freqüències naturals per tirant del edifici Norte 3. | 28 | | |
| Figura 21: Diagrama de caixes per la primera freqüència. | 30 | | |
| Figura 22: Diagrama de caixes per la segona freqüència. | 31 | | |
| Figura 23: Diagrama de caixes per la tercera freqüència. | 32 | | |
| Figura 24: Diagrama de caixes per la quarta freqüència. | 33 | | |
| Figura 25: Correlació entre la freqüència 2 i la freqüència 1. | 34 | | |
| Figura 26: Correlació entre la freqüència 3 i la freqüència 2. | 34 | | |
| Figura 27: Correlació entre la freqüència 4 i la freqüència 3. | 35 | | |
| Figura 28: Sistema de tirants en l' ANSYS. | 41 | | |
| Figura 29: Mallat en l' ANSYS. | 41 | | |
| Figura 30: Qualitat dels elements utilitzats. | 42 | | |
| Figura 31: Gràfic de la resposta experimental del sistema, tirant 43, extreta amb el software BK Connect. | 42 | | |
| Figura 32: Modes de vibració obtinguts en el model d'ANSYS. | 43 | | |
| Figura 33: Gràfic de la resposta experimental del sistema, tirant 11, extreta amb el software BK Connect. | 45 | | |
| Figura 34: Comparativa de resultats entre ANSYS i la formulació de Lagomarsino et al. | 47 | | |
| Figura 35: Cas tirant 11, Comparativa de resultats entre ANSYS i la formulació de Lagomarsino et al. | 48 | | |
| Figura 36: Sistema de tirants en l'ANSYS, condicions de contorn maneguet inferior. | 49 | | |
| Figura 37: Gràfic freqüència natural per cada cas d'estat de rigidesa del maneguet inferior. | 50 | | |
| Figura 38: Sistema de tirants en l'ANSYS, condicions de contorn maneguet superior. | 51 | | |
| Figura 39: Gràfic freqüència natural per cada cas d'estat de rigidesa del maneguet superior. | 52 | | |
| Figura 40: Base tirant 3 Norte-2. | Figura 41: Vista tirant 32 Este-3. | Figura 42: Base tirant 38 Oeste-2.. | 60 |
| Figura 43: Vista tirant 39 Oeste-2. | Figura 44: Vista del acceleròmetre sobre tirant de Sur-3. | | 60 |
| Figura 45: Vista tirant 21 Sur-3. | Figura 46: Vista del acceleròmetre sobre tirant i el martell. | | 60 |
| Figura 47: Vista de freqüències en el sistema d'adquisició. | | Figura 48: Vista tirant 33 Este-3. | 61 |
| Figura 49: Vista tirant 3 Norte-2. | Figura 50: Vista tirants Norte-2. | | 61 |

ÍNDIX DE TAULES

| | |
|--|----|
| Taula 1: Modal Assurance Criterion (MAC)..... | 16 |
| Taula 2: Propietats mecàniques de l'acer inoxidable AISI 1045 [14]..... | 18 |
| Taula 3: Freqüències dels tirants del Norte-2..... | 25 |
| Taula 4: Freqüències dels tirants del Norte-3..... | 25 |
| Taula 5: Freqüències dels tirants del Sur-2..... | 26 |
| Taula 6: Freqüències dels tirants del Sur-3..... | 26 |
| Taula 7: Freqüències dels tirants del Este-2..... | 26 |
| Taula 8: Freqüències dels tirants del Este-3..... | 27 |
| Taula 9: Freqüències dels tirants del Oeste-2..... | 27 |
| Taula 10: Freqüències dels tirants del Oeste-3..... | 27 |
| Taula 11: Valors estadístics per la primera freqüència..... | 29 |
| Taula 12: Valors estadístics per la segona freqüència..... | 30 |
| Taula 13: Valors estadístics per la tercera freqüència..... | 31 |
| Taula 14: Valors estadístics per la quarta freqüència..... | 32 |
| Taula 15: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Norte-2..... | 35 |
| Taula 16: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Norte-3..... | 36 |
| Taula 17: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Sur-2..... | 36 |
| Taula 18: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Sur-3..... | 36 |
| Taula 19: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Este-2..... | 37 |
| Taula 20: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Este-3..... | 37 |
| Taula 21: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Oeste-2..... | 37 |
| Taula 22: Freqüències primera, segona i relació dels tirants del Oeste-3..... | 38 |
| Taula 23: Magnituds relacionades i les seves unitats..... | 40 |
| Taula 24: Paràmetres dels tirants..... | 40 |
| Taula 25: Amplituds extrems de l'anàlisi experimental..... | 43 |
| Taula 26: Freqüències naturals obtingudes del model numèric..... | 44 |
| Taula 27: Freqüències naturals obtingudes del model numèric, cas tirant 11..... | 45 |
| Taula 28: Freqüències naturals en funció de la càrrega axial, obtingudes del model d'ANSYS..... | 46 |
| Taula 29: Increment de l'esforç axial associat a les freqüències adquirides en el 2011 i el 2020..... | 46 |
| Taula 30: Freqüències naturals en funció de la rigidesa del maneguet inferior, obtingudes del model ANSYS..... | 50 |
| Taula 31: Freqüències naturals en funció de la rigidesa del maneguet superior, obtingudes del model ANSYS..... | 51 |
| Taula 32: Pressupost total de la realització del present estudi..... | 53 |

10. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El treball final de màster realitzat consta d'un únic document, aquesta memòria.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] Protocolo de Tesado de la Marquesina, Ciudad de las Comunicaciones de Telefónica. Dragados, S.A., 2005.
- [2] Llorens Sulivera J. Informe Estado Actual Tirantes en Edificios del Sector C Campus Empresarial de Telefónica. CTT-Stronghold, S.A., 2011.
- [3] Callister W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1995.
- [4] Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc. Los Angeles. 2010.
- [5] Bendat J.S. Spectral Techniques for Nonlinear System Analysis and Identification. Shock and Vibration, Vol. 1, pp. 21-31. John Wiley & Sons, Inc. Los Angeles. 1993.
- [6] Salawu O.S., Williams C. Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing. Journal of Structural Engineering. 1995.
- [7] Yang F., Yang Y. An Improved Identification Method Based on Mode Information. Journal of Ocean University of China. 2006.
- [8] Chance J., Tomlinson G.R., Worden K. A Simplified Approach to the Numerical and Experimental Modelling of the Dynamics of a Cracked Beam. 1994.
- [9] Nwosu D.I., Swamidass A.S.J., Guigne J.Y., Olowokere D.O. Studies on Influence of Cracks on the Dynamic Response of Tubular T-Joints for Nondestructive Evaluation. 1995.
- [10] Shen M.H.H., Chu Y.C. Vibrations of Beams with a Fatigue Crack. 1992.
- [11] Krawczuk M., Ostachowicz W.M. Parametric Vibrations of Beam with Crack. Archive of Applied Mechanics. 1992.
- [12] Documento Básico, Seguridad Estructural. Código Técnico de la Edificación. Espanya. 2009.
- [13] Documento Básico, Seguridad Estructural Acero. Código Técnico de la Edificación. Espanya. 2008.
- [14] AZoM. Carbon Steel. Grade 1045 (UNS G10450). 2013.
- [15] Araiza Garaygordóbil J.C. Dynamic Assessment of Structural Building Components, Barcelona, 2003.
- [16] Lagomarsino S., Calderini C. The Dynamical Identification of the Tensile Force in Ancient Tie-Rods, Genova, 2005.

12. ANNEX – Fotografies adquisició 2020

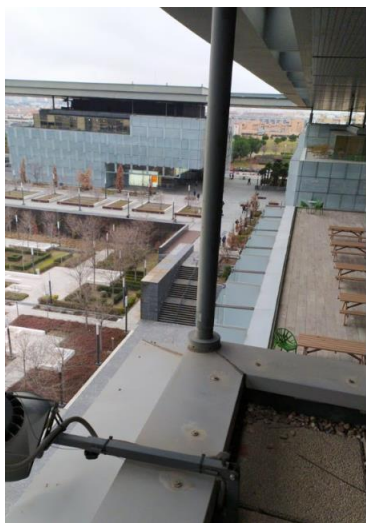


Figura 40: Base tirant 3 Norte-2.

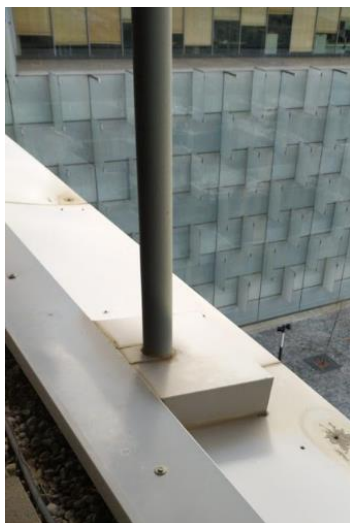


Figura 41: Vista tirant 32 Este-3.



Figura 42: Base tirant 38 Oeste-2.



Figura 43: Vista tirant 39 Oeste-2.

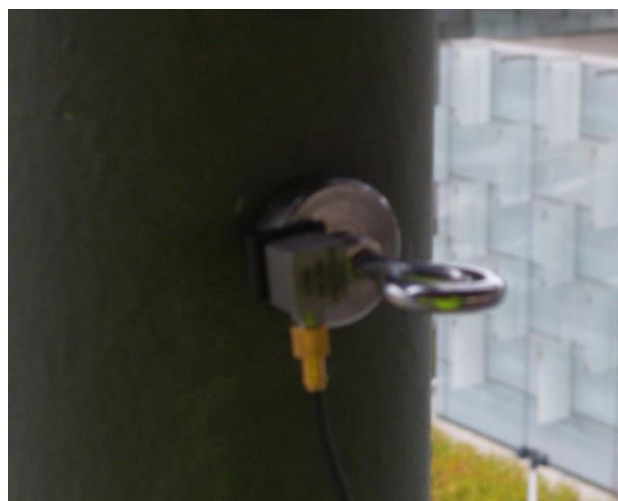


Figura 44: Vista del acceleròmetre sobre tirant de Sur-3.

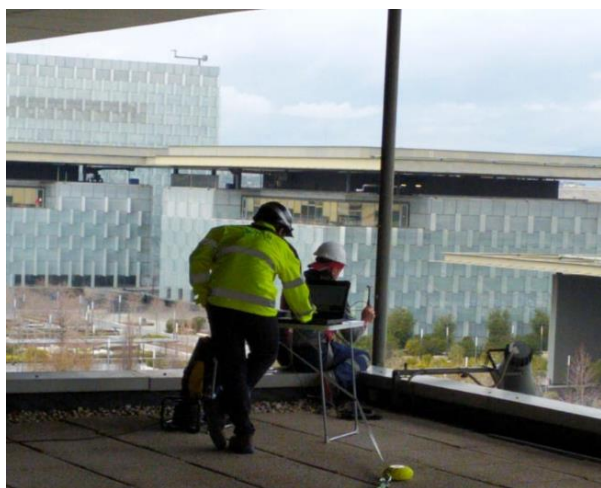


Figura 45: Vista tirant 21 Sur-3.

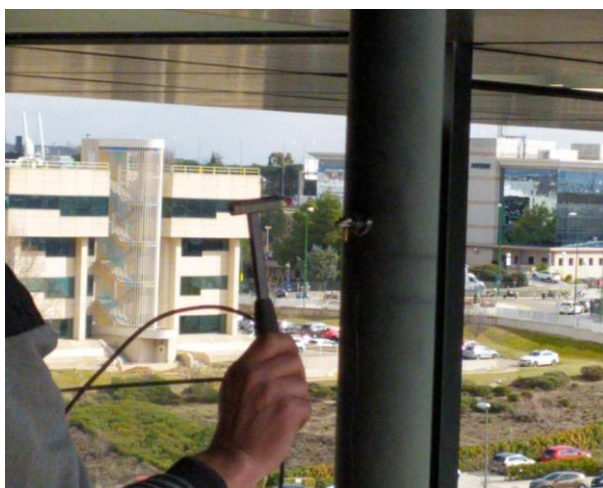


Figura 46: Vista del acceleròmetre sobre tirant i el martell.

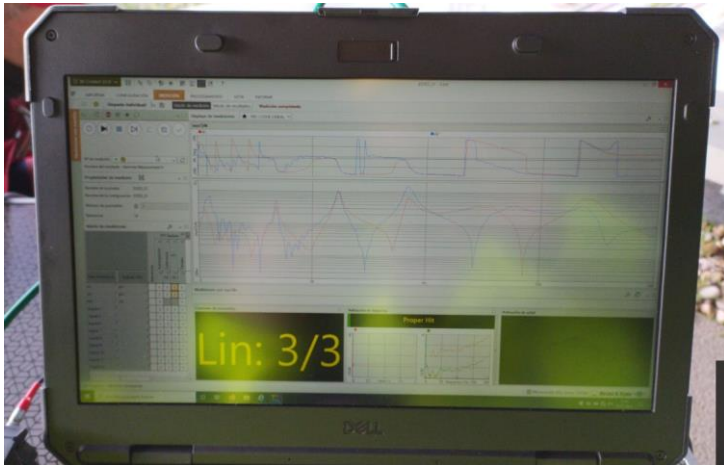


Figura 47: Vista de freqüències en el sistema d'adquisició.



Figura 48: Vista tirant 33 Este-3.



Figura 49: Vista tirant 3 Norte-2.

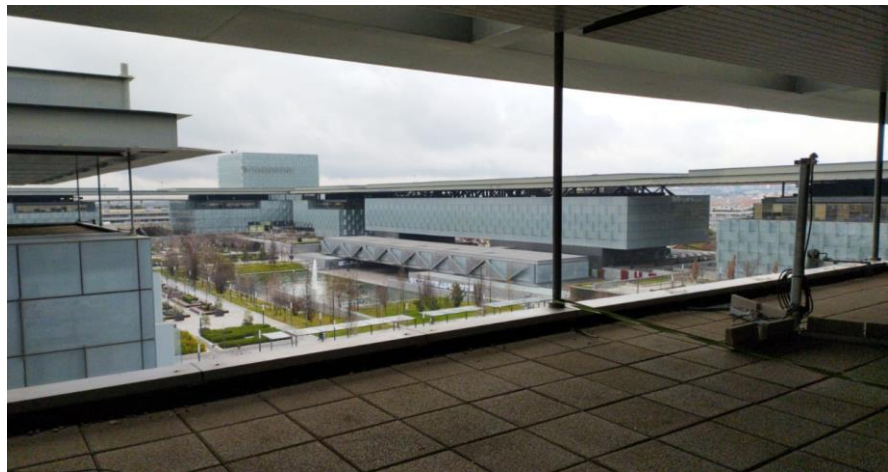
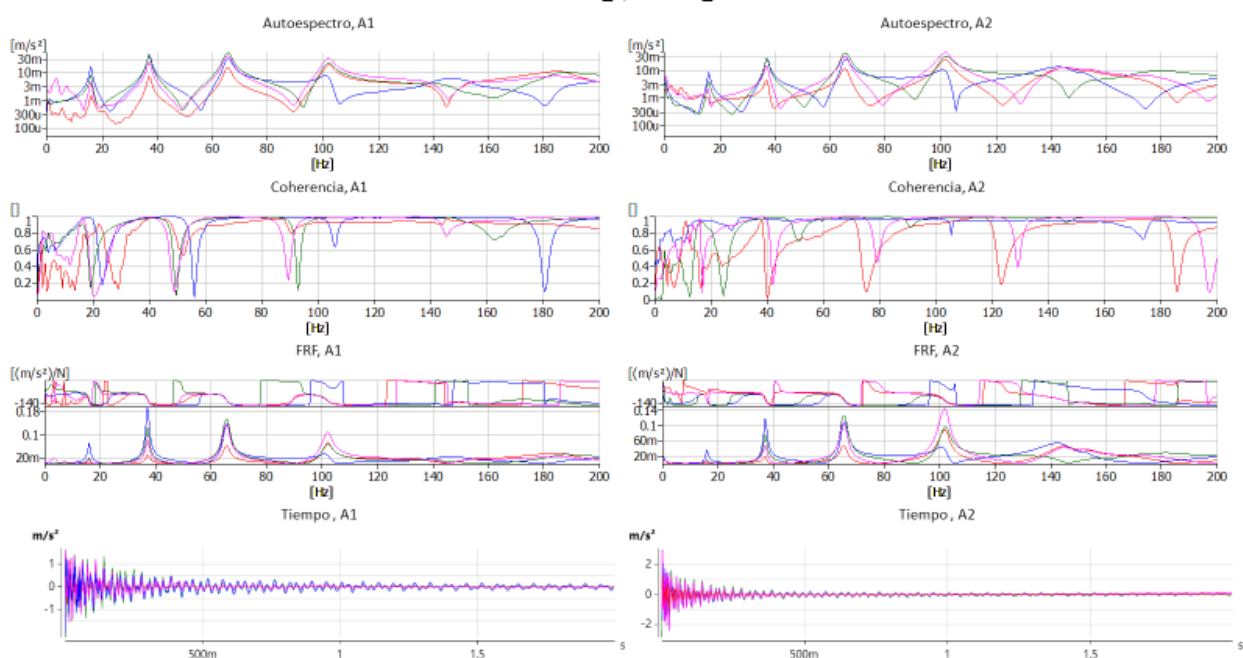


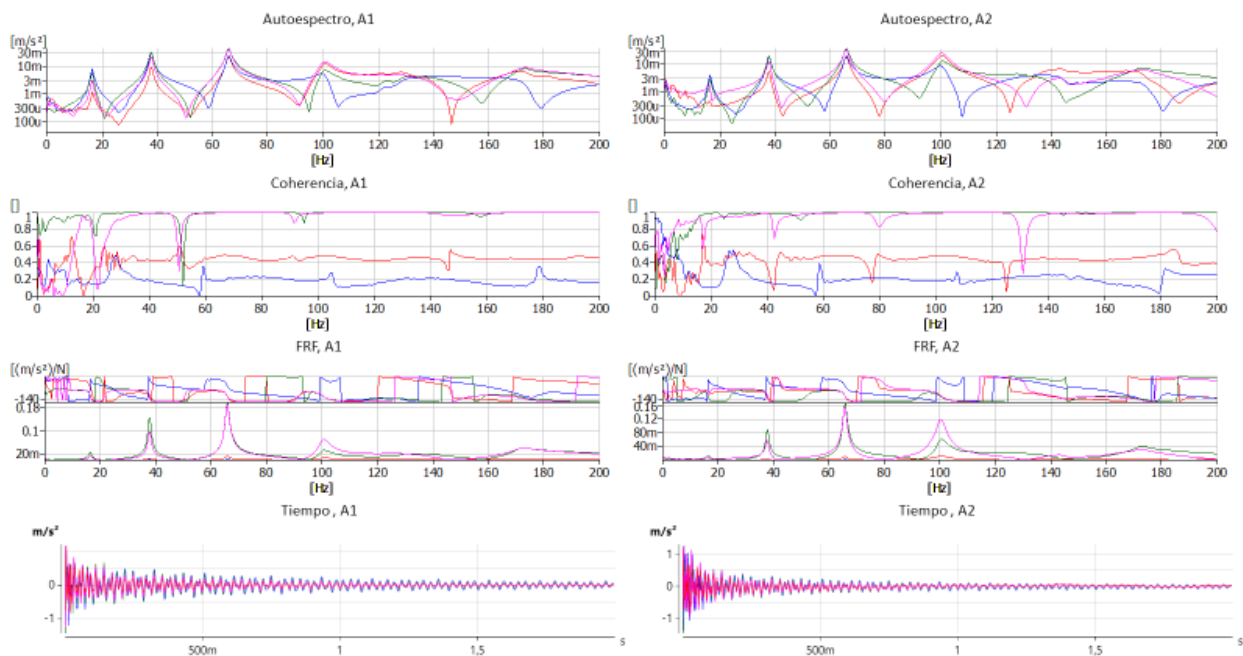
Figura 50: Vista tirants Norte-2.

13. ANNEX – Resposta dinàmica experimental dels tirants, 2020

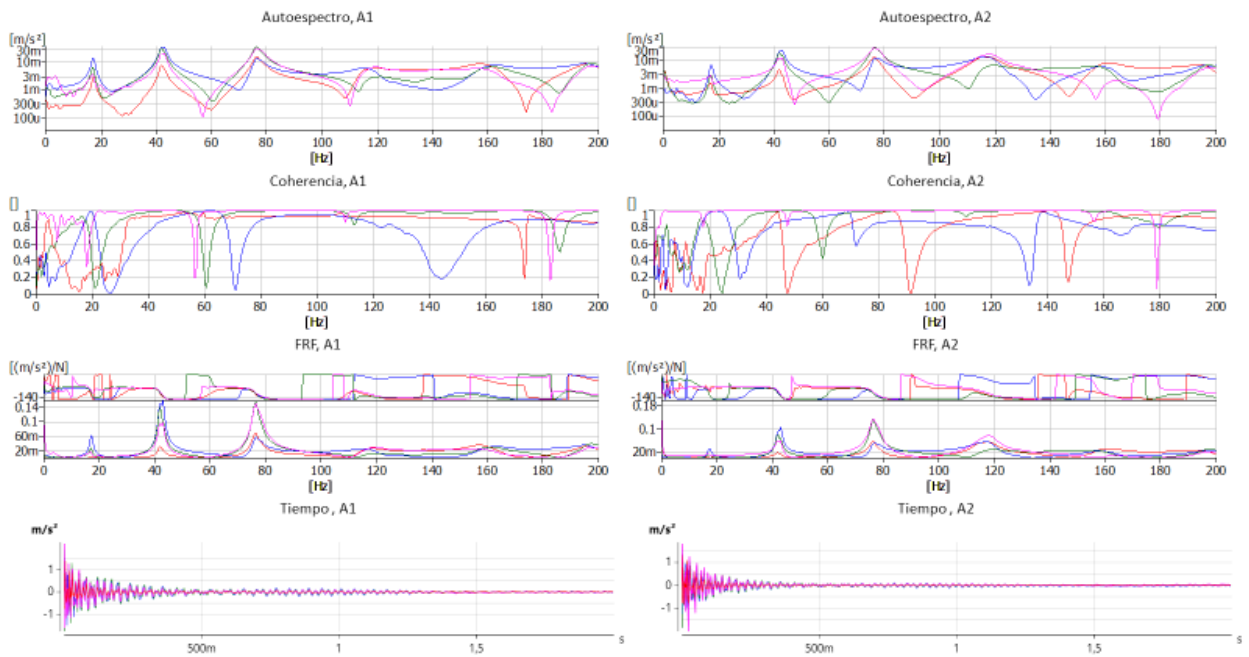
NORTE2_1, NORTE2_1



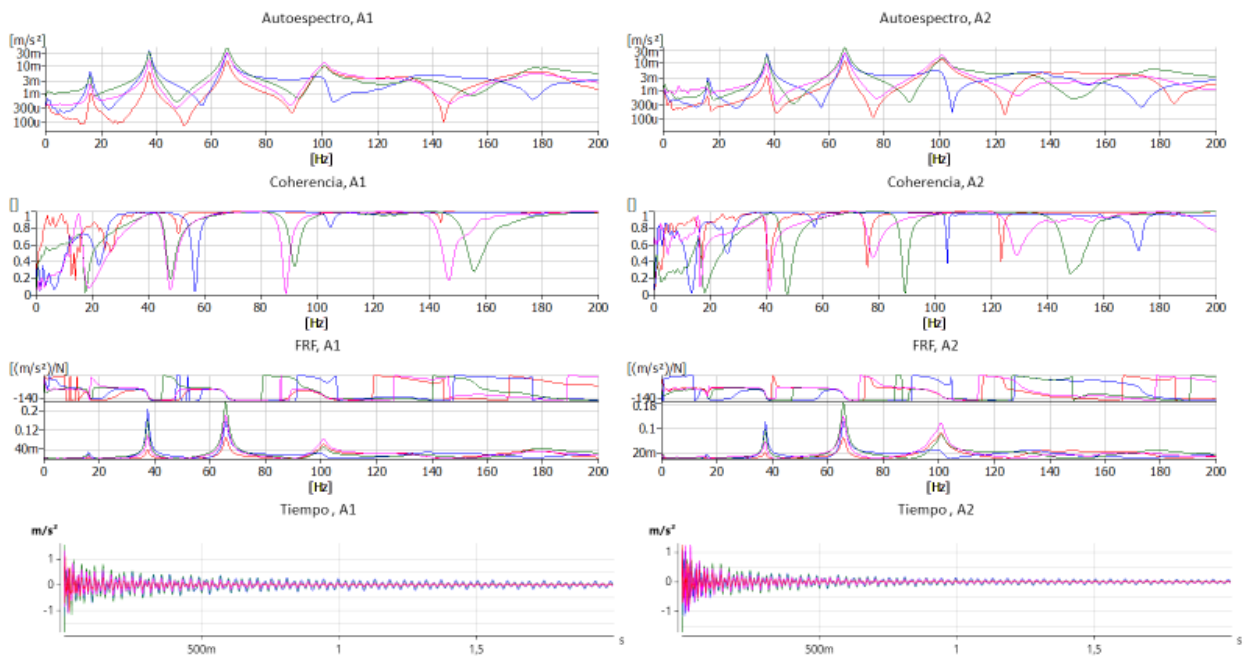
NORTE2_2, NORTE2_2



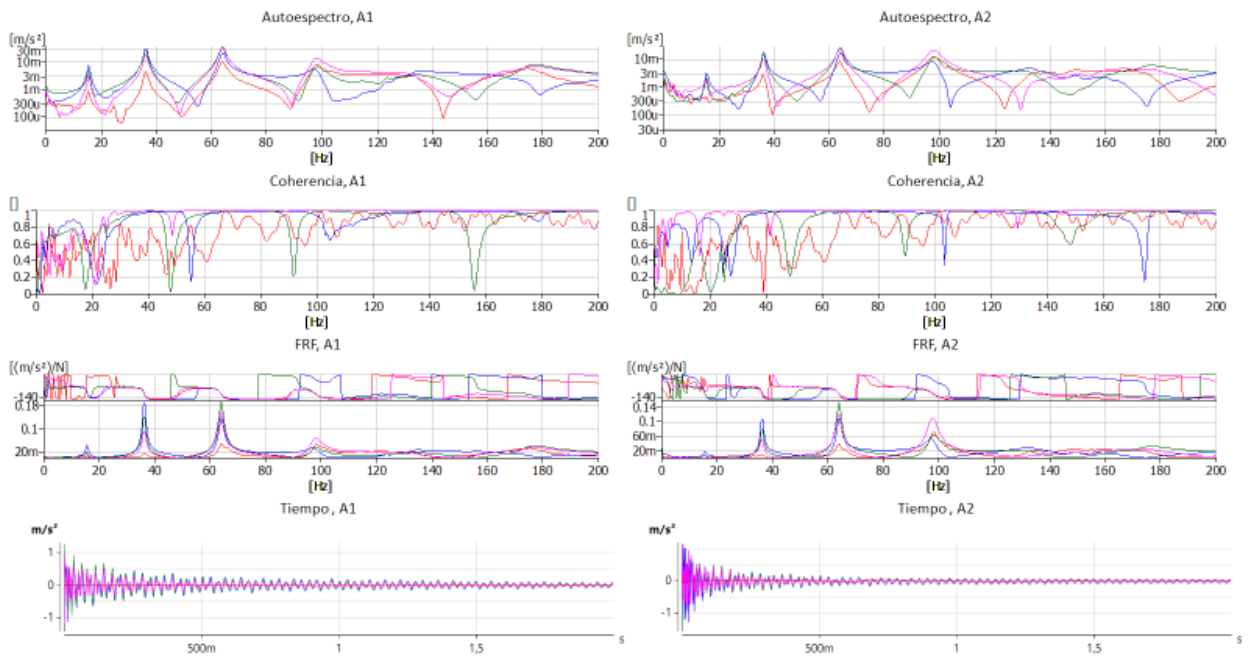
NORTE2_3, NORTE2_3



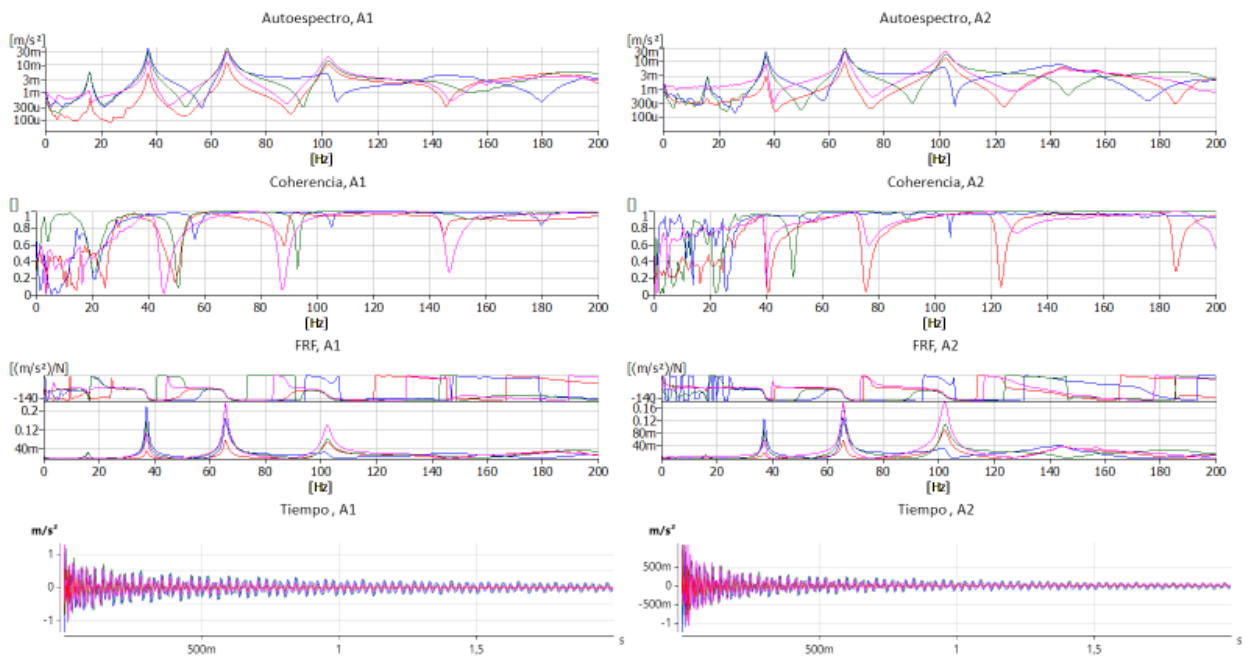
NORTE2_4, NORTE2_4



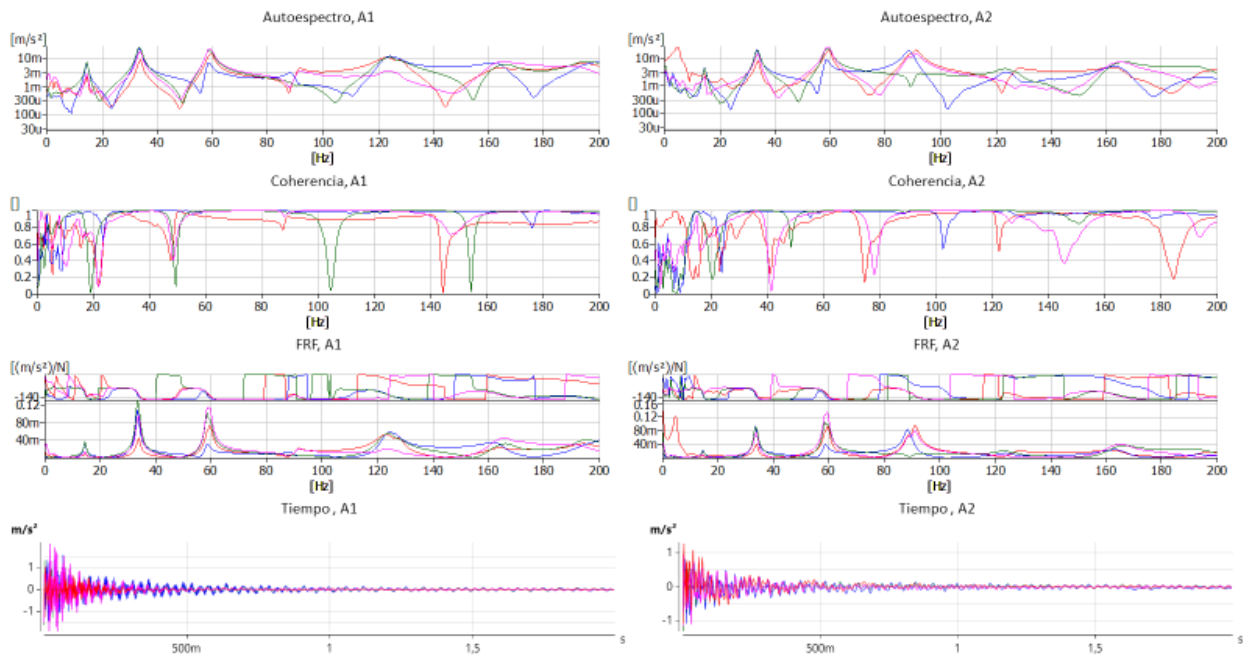
NORTE2_5, NORTE2_5



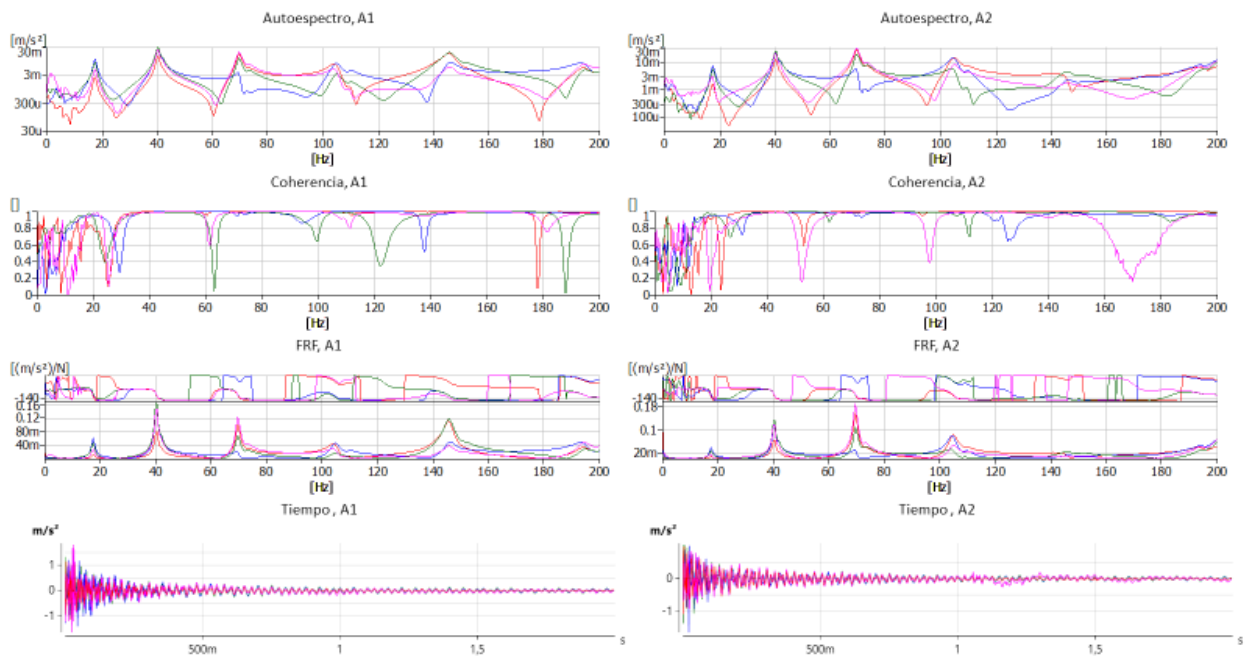
NORTE2_6, NORTE2_6



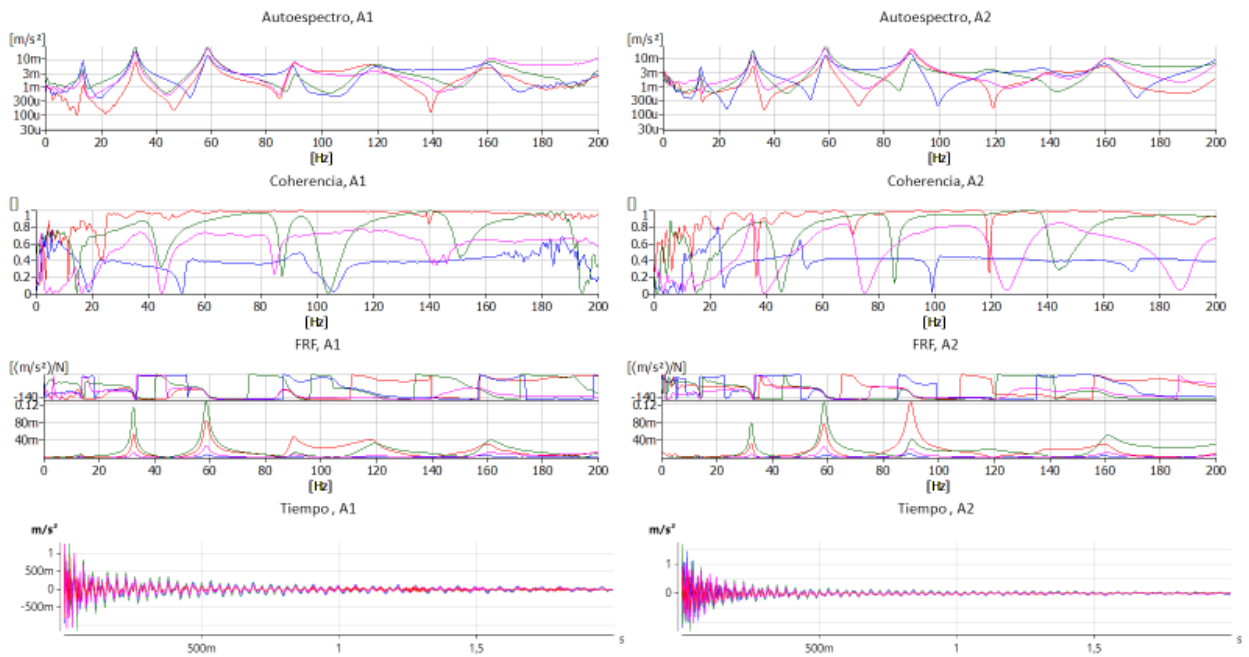
NORTE3_7, NORTE3_7



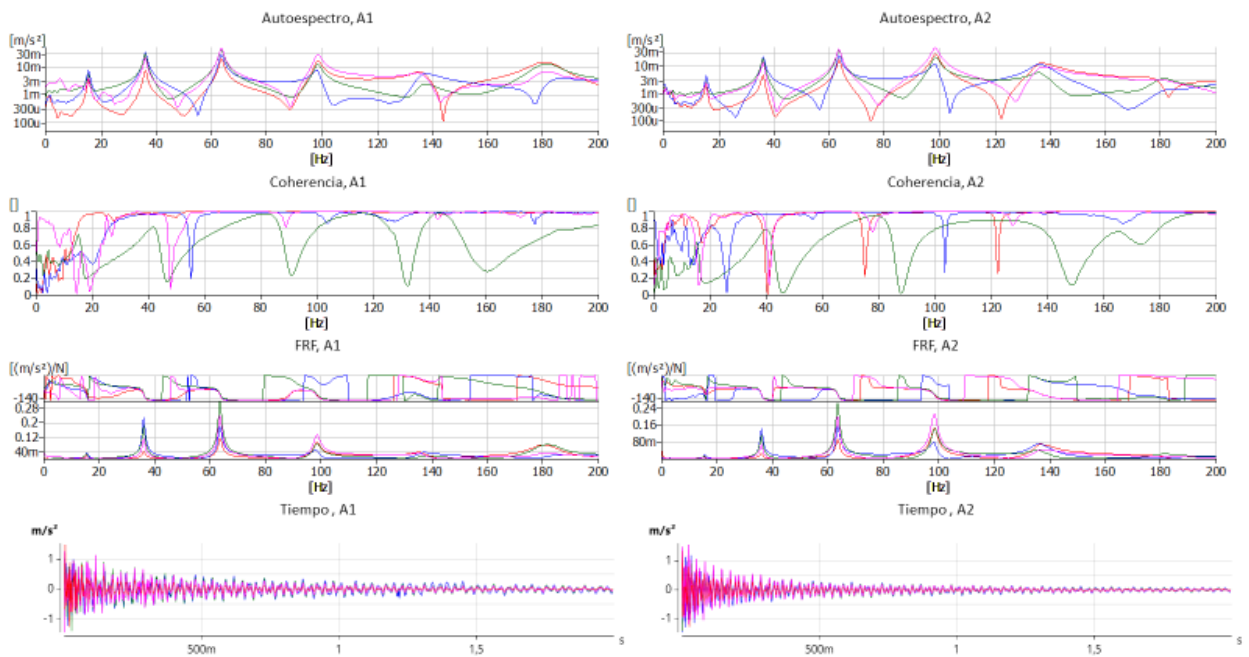
NORTE3_8, NORTE3_8



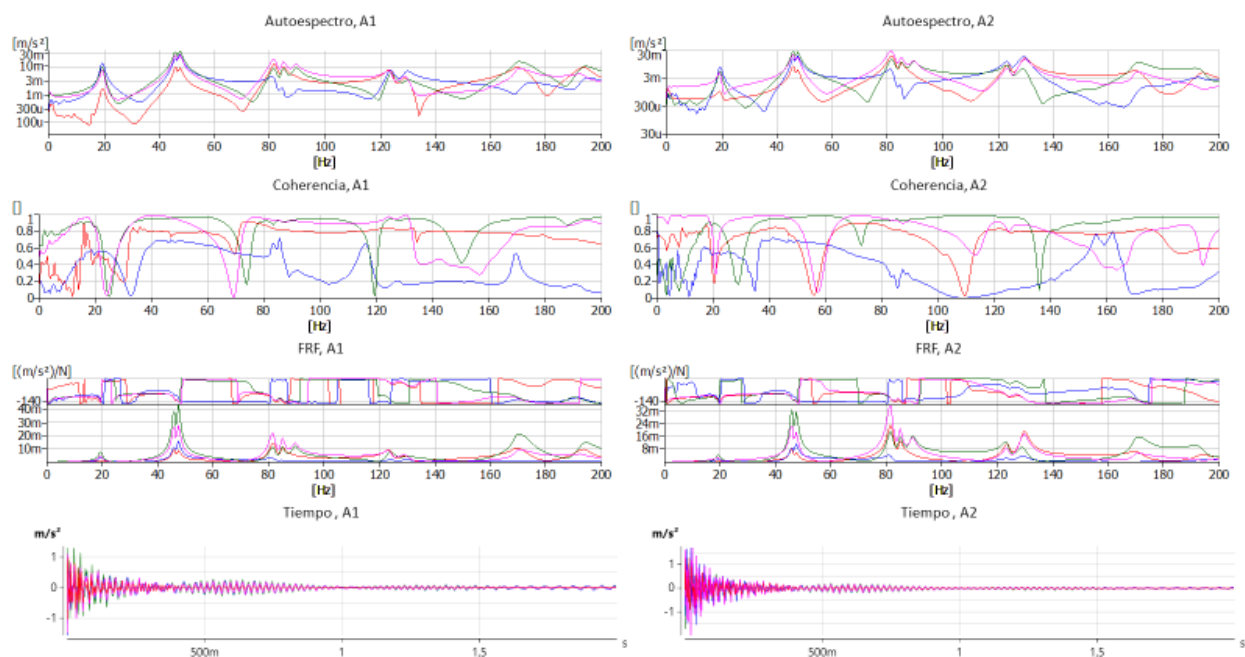
NORTE3_9, NORTE3_9



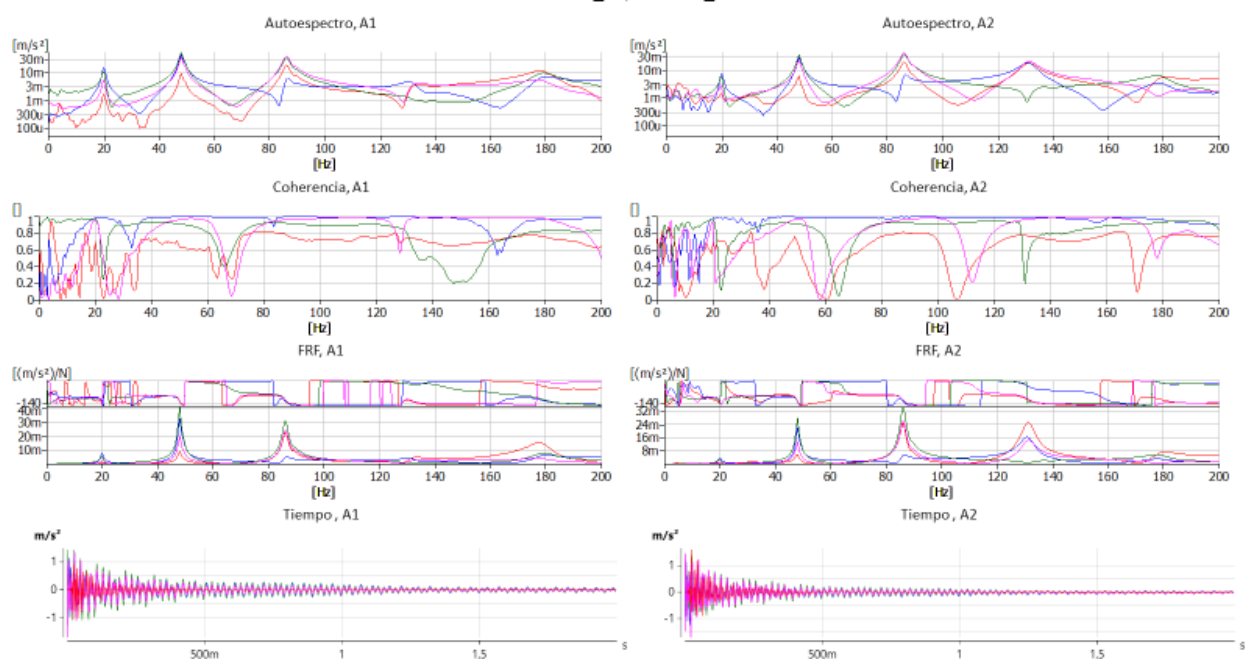
NORTE3_10, NORTE3_10



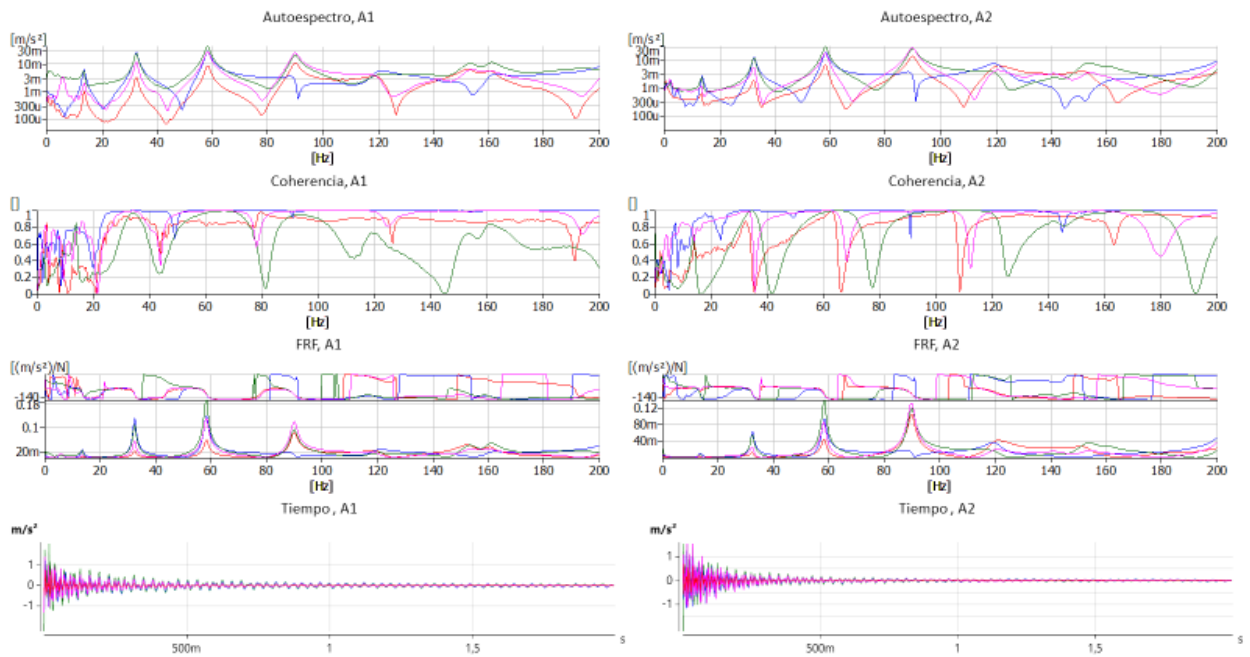
NORTE3_11, NORTE3_11



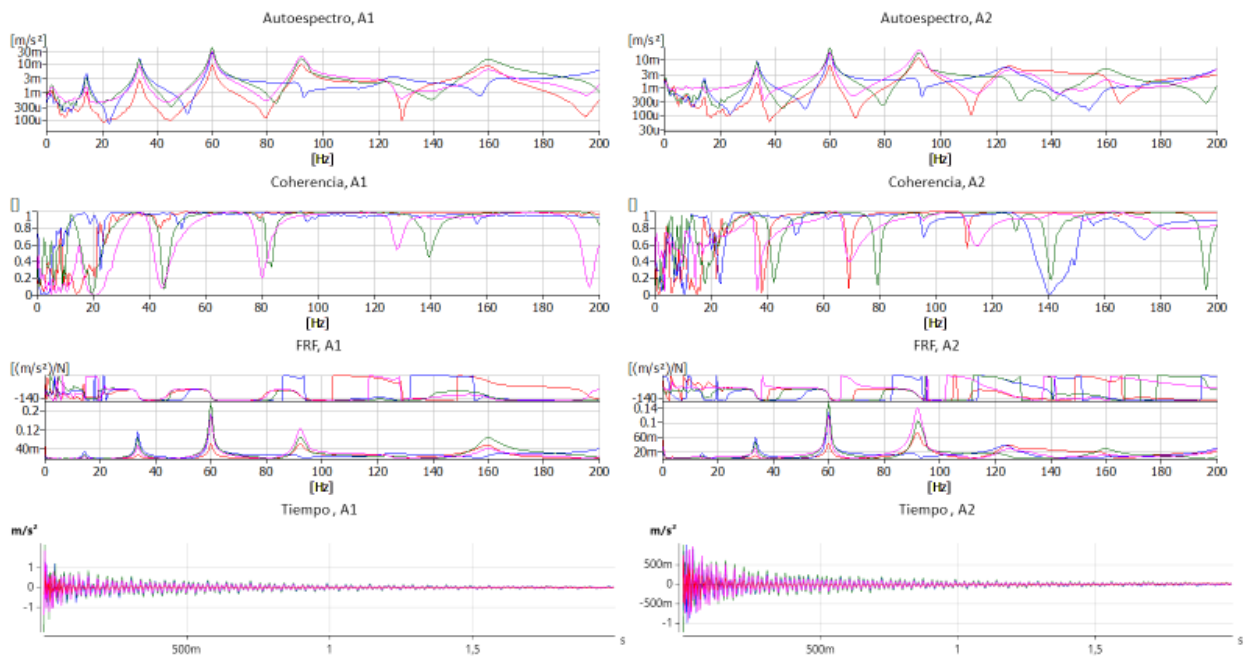
NORTE3_12, NORTE3_12



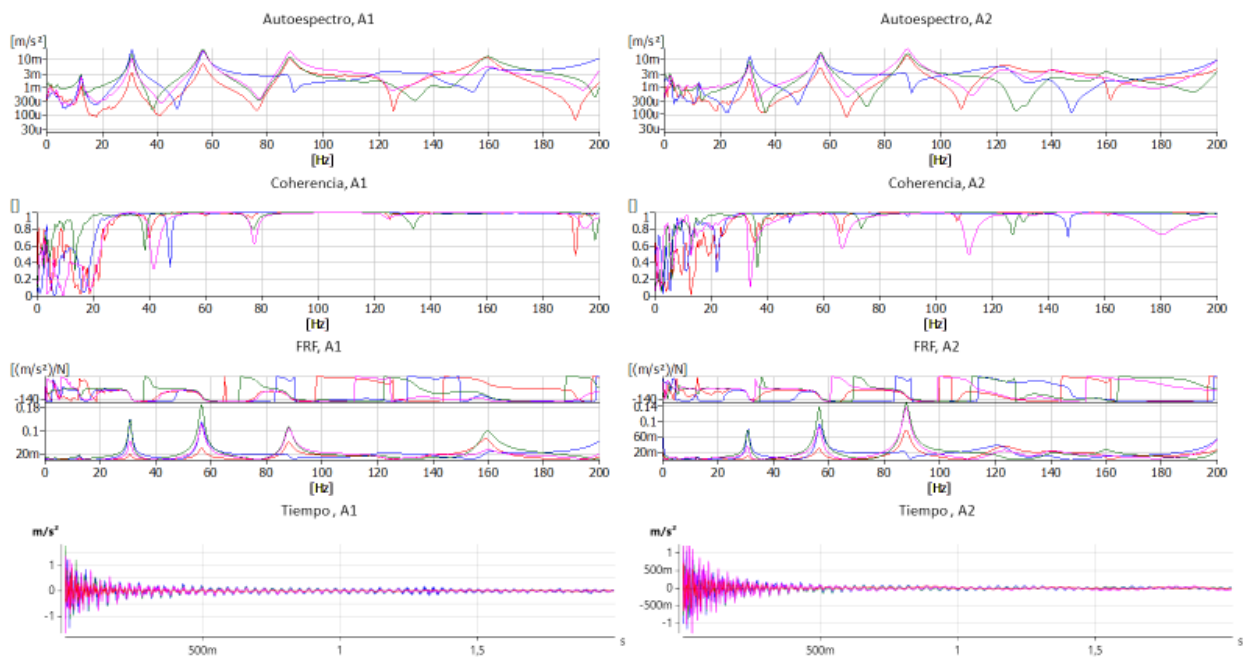
SUR2_13, SUR2_13



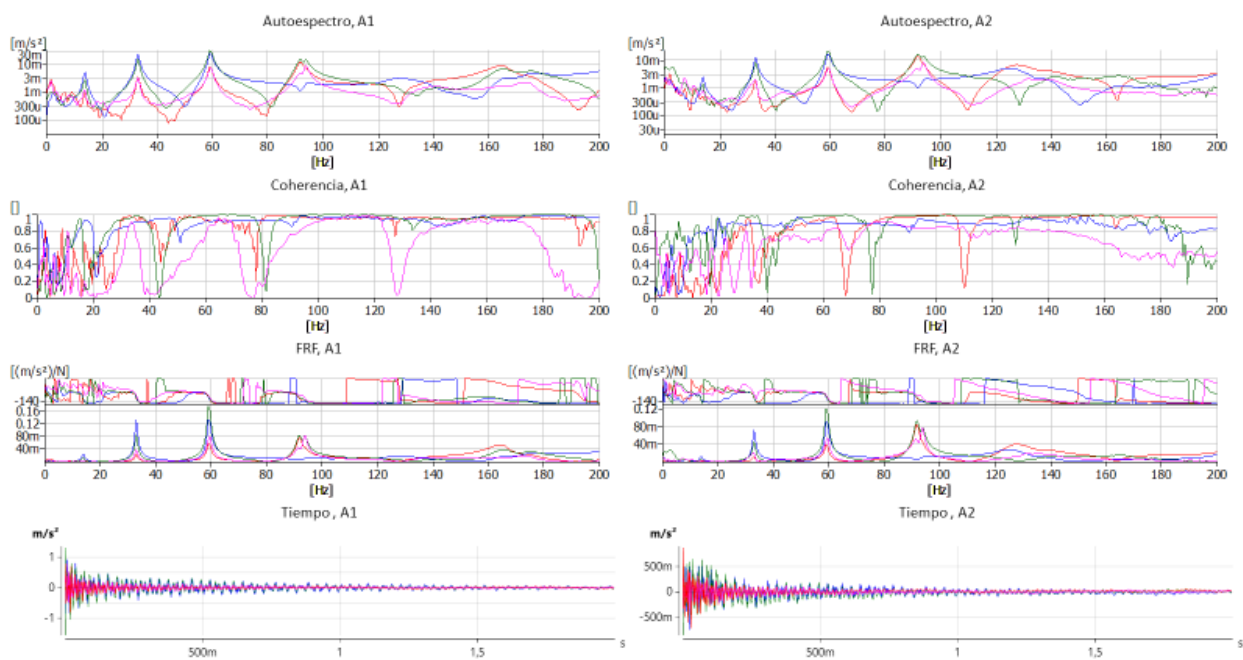
SUR2_14, SUR2_14



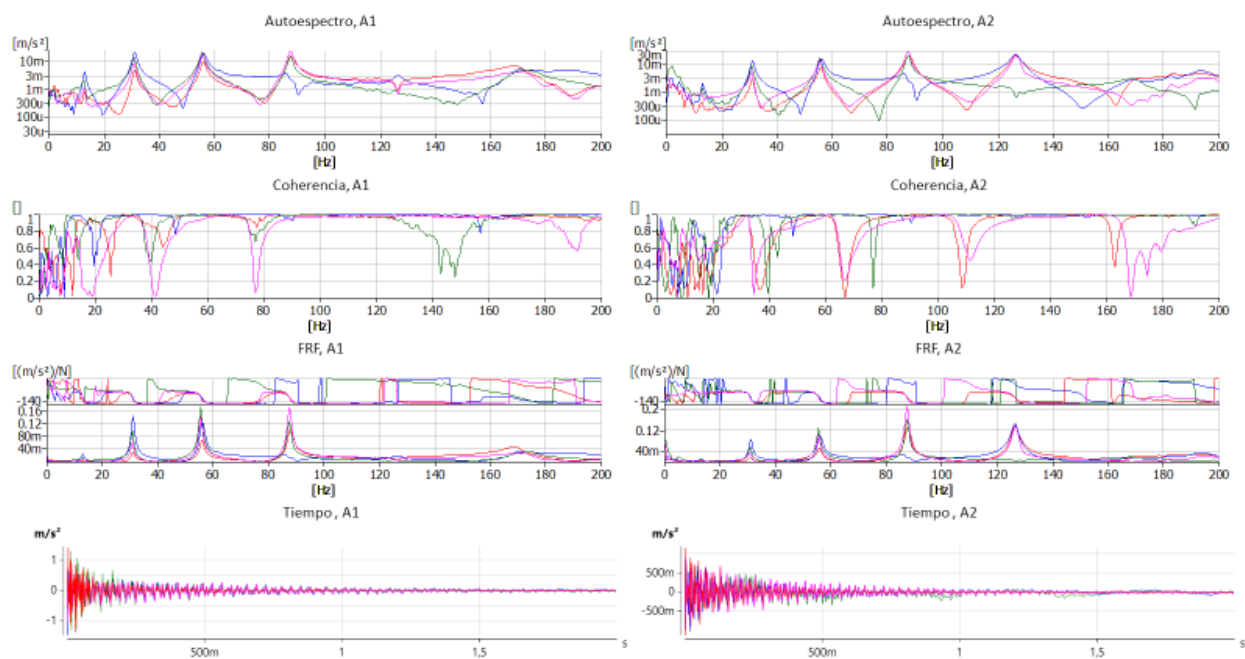
SUR2_15, SUR2_15



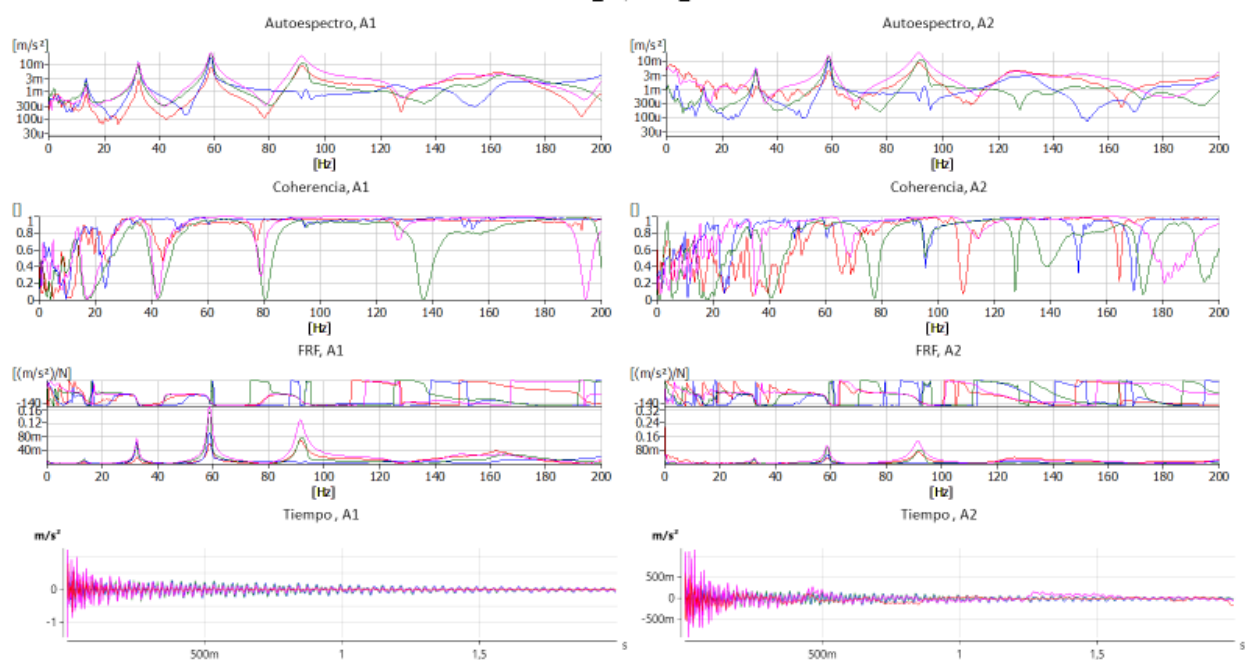
SUR2_16, SUR2_16



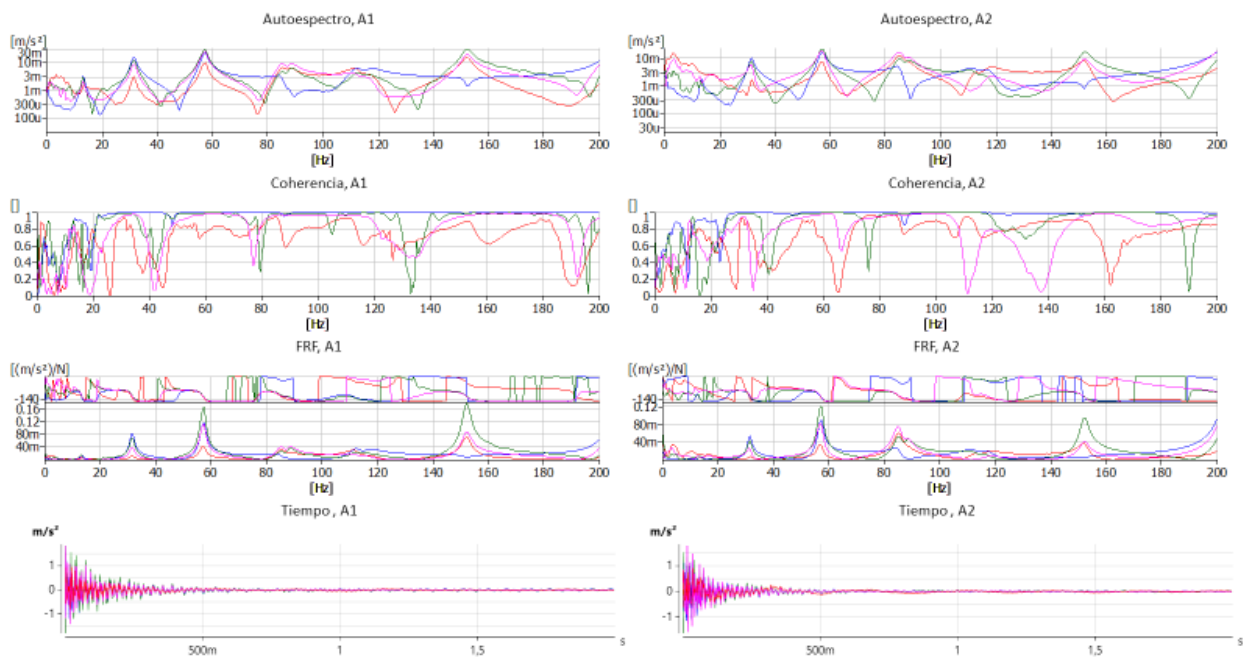
SUR2_17, SUR2_17



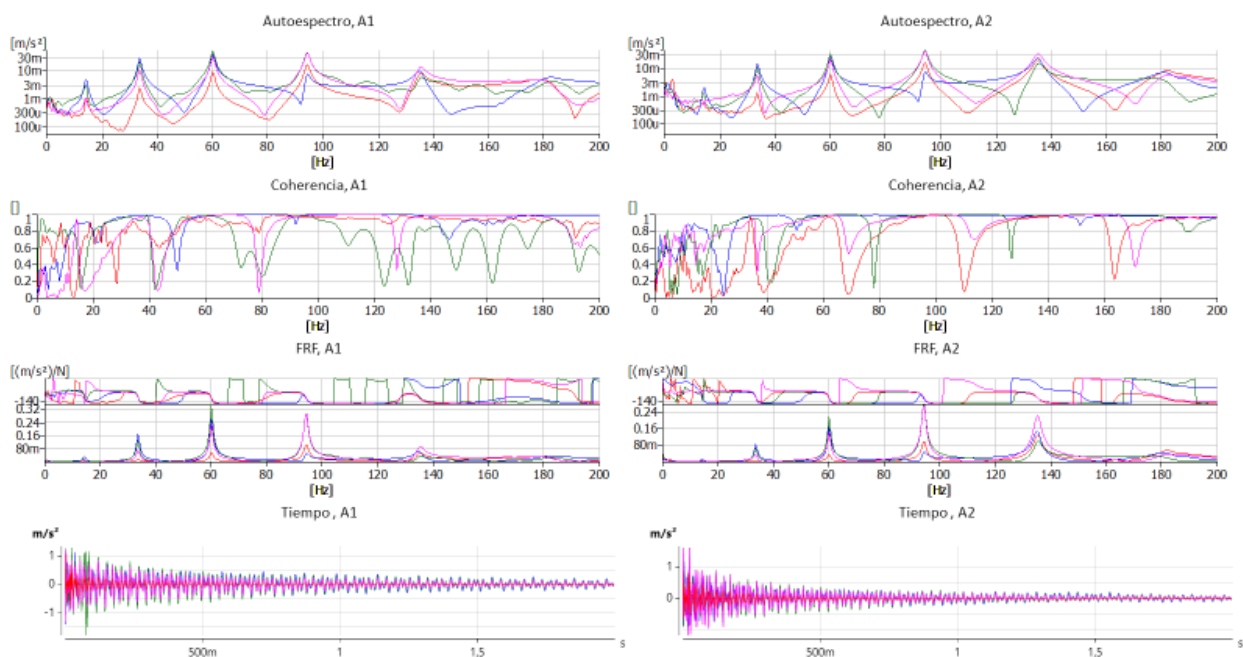
SUR2_18, SUR2_18



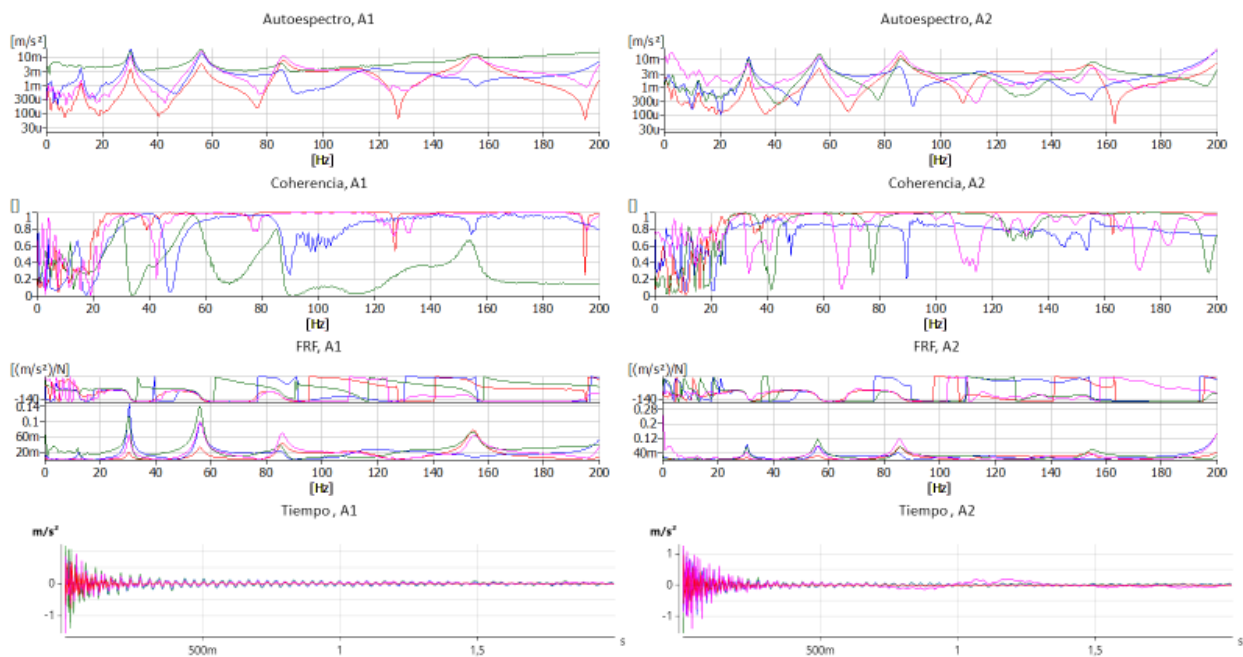
SUR3_19, SUR3_19



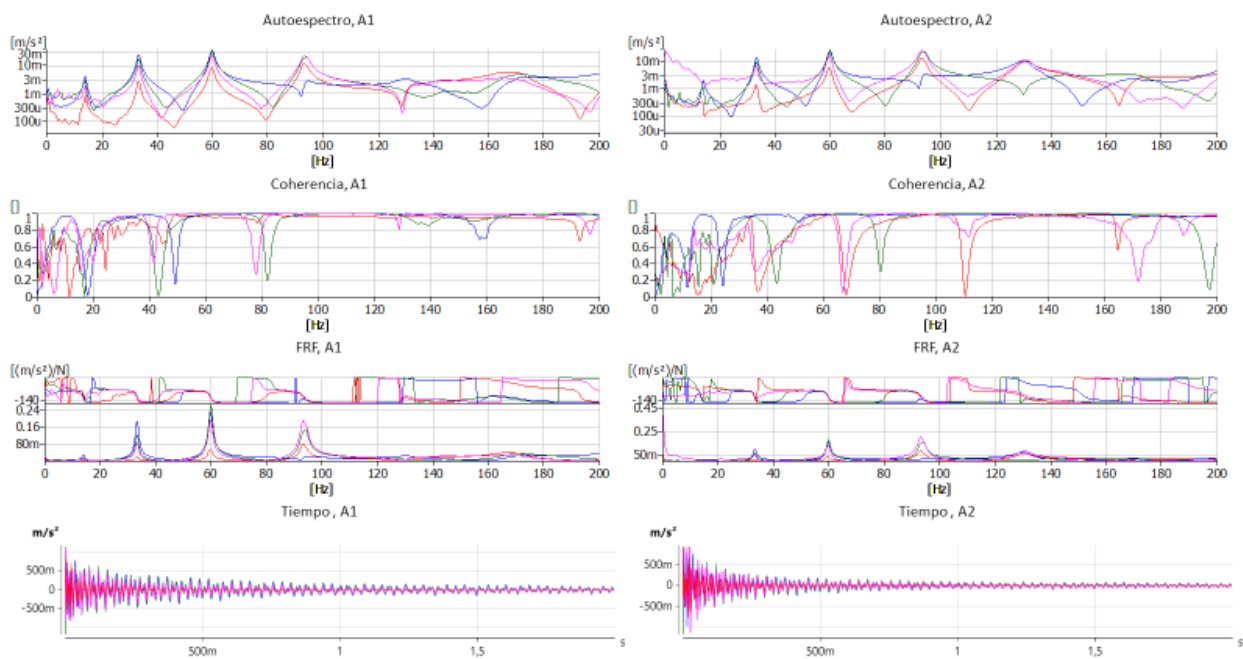
SUR3_20, SUR3_20



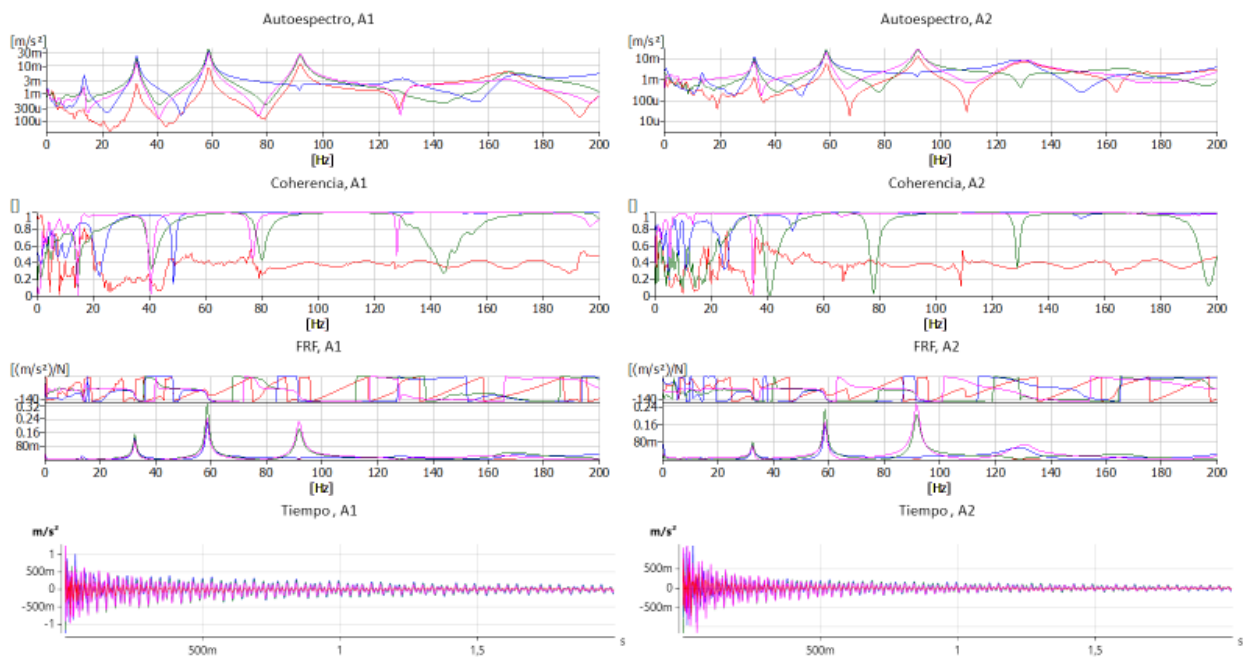
SUR3_21, SUR3_21



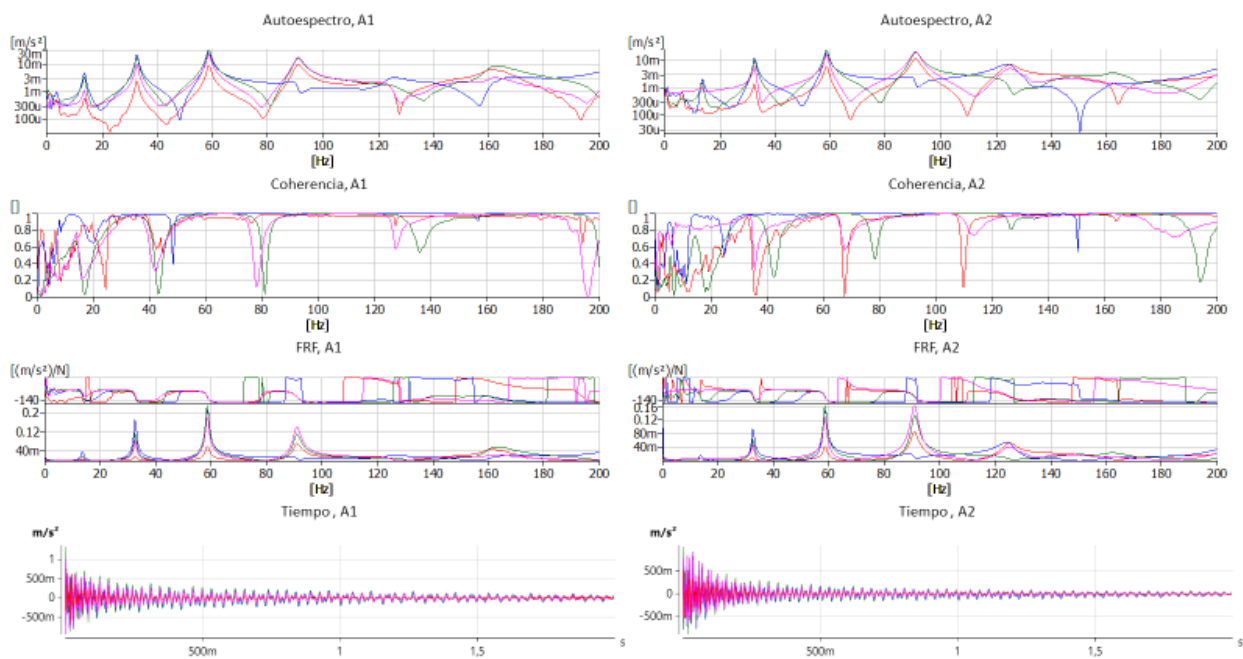
SUR3_22, SUR3_22



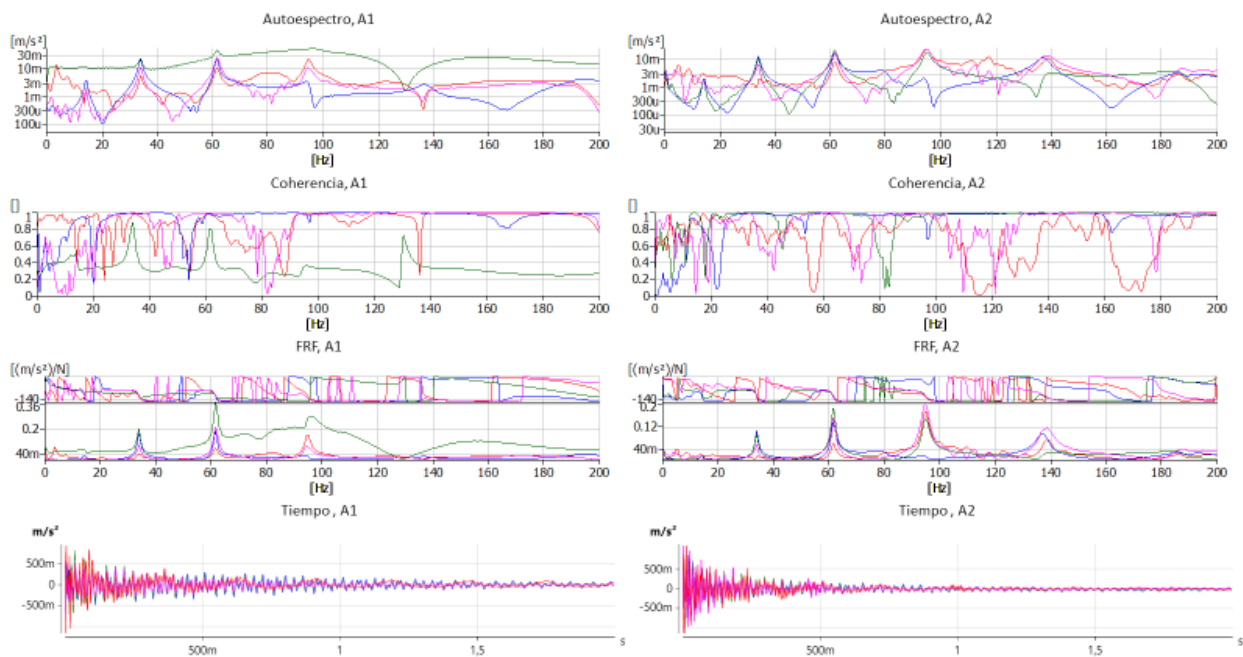
SUR3_23, SUR3_23



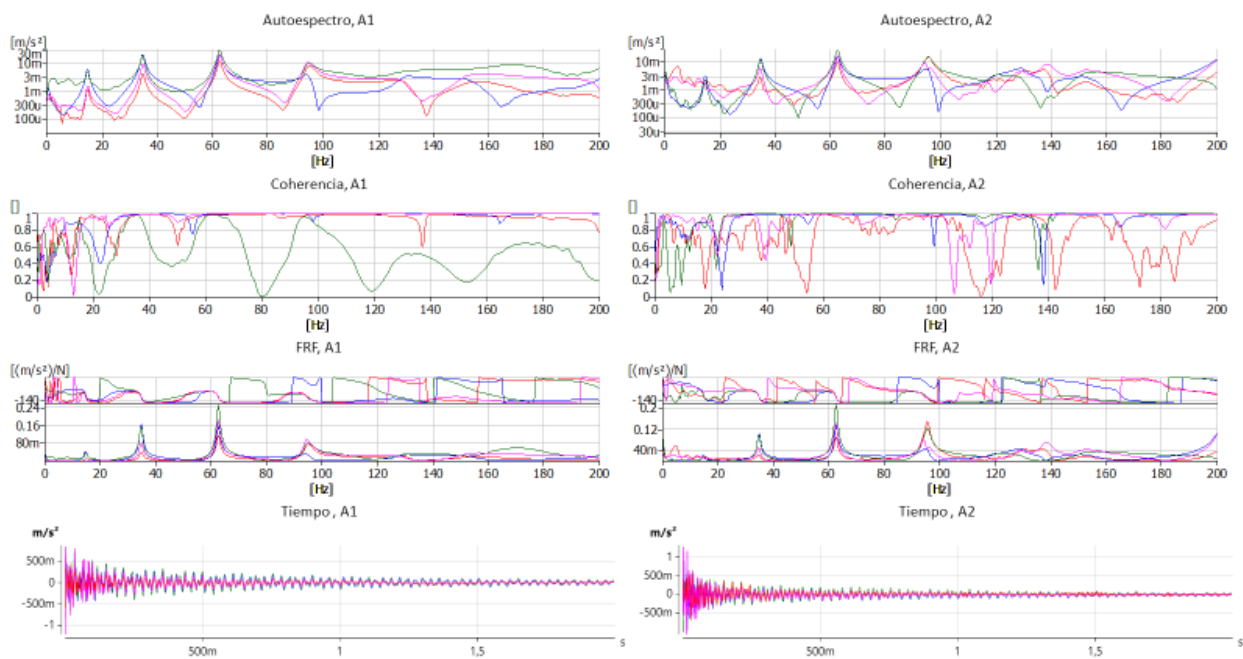
SUR3_24, SUR3_24



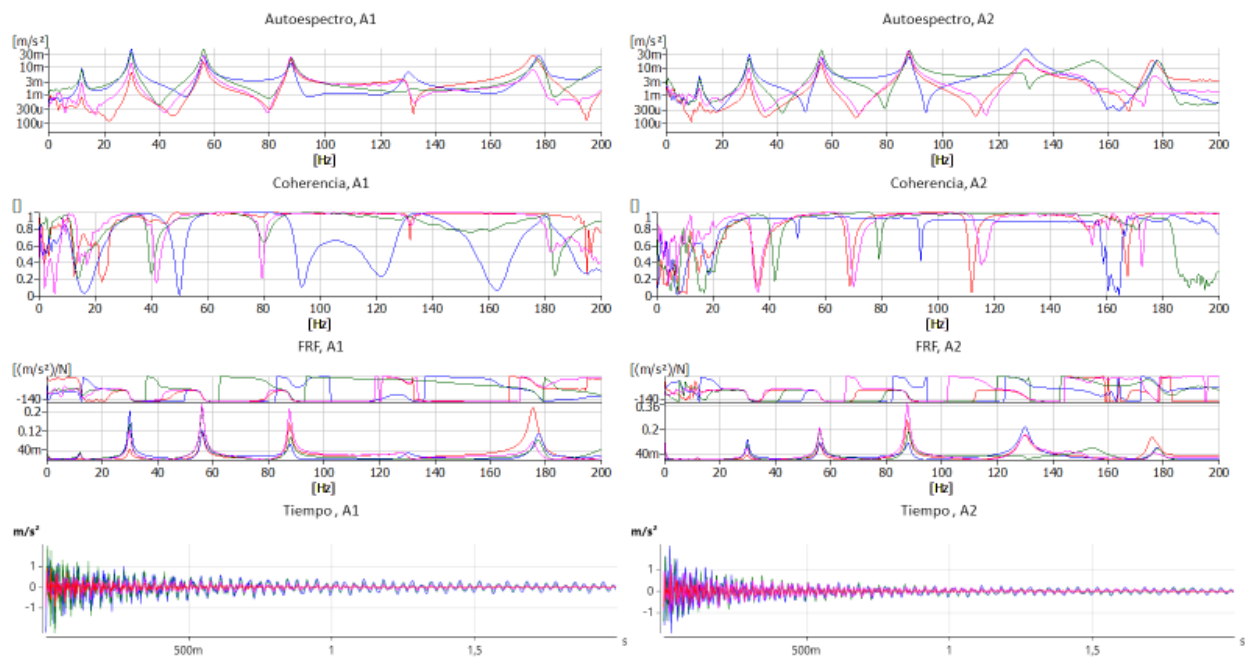
ESTE2_25, ESTE2_25



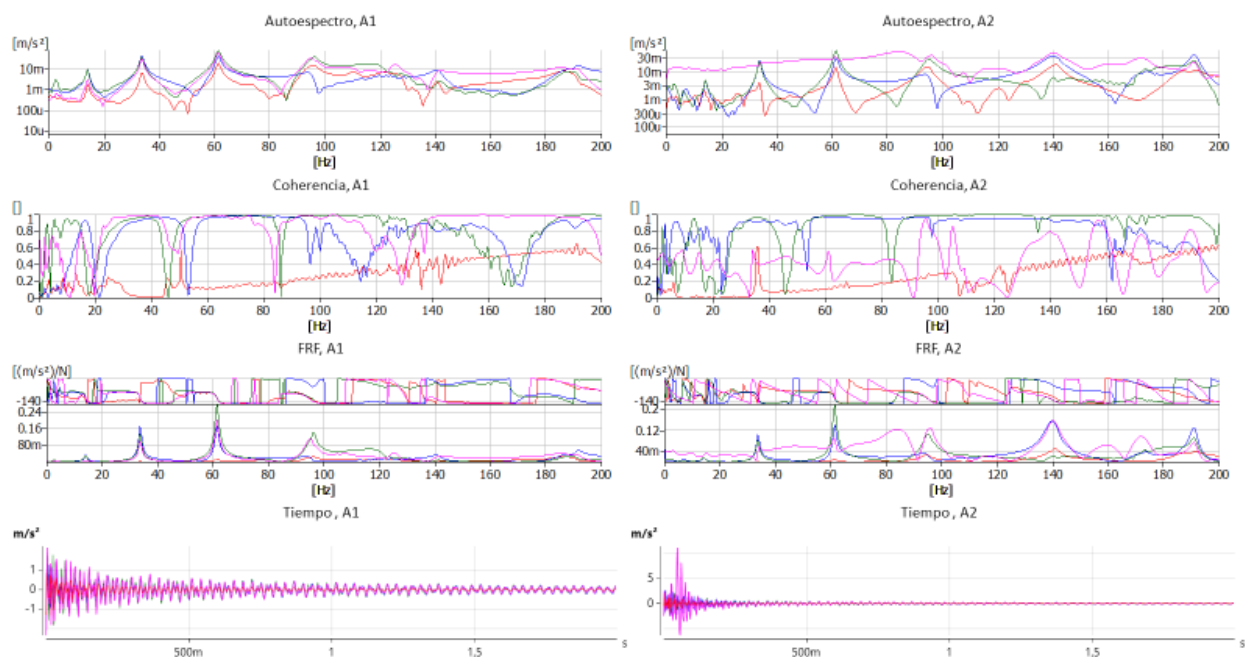
ESTE2_26, ESTE2_26



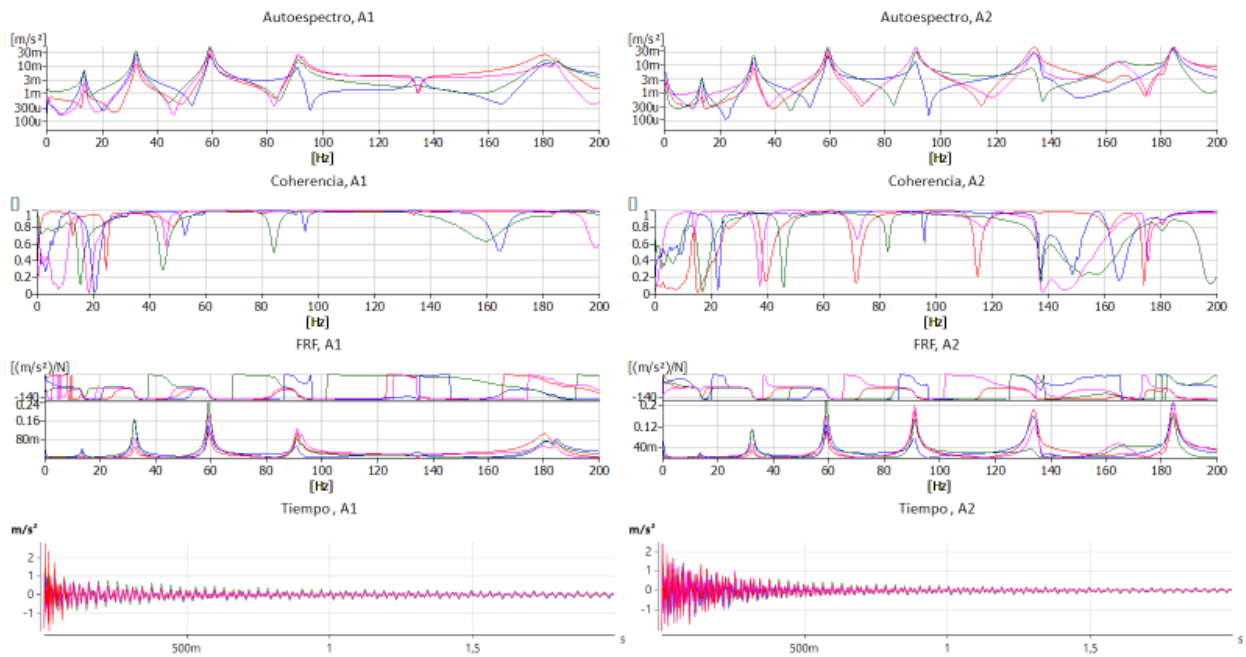
ESTE2_27, ESTE2_27



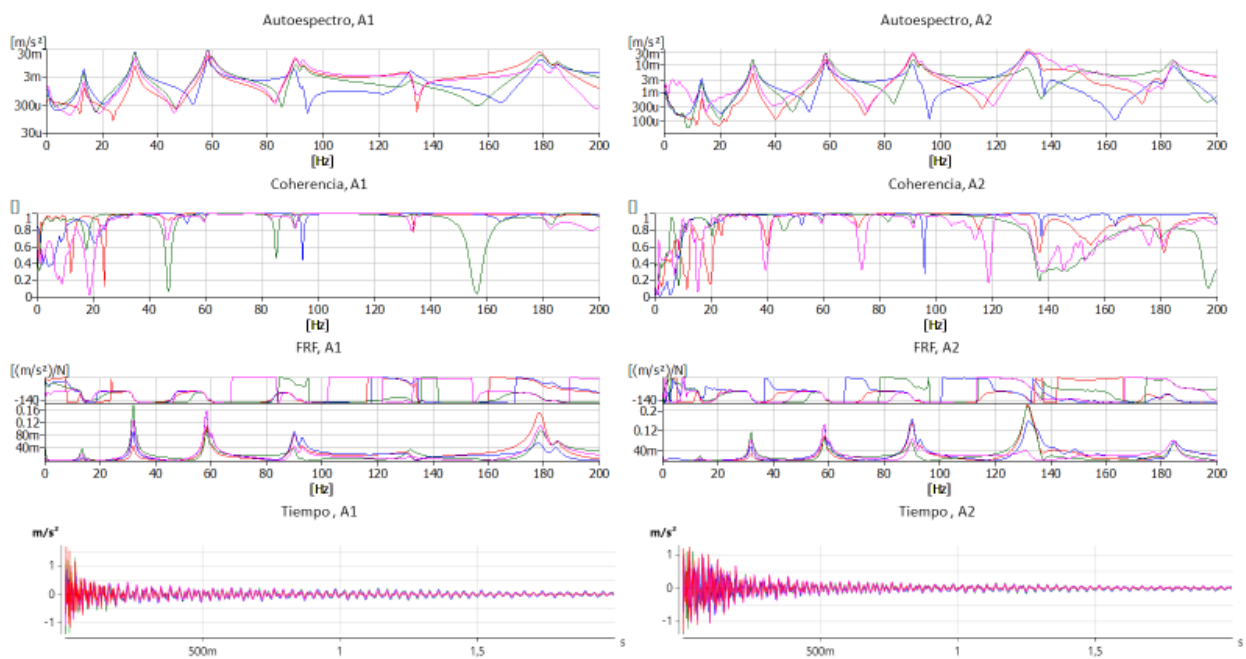
ESTE2_28, ESTE2_28



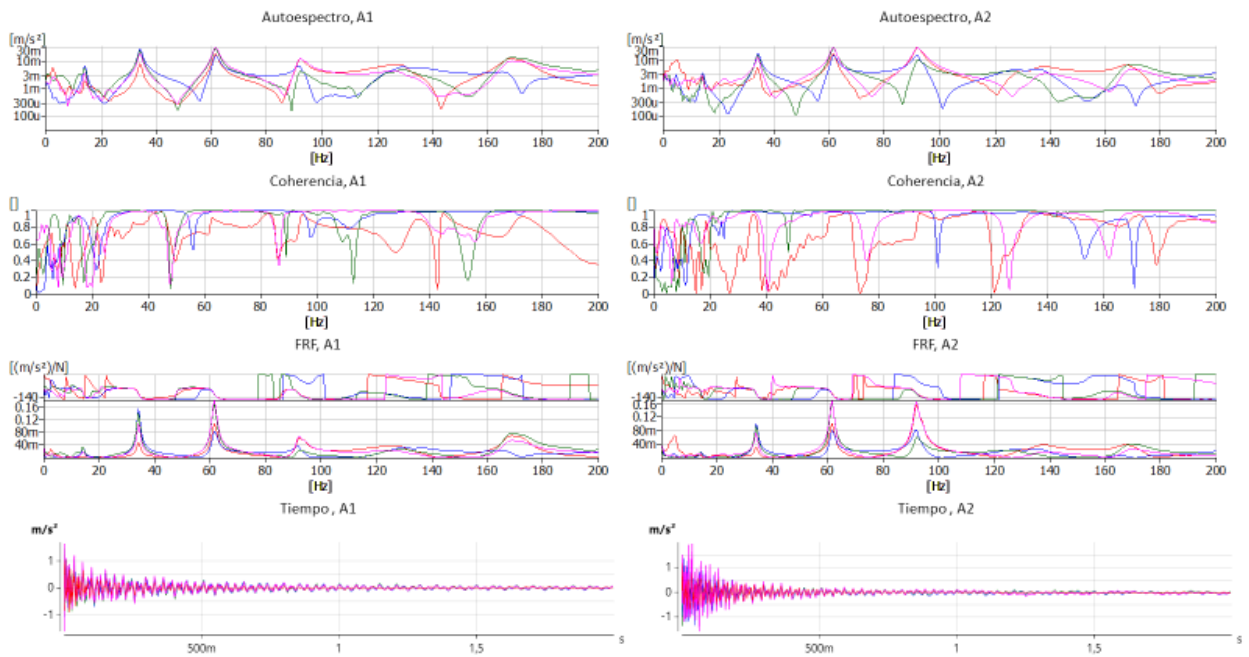
ESTE2_29, ESTE2_29



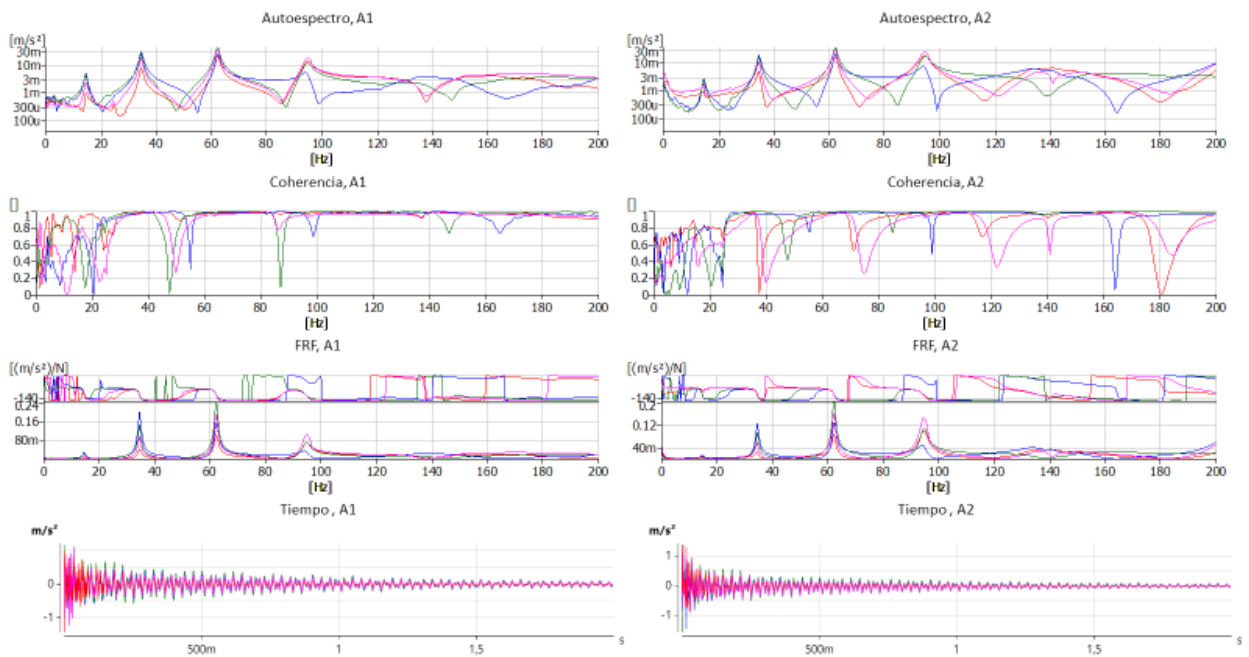
ESTE2_30, ESTE2_30



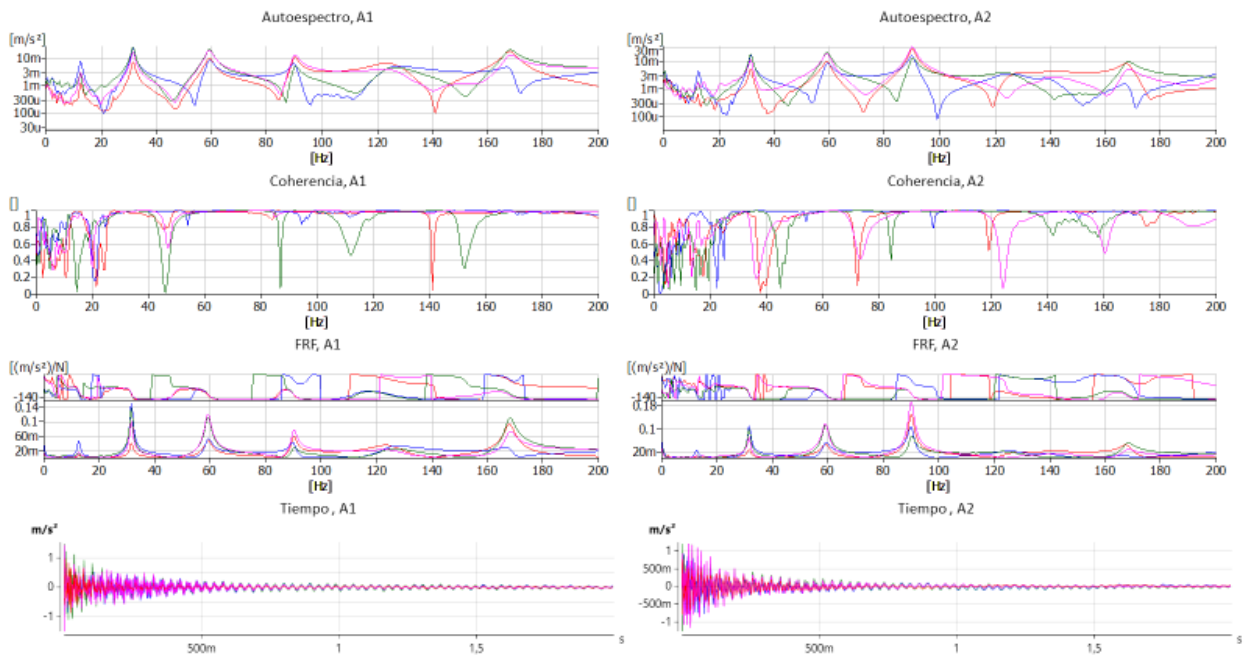
ESTE3_31, ESTE3_31



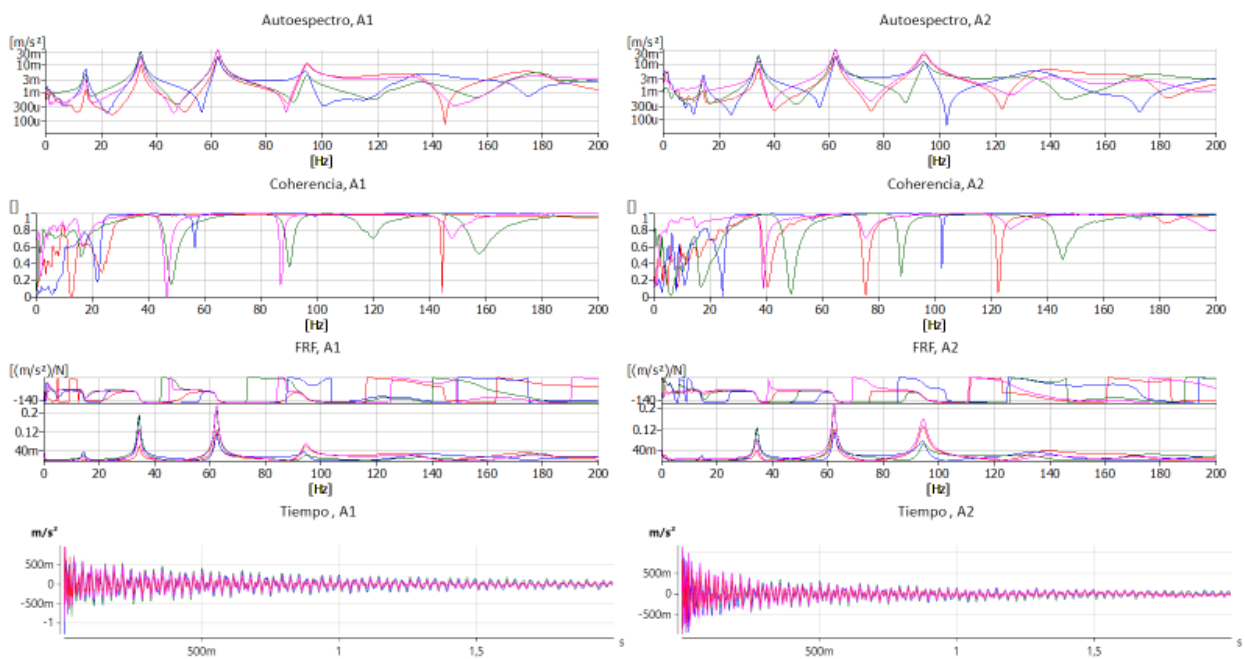
ESTE3_32, ESTE3_32



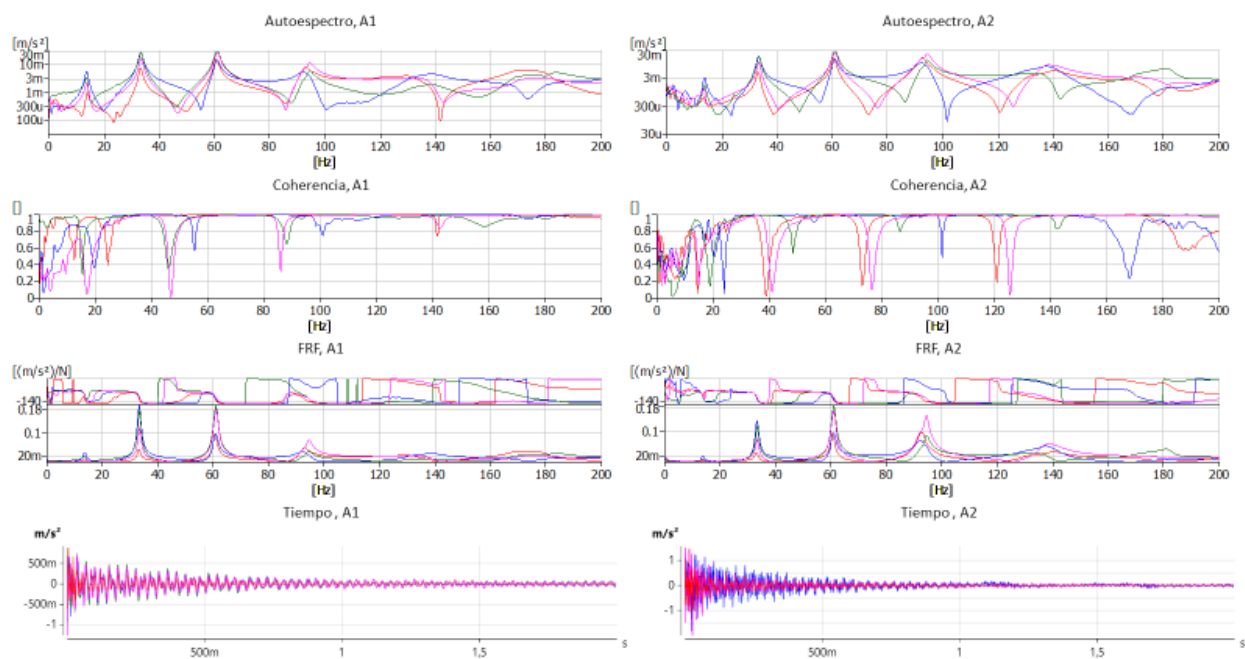
ESTE3_33, ESTE3_33



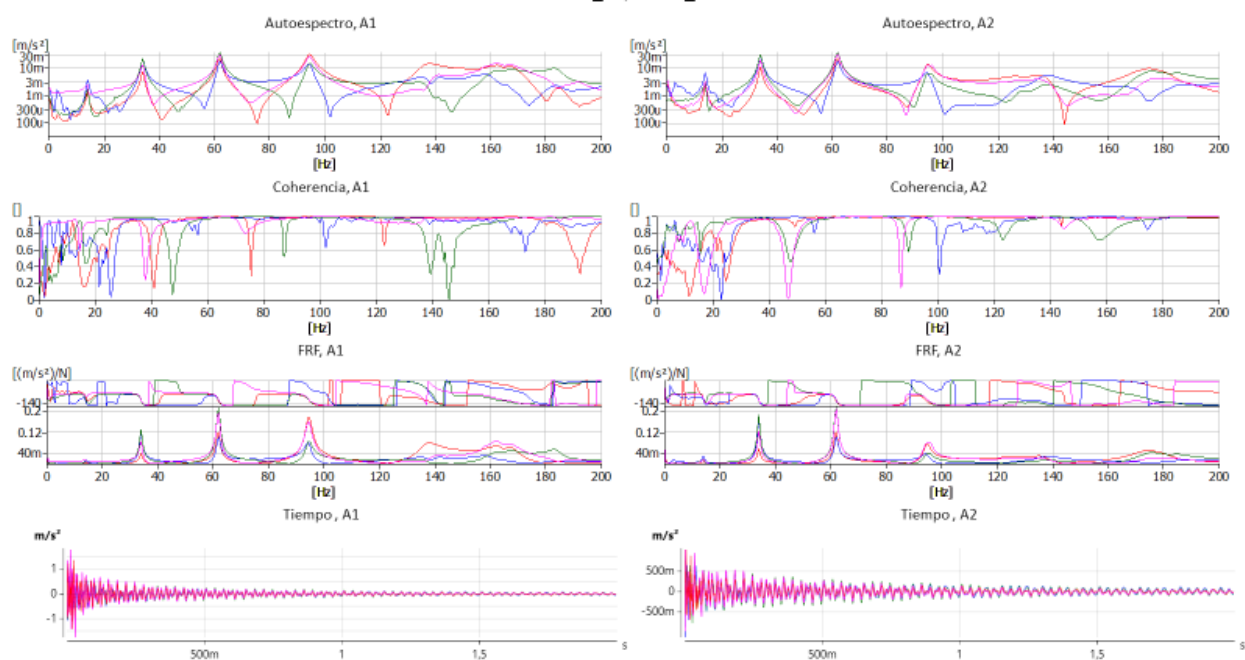
ESTE3_34, ESTE3_34



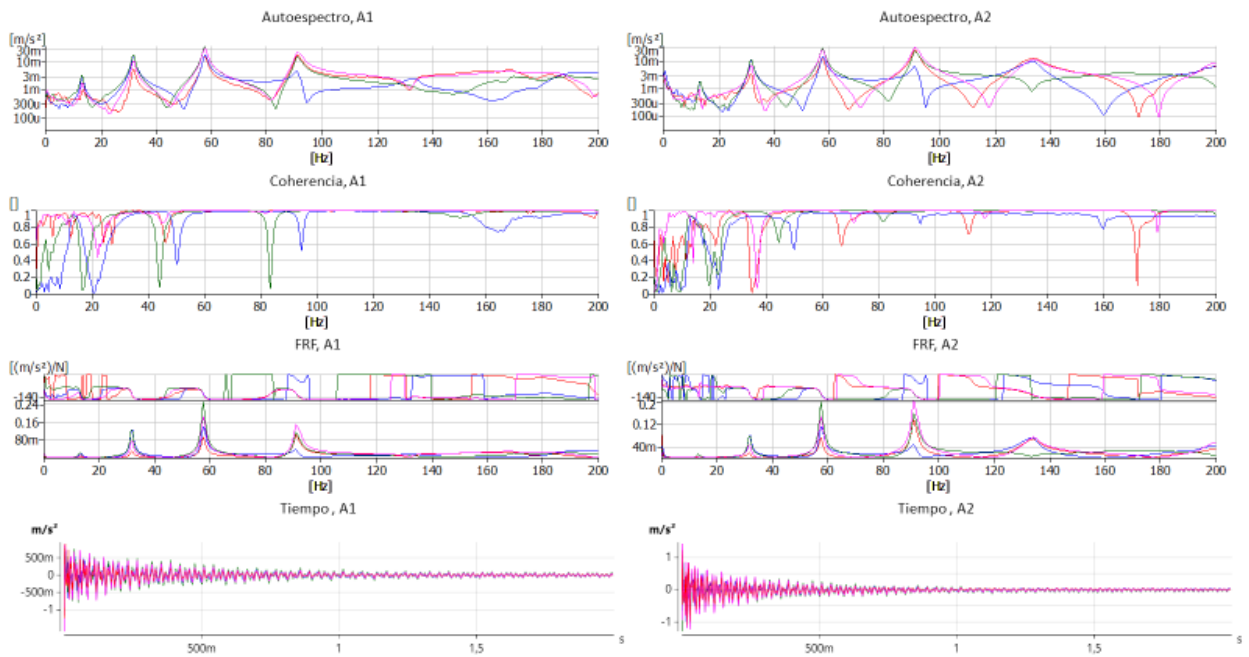
ESTE3_35, ESTE3_35



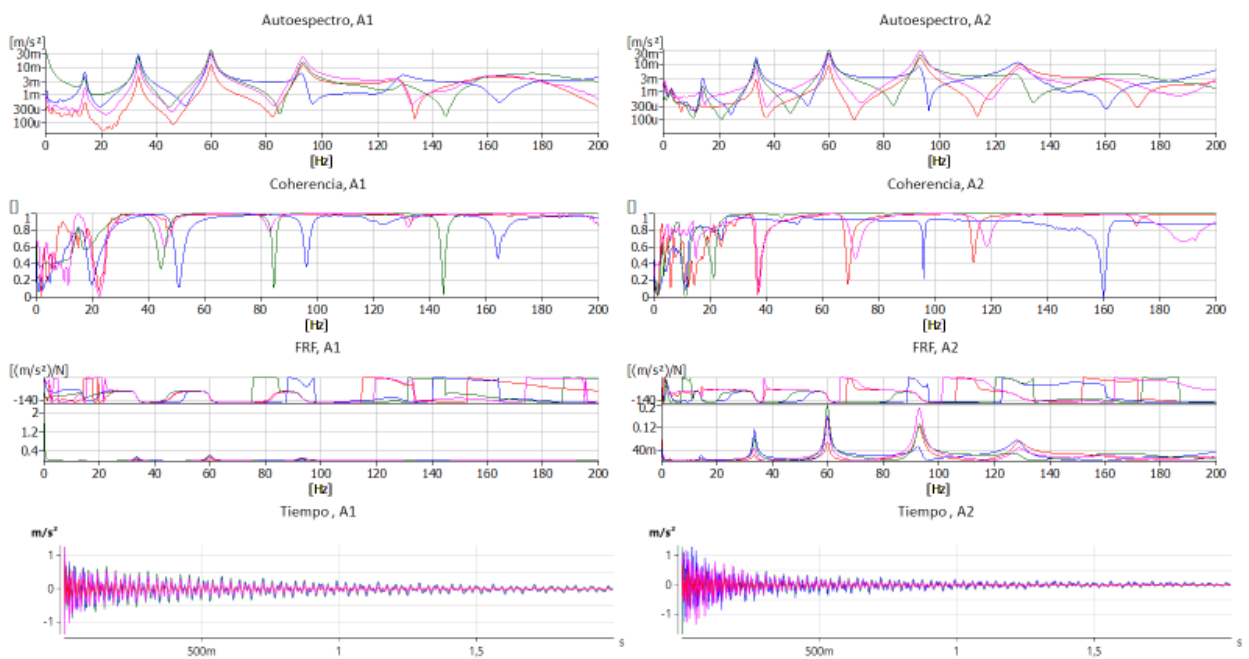
ESTE3_36, ESTE3_36



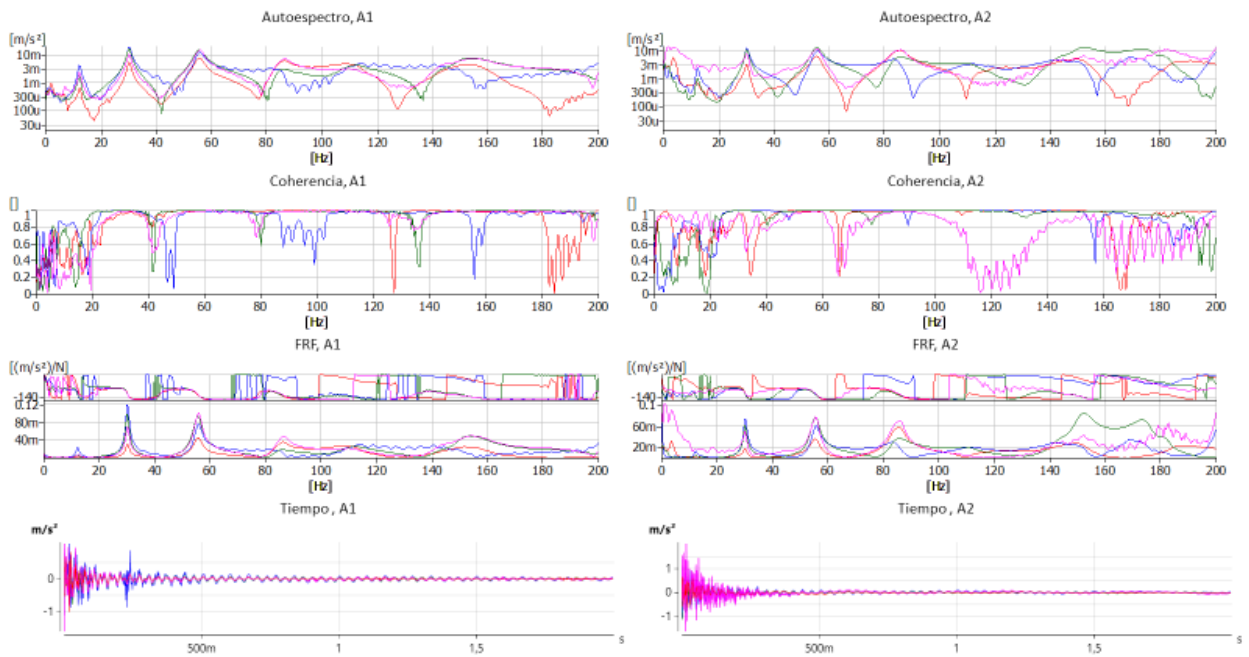
OESTE2_37, OESTE2_37



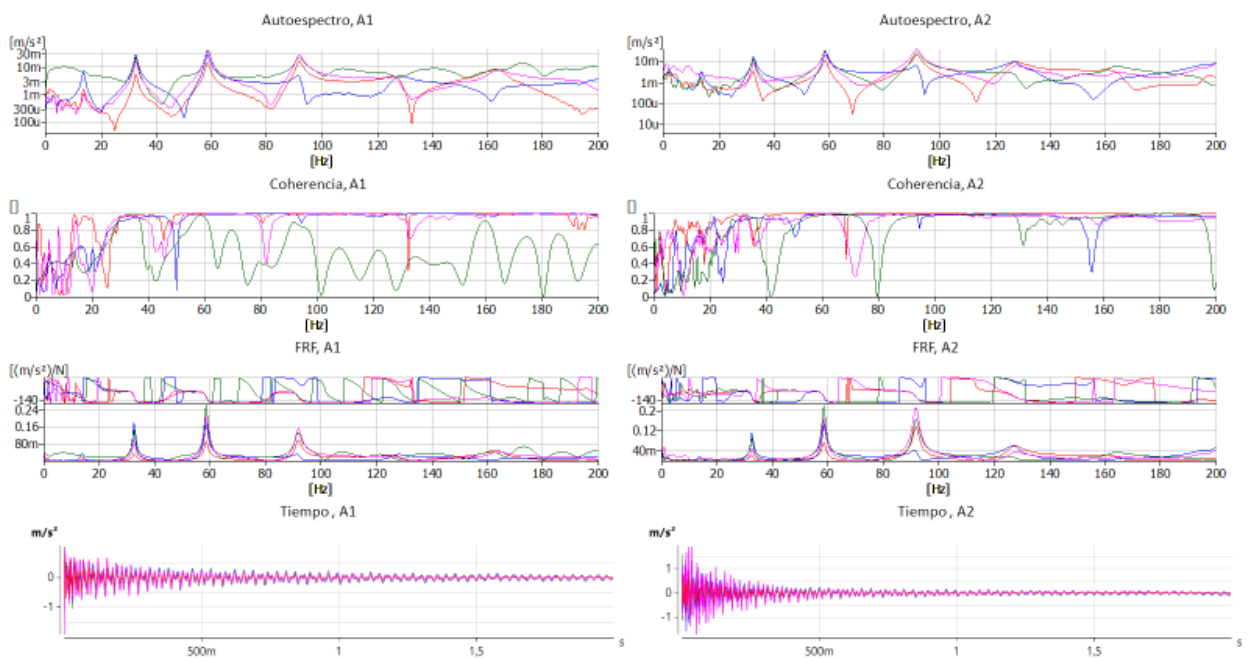
OESTE2_38, OESTE2_38



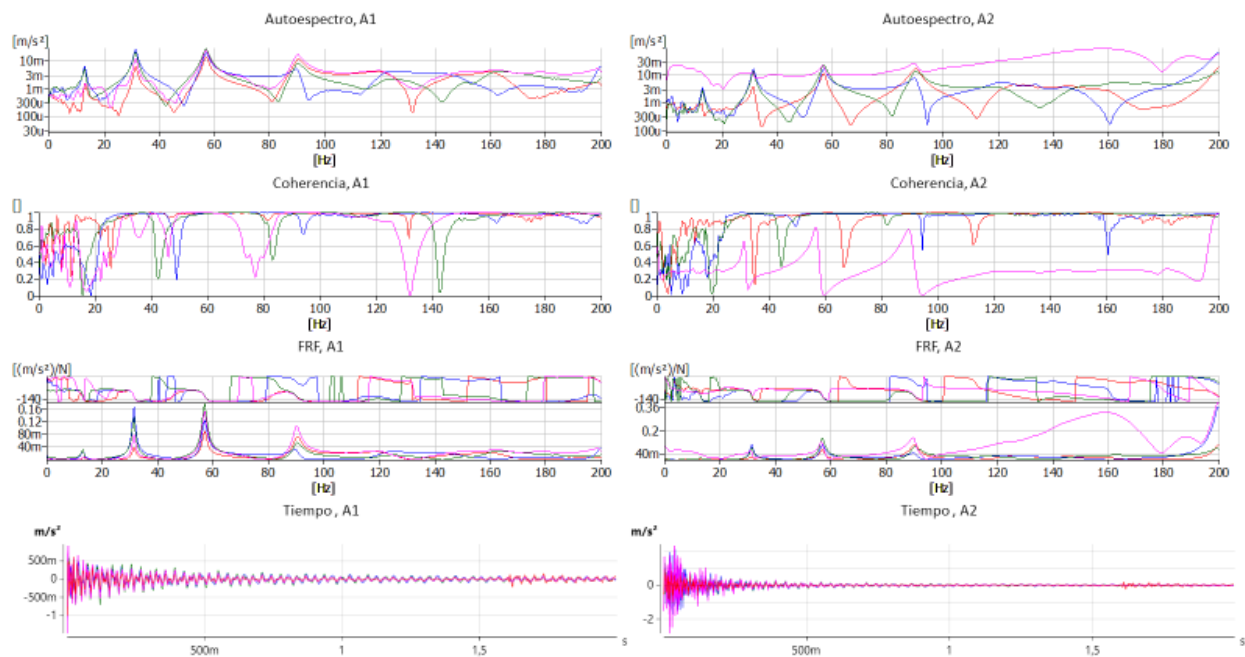
OESTE2_39,OESTE2_39



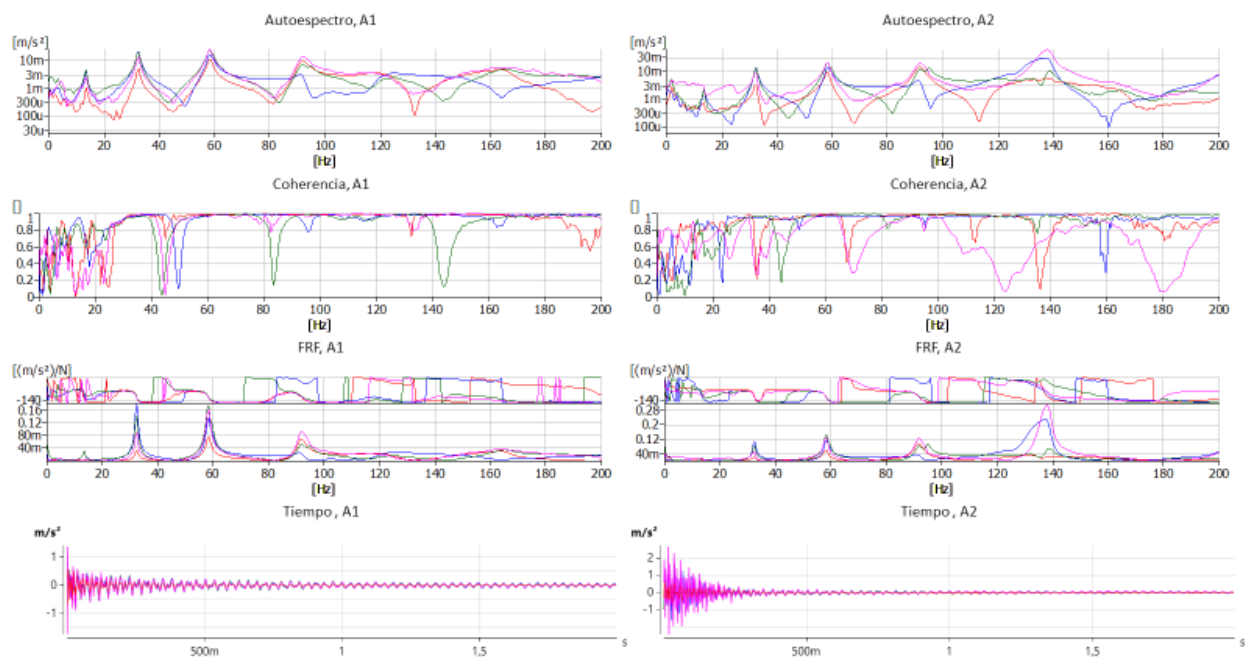
OESTE2_40,OESTE2_40



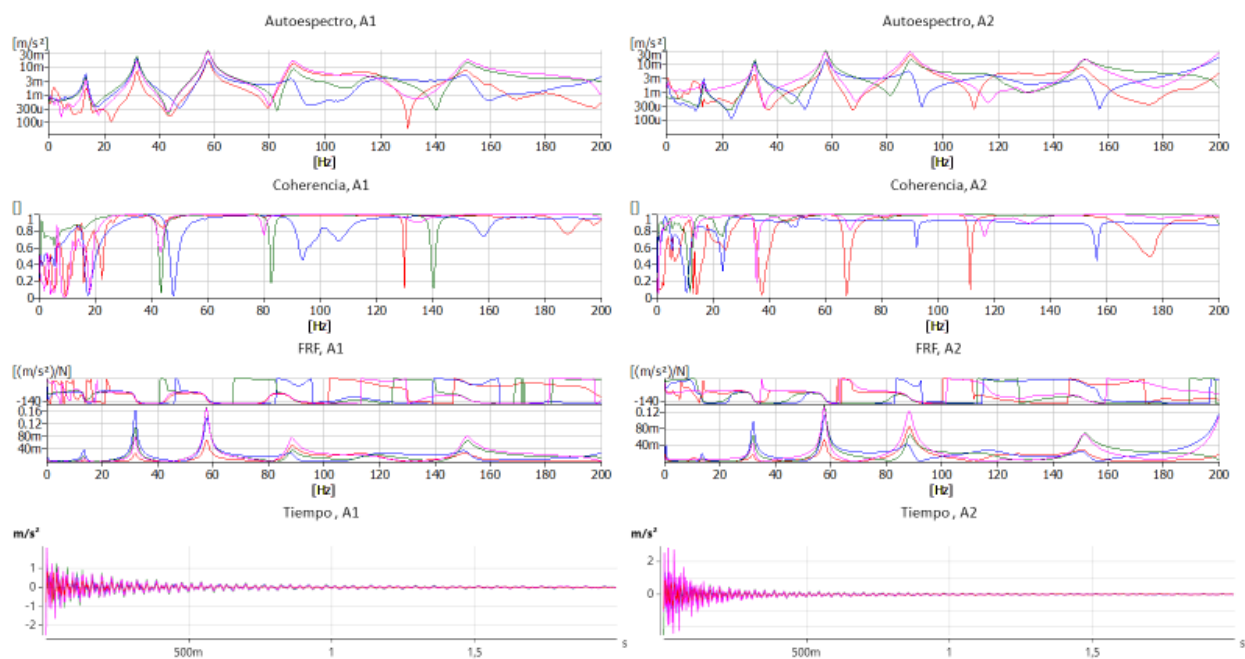
OESTE2_41, OESTE2_41



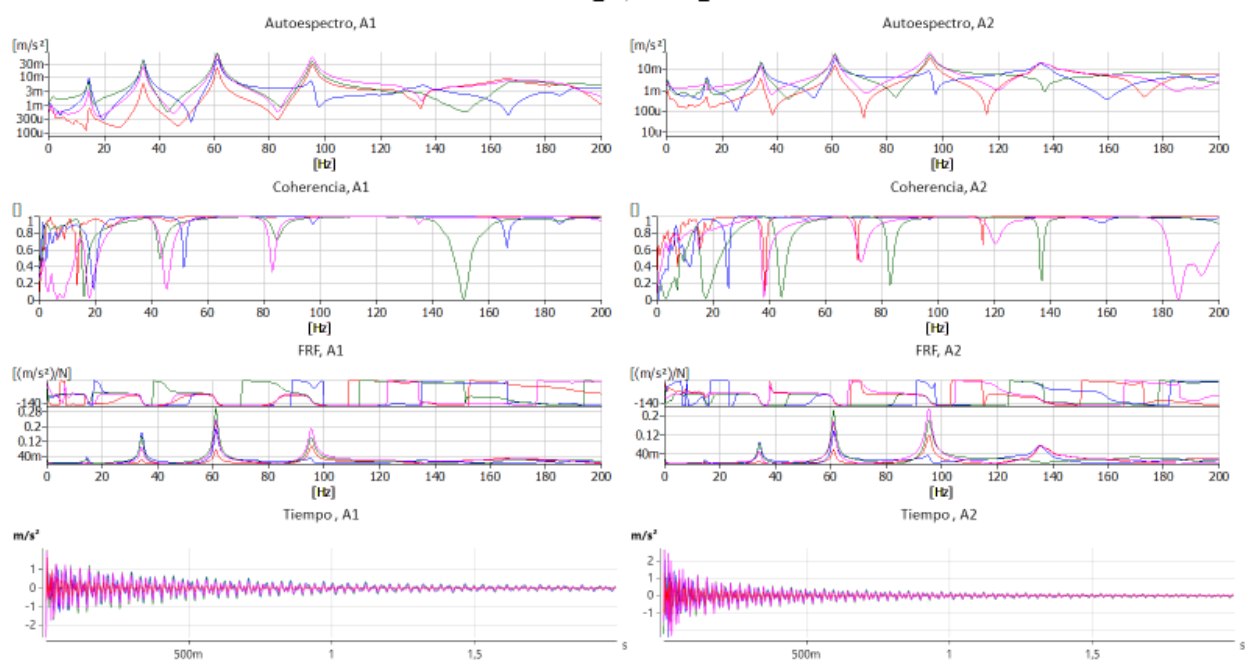
OESTE2_42, OESTE2_42



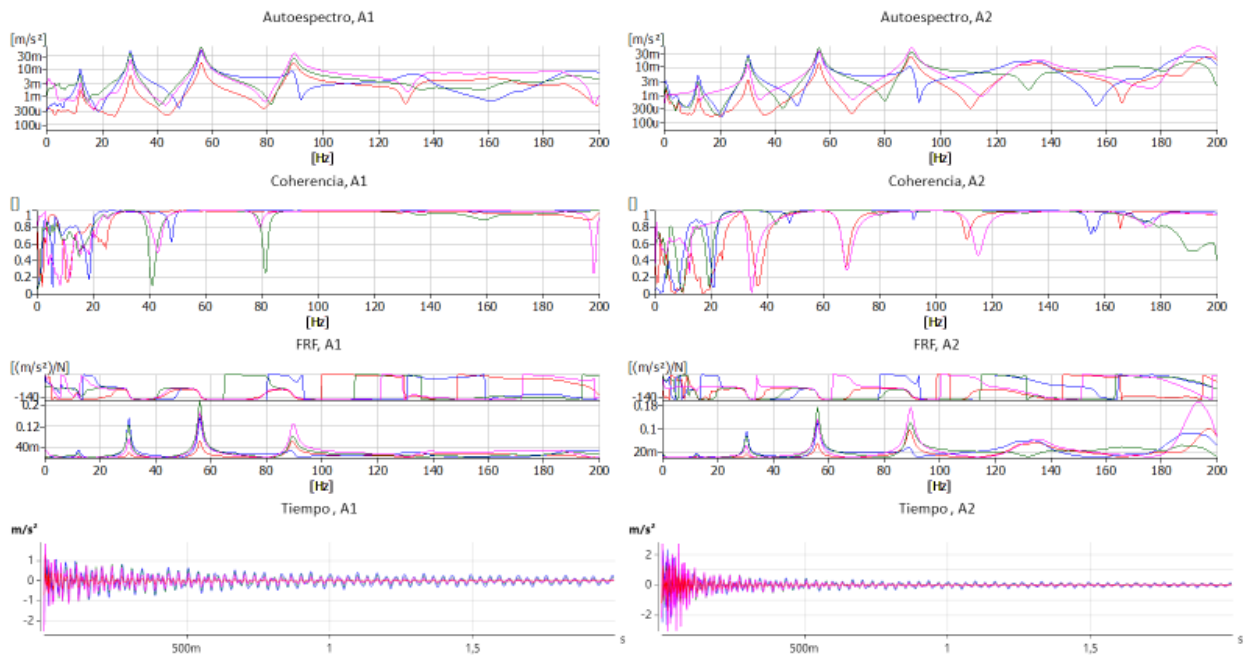
OESTE3_43,OESTE3_43



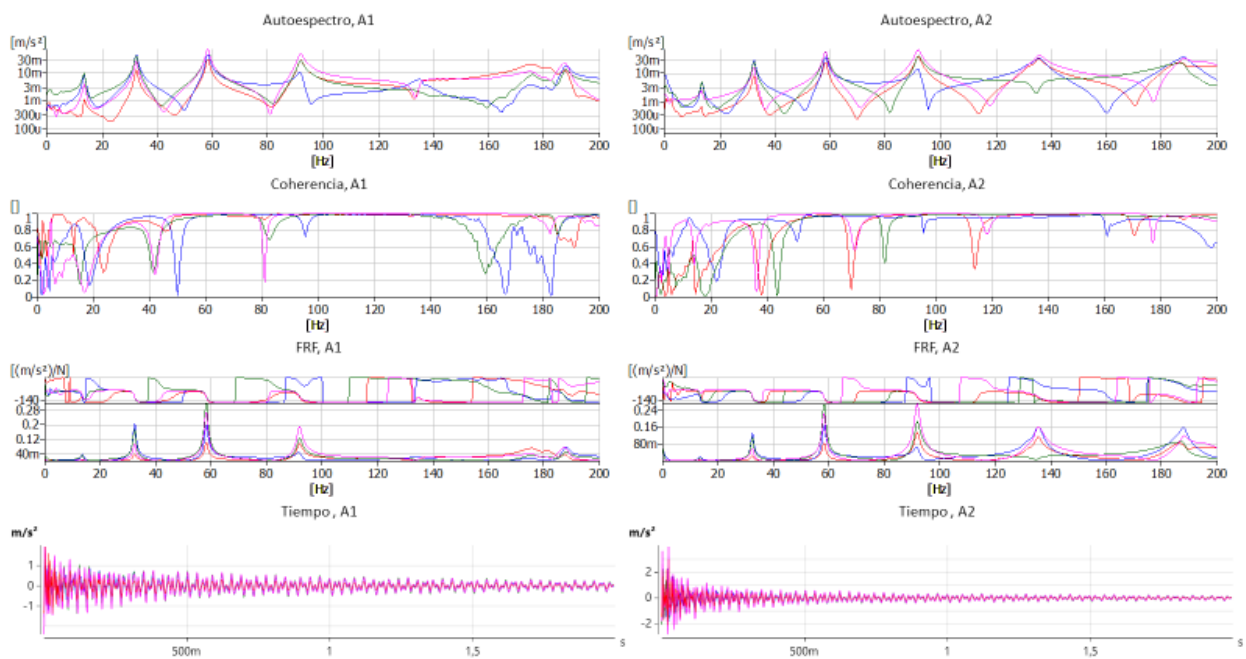
OESTE3_44,OESTE3_44



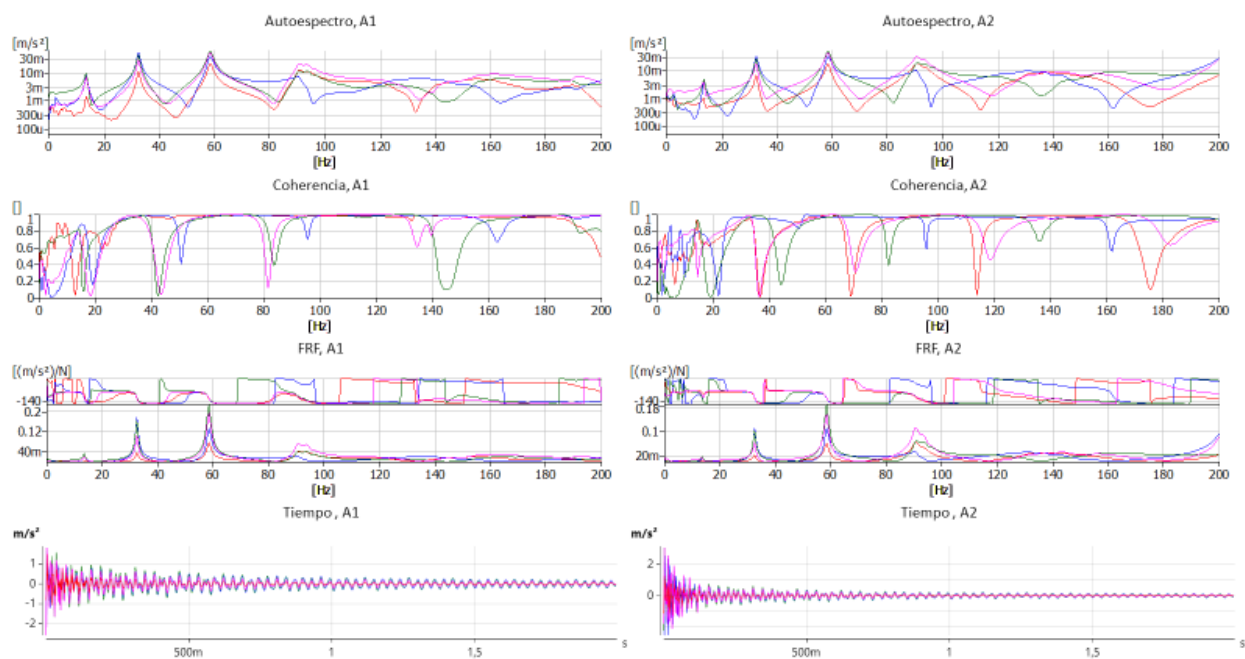
OESTE3_45,OESTE3_45



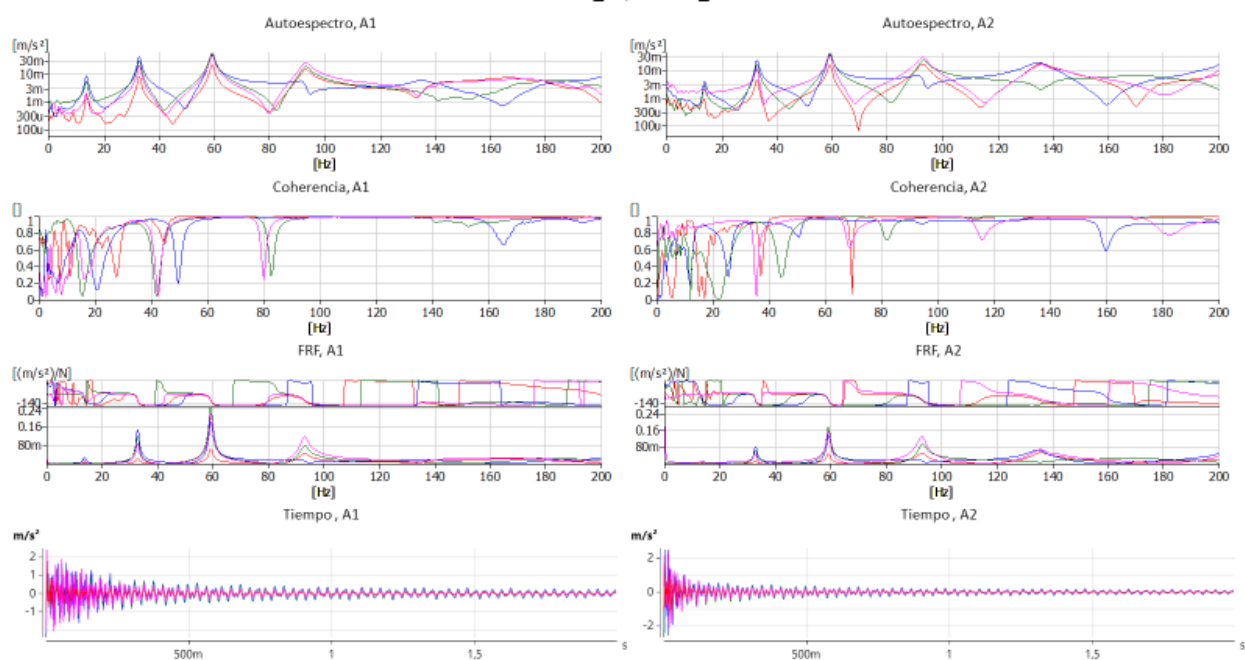
OESTE3_46,OESTE3_46



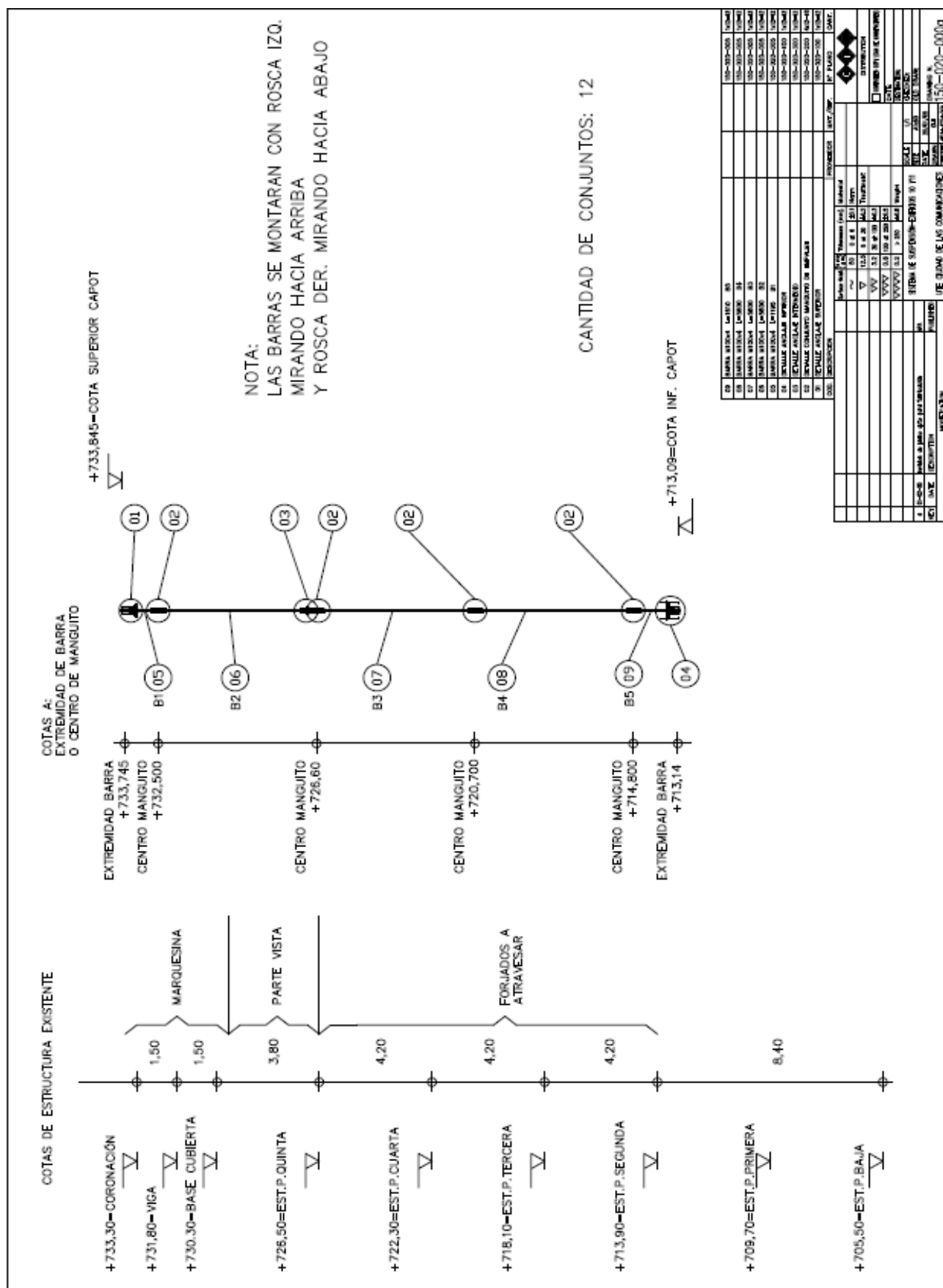
OESTE3_47, OESTE3_47

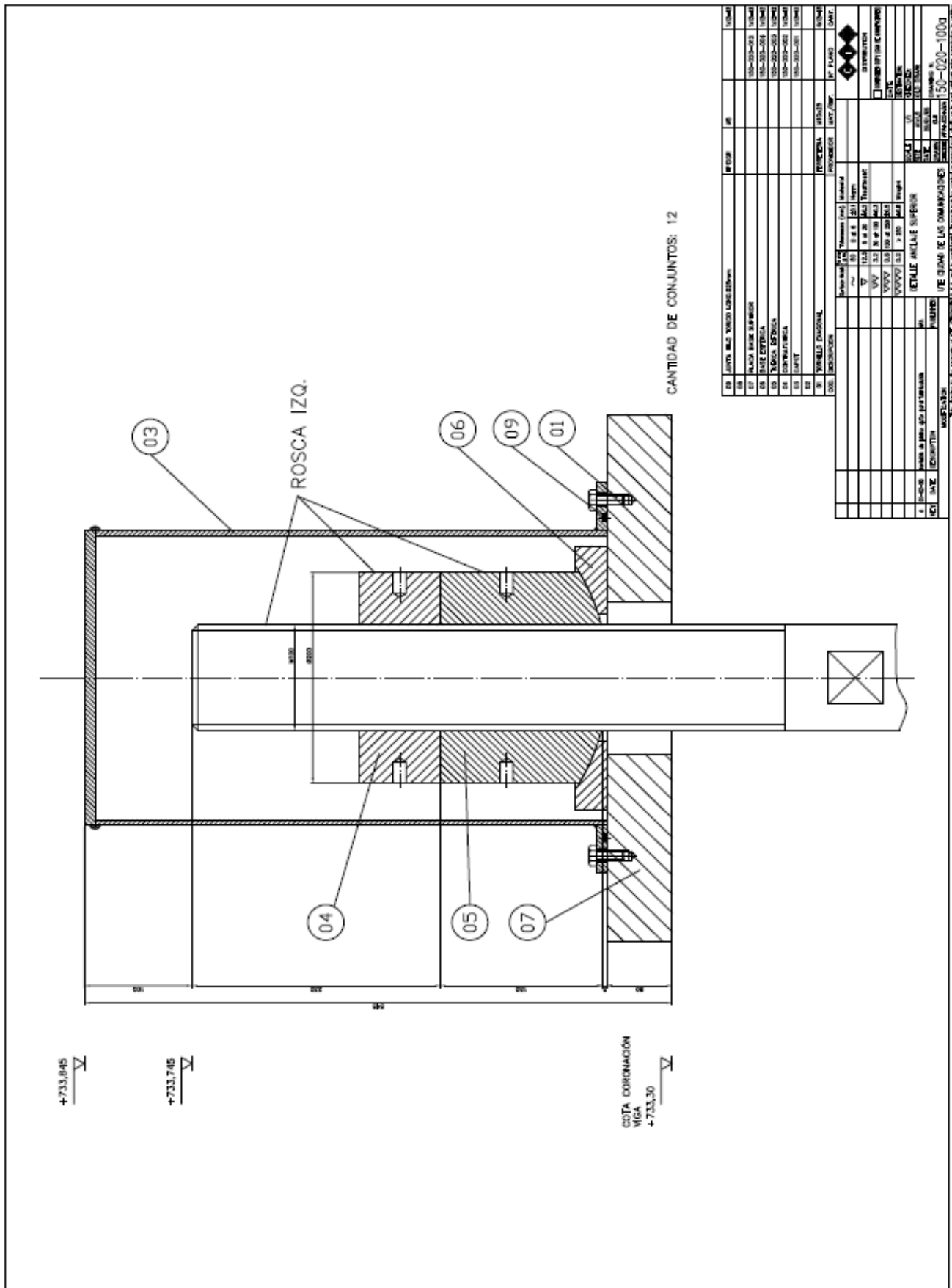


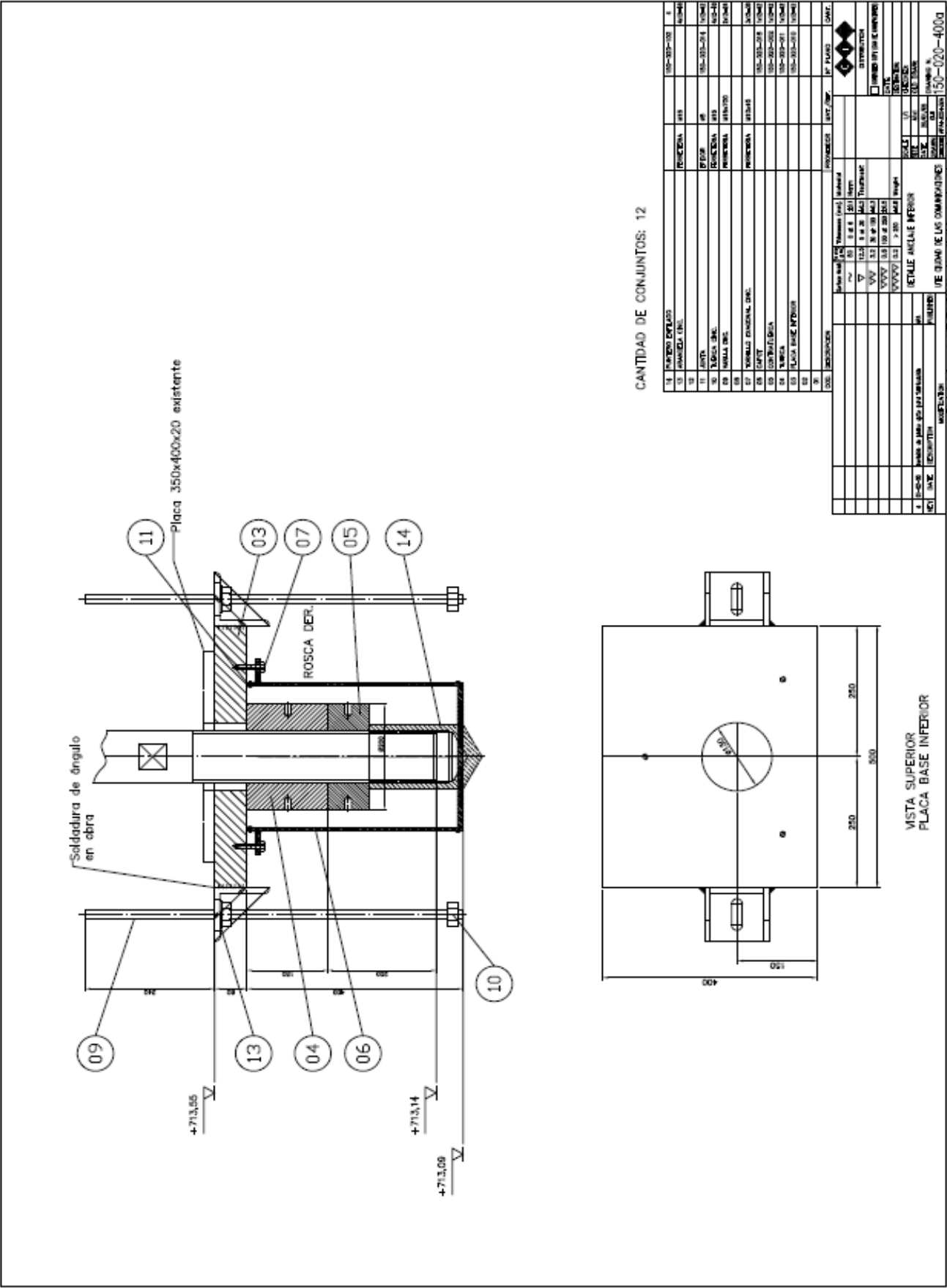
OESTE3_48, OESTE3_48



14. ANNEX – Plànols dels tirants i els seus elements







15. ANNEX – Disseny en CAD del sistema de tirants



16. ANNEX – Plànol de situació del districte Telefónica

