



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Modelado mediante elementos finitos y validación
experimental de un banco de ensayos para pantógrafos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Ferrís Tortajada, Miguel

Tutor/a: Gregori Verdú, Santiago

Cotutor/a: Fuenmayor Fernández, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escola Tècnica Superior d' Enginyeria del Diseny

TREBALL FINAL DE

REALITZAT PER

TUTORITZAT PER

CURS ACADÈMIC: 2021/2022

Resum

El sector del transport està en contínua evolució cap a un model més sostenible en què el ferrocarril hi juga un paper indispensable. En aquest mitjà de transport, els pantògrafs són una peça clau, ja que són els encarregats de captar el corrent elèctric que circula per la catenària. Previ a la posada en servei, els pantògrafs han de ser homologats i validats mitjançant assajos experimentals en via. Una alternativa emergent a aquests assajos, que de per si són costosos, és la realització d'assajos 'Hardware In the Loop' (HIL) en què el pantògraf és assajat al laboratori excitat mitjançant un motor lineal que simula el comportament dinàmic de la catenària. La primera fase d'aquest treball consisteix en una ampliació i millora d'un model d'elements finits del banc d'assajos HIL de pantògrafs que té l'Institut d'Enginyeria Mecànica i Biomecànica (I2MB) de la Universitat Politècnica de València, consistent en modelar més detalladament els elements que formen la biga, així com afegir les parts que no estan modelades i que permetran una representació més fidel a la realitat. Aquest model és validat en una segona fase mitjançant tècniques d'anàlisi modal experimental que consisteixen en l'excitació del banc i lectura de la resposta del mateix per mitjà d'instruments de laboratori, per al posterior tractament amb un ordinador de les dades recollides. Finalment, es proposa un nou disseny per a enrigidir el banc i així poder augmentar el rang de freqüències de realització d'assajos HIL per sobre dels 25 Hz actuals.

Paraules clau: Elements finits; pantògraf; anàlisi modal experimental; banc d'assajos.

Resumen

El sector del transporte está en continua evolución hacia un modelo más sostenible en el que el ferrocarril juega un papel indispensable. En este medio de transporte, los pantógrafos son una pieza clave, puesto que son los encargados de captar la corriente eléctrica que circula por la catenaria. Previo a su puesta en servicio, los pantógrafos deben ser homologados y validados mediante ensayos experimentales en vía. Una alternativa emergente a estos ensayos, que de por sí son costosos, es la realización de ensayos 'Hardware In the Loop' (HIL) en los que el pantógrafo es ensayado en el laboratorio actuado mediante un accionador lineal que simula el comportamiento dinámico de la catenaria. La primera fase de este trabajo consiste en una ampliación y mejora de un modelo de elementos finitos del banco de ensayos HIL de pantógrafos que posee el Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica (I2MB) de la Universitat Politècnica de València, consistente en modelar más detalladamente los elementos que forman la viga, así como añadir las partes que no están modeladas y que permitirán una representación más fiel a la realidad. Este modelo es validado en una segunda fase mediante técnicas de análisis modal experimental que consisten en la excitación del banco y lectura de la respuesta del mismo por medio de instrumentos de laboratorio, para el posterior tratamiento con un ordenador de los datos recogidos. Finalmente se propone un nuevo diseño para rigidizar el banco y así poder aumentar el rango de frecuencias de realización de ensayos HIL por encima de los 25 Hz actuales.

Palabras clave: Elementos finitos; pantógrafo; análisis modal experimental; banco de ensayos.

Abstract

The transportation sector is constantly evolving towards a more sustainable model in which railways play an indispensable role. In this means of transport, pantographs play a key role, since they are responsible for capturing the electrical current that circulates through the catenary. Prior to being put into service, the pantographs must be approved and validated through experimental tests on track. An emerging alternative to these tests, which are expensive, is the performance of Hardware In the Loop (HIL) tests in which the pantograph is tested in a laboratory and actuated by a linear motor that simulates the dynamic behaviour of a catenary. The first phase of this work consists of expanding and improving a finite element model of the HIL pantograph test bench owned by the Institute of Mechanical and Biomechanical Engineering (I2MB) of the Universitat Politècnica de València, by modelling in detail the beam elements and by adding the parts which are not currently modelled to make the finite element model look like reality. This model is validated in a second phase using experimental modal analysis techniques that consist of exciting the bench and reading the response by using laboratory instruments, and the subsequent data processing. Finally, a redesign is proposed to stiffen the bench and thus, to be able to increase the range of frequencies for carrying out HIL tests above the current 25 Hz.

Key words: Finite elements; pantograph; experimental modal analysis; test bench.

Índex de continguts

Resum	2
Resumen	3
Abstract	4
1. Introducció	10
1.1. El pantògraf.....	10
1.1.1. Comportament dels pantògrafs	12
1.1.2. Assajos principals per a pantògrafs.....	12
1.2. La catenària	14
1.3. Antecedents	15
1.4. Motivació i objectius	16
2. Modelatge del banc per mitjà d'elements finits	17
2.1. Canvis realitzats al model d'elements finits del banc	19
2.2. Modelatge del capçal excitador	25
2.2.1. Procés de modelatge.....	25
2.3. Unió del pòrtic i del capçal excitador.....	28
2.4. Resultats de l'anàlisi modal per mitjà d'elements finits	30
2.5. Comparació amb els resultats del TFM realitzat per Juan Ramón Roca	32
3. Caracterització experimental del comportament dinàmic	33
3.1. Modelatge de sistemes per a l'anàlisi de vibracions.....	34
3.2. Tècniques experimentals per a l'anàlisi de vibracions.....	35
3.3. Mètode per a l'obtenció de resultats de forma experimental	39
3.4. Resultats de l'anàlisi experimental	45
4. Comparació entre el model d'EF i l'experimental	53
5. Proposta d'enrigidiment del banc	54
5.1. Modes axial i de torsió	54
5.2. Mode lateral.....	54
5.3. Mode vertical	55
6. Conclusions	57
7. Bibliografia	58
8. Pressupost	59
9. Plec de condicions	60
9.1. Normativa.....	60
9.2. Llicències	60
9.3. Coneixements necessaris	60

10. Annexos	61
ANNEX 1: Plànol banc d'assajos HIL.	62
ANNEX 2: Fitxa tècnica de l'excitador vertical LinMot P10 70x400U/450-BL-QJ.	63
ANNEX 3: Fitxa tècnica del sistema d'adquisició de dades NI cDAQ-9174.	64
ANNEX 4: Fitxa tècnica del martell instrumentat PCB Piezotronics 086D20.	65
ANNEX 5: Fitxa tècnica de l'acceleròmetre triaxial PCB Piezotronics 356B18.	66
ANNEX 6: Dimensions de les cartelles Bosch Rexroth AG.	67
ANNEX 7: Codi font fitxer MATLAB ModGeo_Banco_nous_pilars.	68

Llistat de figures

Figura 1a: Pantògraf en contacte amb la catenària. Font: Lloc web Pixabay.....	10
Figura 1: Parts del pantògraf. Font: Lloc web ScienceDirect.....	11
Figura 2: Pantògraf de braç doble. Font: Lloc web fandom.....	11
Figura 3: Forces en un pantògraf. Font: Pantograph and Contact Line System.....	12
Figura 4: Banc d'assajos per a pantògrafs. Font: Lloc web SIMPRO.	13
Figura 5: Banc d'assajos per a pantògrafs. Font: Lloc web Polimi.	14
Figura 6: Parts de la catenària. Font: Lloc web La Tarde.....	15
Figura 7: Banc d'assajos per a pantògrafs, de la UPV. Font: Elaboració pròpia.....	16
Figura 8: Estructura plana formada per barres articulades. Font: Apunts de Tècniques computacionals.	18
Figura 9: Assemblatge de la matriu de rigidesa on cada posició correspon a una matriu de 2×2 . Font: Apunts de Tècniques Computacionals.....	19
Figura 10: Àrees corresponents a les plaques rigiditzadores originalment (esquerra) i després de modificar-les (dreta). Font: Elaboració pròpia.	21
Figura 11: Placa de serratge de caragols. Font: Elaboració pròpia.	22
Figura 12: Ubicació de les "Real constants" (igual per al pilar oposat). Font: Elaboració pròpia.	23
Figura 13: Malla del pòrtic amb les modificacions realitzades. Font: Elaboració pròpia.....	24
Figura 14: Capçal excitador en posició extrema inferior. Font: Elaboració pròpia.....	25
Figura 15: Geometria de l'àrea de l'extrem de les guies. Font: Elaboració pròpia.....	26
Figura 16: Comparació entre l'extrem de guia inferior amb l'opció "Size and shape" en OFF (esquerra) i en ON (dreta). Font: Elaboració pròpia.	26
Figura 17: Geometria del capçal excitador. Font: Elaboració pròpia.....	27
Figura 18: Detall de l'acoblament dels graus de llibertat nodals de la guia i de l'extrem de la guia. Font: Elaboració pròpia.	28
Figura 19: Geometria del capçal excitador amb l'opció "Size and shape" en ON, amb totes les restriccions i acoblaments de graus de llibertat. Font: Elaboració pròpia.....	28
Figura 20: Pòrtic amb el capçal excitador acoblat. Font: Elaboració pròpia.....	29
Figura 21: Captura del mode axial en elements finits. Font: Elaboració pròpia.	30
Figura 22: Captura del mode de torsió en elements finits. Font: Elaboració pròpia.	31
Figura 23: Captura del mode lateral en elements finits. Font: Elaboració pròpia.	31
Figura 24: Captura del mode vertical en elements finits. Font: Elaboració pròpia.	32
Figura 25: Representació gràfica de dues ones. Font: Apunts de Física d'especialitat.....	33
Figura 26: Sistema bàsic d'un grau de llibertat format per una massa m , un moll k i un amortidor c , que té un moviment $u(t)$ generat per la força $f(t)$. Font: Apunts de vibracions mecàniques.	34
Figura 27: Martell instrumentat. Font: Elaboració pròpia.	36
Figura 28: Acceleròmetre piezoelèctric. Font: Elaboració pròpia.....	36
Figura 29: Sistema bàsic de mesura. Font: Apunts de vibracions mecàniques.	37
Figura 30: Representació d'una finestra temporal $w(t)$ que conté una longitud finita de l'ona $x(t)$. Font: Apunts de vibracions mecàniques.....	37
Figura 31: Senyal de l'ona $X(\omega)$ en el domini de la freqüència. Font: Apunts de vibracions mecàniques.	38
Figura 32: Sistema lineal amb una entrada $x(t)$ (excitació) i una eixida $y(t)$ (resposta). Font: Elaboració pròpia.	38
Figura 33: Sistema de coordenades global del banc. Font: TFM Juan Ramon Roca.	40

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

Figura 34: Posicions en vista superior. Font: Elaboració pròpia.	40
Figura 35: Posicions frontals. Font: Elaboració pròpia.....	41
Figura 36: Posicions posteriors. Font: Elaboració pròpia.....	41
Figura 37: Detall de la posició dels punts a l'interior del pilar esquerre. Font: Elaboració pròpia.	41
Figura 38: Detall de la posició dels punts a l'interior del pilar dret. Font: Elaboració pròpia.....	42
Figura 39: Posicions laterals. Font: Elaboració pròpia.	42
Figura 40: Posicions barra de contacte (Nota: aquesta barra s'ha substituït per una placa hexaèdrica de dimensions 625 x 72 x 25 mm). Font: TFM Juan Ramón Roca.	42
Figura 41: Posicions suport de l'excitador. Font: TFM Juan Ramón Roca.....	43
Figura 42: Targetes d'adquisició de dades. Font: Elaboració pròpia.	43
Figura 43: Vista general del muntatge per a l'obtenció de dades. Font: Elaboració pròpia.....	44
Figura 44: Gràfica de les FRF del punt 12 excitat en direcció axial. Font: Elaboració pròpia.	45
Figura 45: Gràfica de les coherències del punt 12 excitat en direcció axial. Font: Elaboració pròpia.	46
Figura 46: Gràfica de les FRF del punt 10 excitat en direcció lateral. Font: Elaboració pròpia. .	46
Figura 47: Gràfica de les coherències del punt 10 excitat en direcció lateral. Font: Elaboració pròpia.	47
Figura 48: Gràfica de les FRF del punt 12 excitat en direcció vertical. Font: Elaboració pròpia.	47
Figura 49: Gràfica de les coherències del punt 12 excitat en direcció vertical. Font: Elaboració pròpia.	48
Figura 50: Captura de l'animació del mode axial experimental. Font: Elaboració pròpia.	49
Figura 51: Captura de l'animació del mode de torsió experimental. Font: Elaboració pròpia. ...	49
Figura 52: Captura de l'animació del mode lateral experimental. Font: Elaboració pròpia.	50
Figura 53: Captura de l'animació del mode vertical experimental. Font: Elaboració pròpia.....	50
Figura 54: Captura de l'animació del mode axial experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.	51
Figura 55: Captura de l'animació del mode de torsió experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.	51
Figura 56: Captura de l'animació del mode lateral experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.	52
Figura 57: Captura de l'animació del mode vertical experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.	52
Figura 58: Esquema del recorregut del cap del pantògraf sobre la catenària. Font: Elaboració pròpia.	55
Figura 59: Vista frontal del nou disseny del pòrtic. Font: Elaboració pròpia.	56
Figura 60: Captura del mode vertical en el nou disseny. Font: Elaboració pròpia.	56

Listat de taules

Taula 1: Especificacions del banc d'assajos. Font: Elaboració pròpia.	16
Taula 2: Seccions dels perfils longitudinals de les bigues i pilars. Font: Elaboració pròpia.	20
Taula 3: Valors que formen la "Real constant" 3. Font: Elaboració pròpia.....	22
Taula 4: Valors que formen la "Real constant" 4. Font: Elaboració pròpia.....	22
Taula 5: Valors que formen la "Real constant" 5. Font: Elaboració pròpia.....	23
Taula 6: Valors que formen la "Real constant" 6. Font: Elaboració pròpia.....	23
Taula 7: Valors que formen la "Real constant" 7. Font: Elaboració pròpia.....	23
Taula 8: Valors que formen la "Real constant" 1. Font: Elaboració pròpia.....	24
Taula 9: Valors que formen la "Real constant" 8. Font: Elaboració pròpia.....	29
Taula 10: Freqüències naturals de cada mode de vibració. Font: Elaboració pròpia.	30
Taula 11: Comparació entre els resultats del model base i del modificat. Font: Elaboració pròpia.	33
Taula 12: Paràmetres de mesura de l'excitació als punts. Font: Elaboració pròpia.	44
Taula 13: Comparació de les freqüències de cada model de banc. Font: Elaboració pròpia.	48
Taula 14: Comparació entre els nous resultats obtinguts del pòrtic modificat, amb el percentatge d'error. Font: Elaboració pròpia.	53
Taula 15: Error percentual en modes experimental i MEF. Font: TFM Juan Ramón Roca.	53

1. Introducció

La tendència actual de les empreses de transport, públiques i privades, és la transició cap a un model de mobilitat més sostenible i lliure d'emissions de gasos d'efecte d'hivernacle. El transport ferroviari és el més adequat pel seu baix consum energètic i la facilitat pel que fa a l'electrificació, sent esta última clau per tal d'assolir els objectius de mobilitat sostenible.

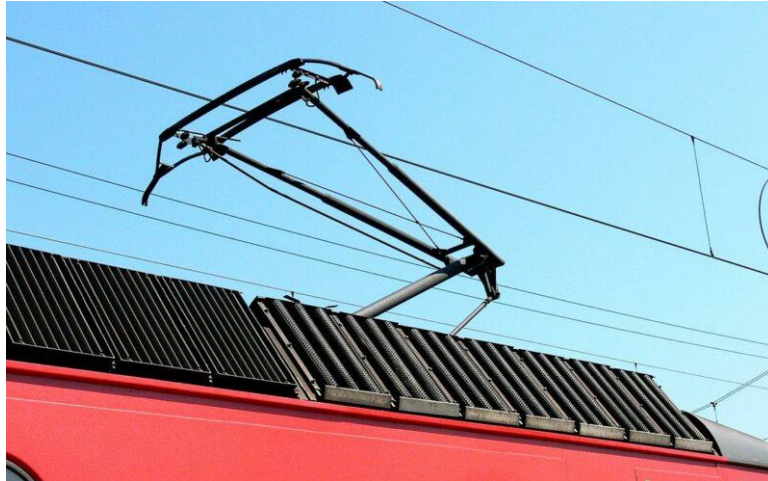


Figura 1a: Pantògraf en contacte amb la catenària. Font: Lloc web Pixabay.

La gran majoria dels trens elèctrics obtenen l'energia de la catenària o línia aèria de contacte (LAC) a través d'un element que duen incorporat: el pantògraf (Figura 1a). Este aparell resulta imprescindible i per tant, ha d'estar dissenyat correctament perquè el seu funcionament siga eficient, estable, continu i adequat. Per tant, l'equipament amb què es dissenyen i assagen els pantògrafs ha de ser precís i idoni, com és el cas dels bancs per a fer assajos.

1.1. El pantògraf

El pantògraf és un sistema de barres articulat format per un cap, una estructura o bastidor, una base i un sistema d'accionament ubicat a la base (Figura 1), situat sobre els trens elèctrics i que és capaç d'estendre's i de replegar-se al llarg d'un eix vertical (MERSEN, 2017). La seua funció consisteix a captar l'energia elèctrica de la línia aèria de contacte o catenària i transmetre-la als sistemes elèctrics del tren tals com el sistema de tracció, il·luminació, climatització, etc.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs



Figura 1: Parts del pantògraf. Font: Lloc web ScienceDirect.

Hi ha dos tipus de pantògrafs: els de braç simple (Figura 1) i els de braç doble (Figura 2). Els més comuns són els de braç simple, el disseny del qual ha anat canviant al llarg del temps per a adaptar-se a l'alta velocitat per tal de garantir un funcionament segur i adequat. Així i tot, s'usa en material rodant de totes les velocitats: tramvia, metro, regionals, alta velocitat, etc (MERSEN, 2017).

El pantògraf es connecta a la catenària, que pot estar formada per un o dos cables, de manera que tanca el circuit amb la via. El corrent elèctric s'obté per mitjà d'uns fregadors situats sobre el cap del pantògraf. Depenent de la intensitat del corrent elèctric i del tipus de catenària, el cap del pantògraf pot incorporar més d'un fregador (MERSEN, 2017). Este element està exposat a un gran desgast degut a la pressió exercida pel pantògraf, la velocitat, les condicions ambientals, les característiques de la catenària, etc (Wu, 2017).



Figura 2: Pantògraf de braç doble. Font: Lloc web fandom

Pel que fa a l'estructura, se sol dividir en dues parts: la superior i la inferior, unides per un parell de revolució, com si d'una frontissa es tractara. La inferior és la que està en contacte amb la base del pantògraf. Esta última està fixada sobre el sostre del tren per mitjà de tres o quatre suports aïllants. Esta base és l'element que més ha de resistir les condicions ambientals així com els impactes derivats d'un possible accident del pantògraf i de la catenària (Wu, 2017).

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

L'accionament del pantògraf es realitza per mitjà de dos sistemes: els basats en ressorts (rigidesa fixa) i els no basats en ressorts. Els primers utilitzen molls per a estendre i retraure el conjunt del pantògraf mentre que dels segons hi ha de diversos tipus. Els principals són els pneumàtics (rigidesa ajustable), formats per un circuit d'aire comprimit que per mitjà d'una balona, causa l'extensió i retracció del pantògraf (Wu, 2017).

1.1.1. Comportament dels pantògrafs

Per tal de mantenir constant el subministrament d'energia als equipaments del tren, el pantògraf no ha de perdre mai el contacte amb la catenària. Per aquesta raó, es troba contínuament exercint una força sobre esta, anomenada força de contacte. Com que esta força no roman constant, se li anomena també força dinàmica de contacte. Esta força és la suma de la força estàtica, la de fregament, l'aerodinàmica i la dinàmica (Figura 3). Per tant, la força de contacte depèn de la velocitat, de les característiques dinàmiques de la catenària i del pantògraf, les condicions d'operació dels trens i de l'estat de la infraestructura (Wu, 2017).

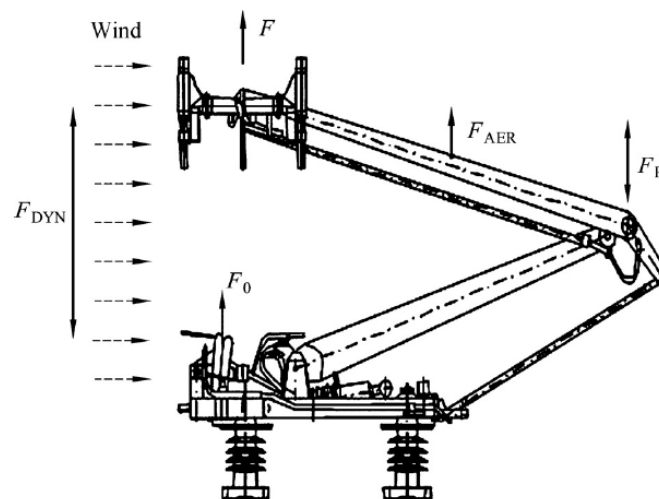


Figura 3: Forces en un pantògraf. Font: Pantograph and Contact Line System.

Com s'ha descrit, la interacció entre el pantògraf i la catenària és complexa, vista la quantitat de factors que influeixen. Per aquesta raó, este tipus de problema resulta molt complicat de resoldre de forma analítica. La solució és emprar el mètode dels elements finits, que proporcionarà resultats fiables i molt pròxims a la realitat.

1.1.2. Assajos principals per a pantògrafs

Els assajos per a pantògrafs es classifiquen en: tipus, rutina, investigació i integrat. Els assajos tipus són aquells que es realitzen en una part concreta del pantògraf. Els de rutina s'utilitzen per tal de verificar la consistència entre els resultats de l'assaig tipus i el comportament del pantògraf. Si es desitja obtenir informació addicional, es realitza una prova auxiliar que és

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

l'assaig d'investigació. Pel que fa als assajos integrats, són complementaris i només es realitzen en condicions d'operació, és a dir, que es tenen en compte factors com el tipus de material rodant, la velocitat, les característiques la línia de ferrocarril, etc (Wu, 2017).

A efectes d'este treball de fi de grau, s'analitzarà l'assaig d'investigació. Una prova característica d'aquest assaig és la de vibracions verticals, consistent en un banc de prova baix el qual es col·loca un pantògraf que s'excita amb un dispositiu que incorpora el banc. Este dispositiu ha de ser capaç de generar vibracions, a més del moviment vertical del punt de contacte amb la catenària per a simular el comportament real d'aquesta. Normalment sol ser un motor lineal, ja que es pot controlar des d'un ordinador per tal de produir sobre el pantògraf els moviments adequats (Wu, 2017).

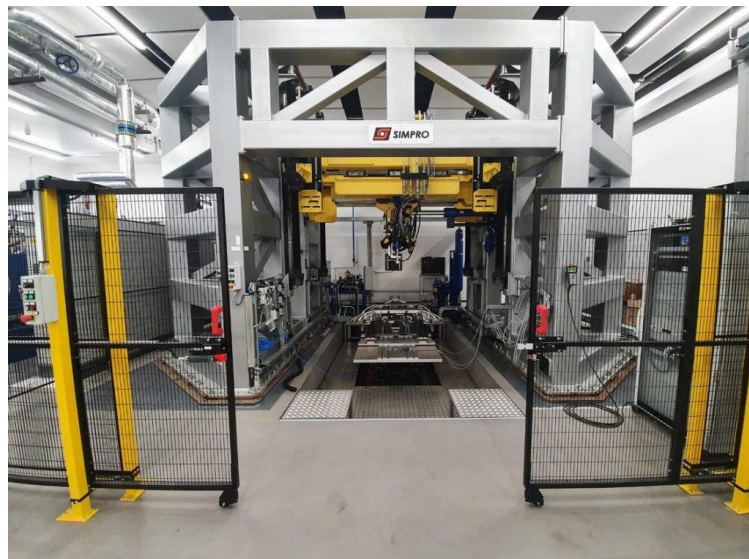


Figura 4: Banc d'assajos per a pantògrafs. Font: Lloc web SIMPRO.

Al món existeixen distints tipus de bancs d'assajos. Un d'ells és el banc de proves desenvolupat per Simpro i la Universitat de Huddersfield (University of Huddersfield) (Figura 4). Aquest presenta solucions innovadores i la capacitat d'assolir un alt rendiment. Gràcies a aquest banc es poden realitzar proves dinàmiques amb simulació de velocitat de fins a 500 km/h en diferents tipus de pantògrafs tant per a línies convencionals com d'alta velocitat. Pel que fa a les seues característiques, el banc està equipat amb una plataforma mòbil de sis graus de llibertat, on s'assenta el pantògraf, i és capaç de reproduir qualsevol moviment o vibració del tren; per tant, pot simular tota mena d'escenaris que el pantògraf pugui trobar el durant el seu funcionament. A més, el banc està dotat d'una sèrie de sensors per a controlar forces, acceleracions i desplaçaments, de manera que es pot optimitzar el disseny, oferir homologacions virtuals, i també promoure el desenvolupament de projectes d'electrificació ferroviària altament eficients (SIMPRO, 2020).

Un altre exemple de banc d'assajos és el desenvolupat per la Politècnica de Milà (Politecnico di Milano) (Figura 5). Aquest permet la caracterització dels pantògrafs reproduint la interacció dinàmica amb la catenària, a més de la possibilitat de replicar la velocitat a la qual es produeix aquesta interacció. Però la part més semblant a la del banc desenvolupat pel I2MB és la capacitat per al control del hardware in the loop (HIL) per a simular la interacció real entre el pantògraf i

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

la catenària (Polimi, 2022). La tècnica del hardware in the loop consisteix en la utilització en temps real de sistemes integrats complexos. Un sistema integrat de computació és aquell que s'ha dissenyat per a cobrir unes necessitats específiques, a diferència de la resta d'ordinadors comuns que estan dissenyats per complir moltes necessitats distintes. Es tracta d'una plataforma que inclou tota la complexitat del sistema físic (el banc en aquest cas) controlat pel sistema integrat per mitjà de la realització d'un model matemàtic que engloba tots els aspectes i característiques que afecten la dinàmica de l'element d'estudi (la catenària) amb què el sistema integrat interactua. La simulació HIL considera el model físic, i també la simulació dels sensors i actuadors que intervenen en aquest model físic, ja que són el nexse d'unió entre aquest i el sistema integrat. Es podria dir que en les simulacions HIL "s'enganya" al sistema físic per a fer-li creure que es troba en condicions reals de funcionament, que en realitat estan sent reproduïdes per actuadors i sensors els quals reben les seues consignes del resultat de resoldre un model numèric que substitueix a una part del sistema (en este aquest la catenària). Este tipus d'assaig sorgeix de la necessitat de realitzar proves en poc de temps i d'una manera econòmica i segura (Navarro, 2017). Hui dia, quan es parla de simulacions HIL es fa referència al terme "Hybrid simulation", que combina una part del hardware (el pantògraf) i una del software (la catenària) per a realitzar estes simulacions.



Figura 5: Banc d'assajos per a pantògrafs. Font: Lloc web Polimi.

1.2. La catenària

La catenària ferroviària, anomenada també línia aèria de contacte (LAC), és un sistema de cable que subministra energia elèctrica als trens que circulen per les línies de ferrocarril electrificades. Aquest sistema de catenària es munta en trams al llarg de les línies ferroviàries. Les seccions són molt diferents en les seues propietats, és a dir, el tipus de sistema de la catenària, la geometria

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

vertical, la geometria horitzontal i les forces de tensió en el cable de contacte (Nåvik, 2016). A la Figura 6 es mostren les parts del sistema de la catenària.

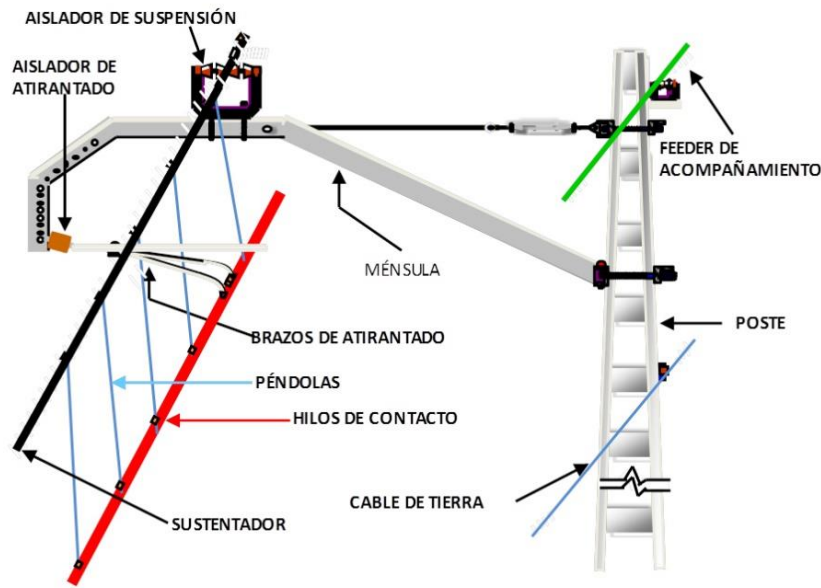


Figura 6: Parts de la catenària. Font: Lloc web La Tarde.

Els nous sistemes de catenària es dissenyen per a velocitats cada vegada més altes, però els ja existents foren dissenyats per a velocitats menors, per tant l'increment de velocitats du a un augment de les càrregues suportades i de majors respostes dinàmiques que obliguen a adaptar les catenàries existents perquè puguin realitzar la seua funció de forma segura i adequada (Nåvik, 2016).

1.3. Antecedents

L'any 2017, al I2MB de la Universitat Politècnica de València es va desenvolupar un banc d'assajos dinàmics per a pantògrafs de trens d'alta velocitat del fabricant espanyol de material rodant, Patentes TALGO. Aquest banc, consistent en una estructura en forma de pòrtic (Figura 7), incorpora un mecanisme que genera moviments verticals per tal de simular l'acció de la catenària sobre el pantògraf (Roca Castro, 2022). A la Taula 1 es mostren les seues característiques.

Posteriorment, un alumne va realitzar un treball de fi de màster en el qual va modelar el pòrtic per mitjà d'elements finits, concretament amb el programari ANSYS, i posteriorment el va validar amb èxit emprant un mètode experimental, malgrat algunes diferències amb la realitat pròpies del disseny realitzat per ell mateix i també algunes d'inherents al programari d'elements finits.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

Actualment, el màxim valor de freqüència fins al qual pot treballar és de 25 Hz, i el moviment que genera és exclusivament vertical, tot i que s'està plantejant la implantació d'un mecanisme per a produir un moviment lateral que simularia la ziga-zaga de la catenària real.



Figura 7: Banc d'assajos per a pantògrafs, de la UPV. Font: Elaboració pròpia.

Especificacions del banc d'assajos		
Pòrtic	Llum	1,3 m
	Altura	1,9 m
	Amplària	0,6 m
	Massa	530,7 kg
Motor lineal	Força màxima	2150 N
	Velocitat màxima	2,2 m/s
	Acceleració màxima	127,07 m/s ²
	Carrera màxima	450 mm
Capçal excitador	Massa	16,92 kg

Taula 1: Especificacions del banc d'assajos. Font: Elaboració pròpia.

1.4. Motivació i objectius

El motiu principal d'aquest projecte és la necessitat de millorar el sistema utilitzat per la UPV per a realitzar assajos amb el pantògraf, de manera que permeti obtenir resultats més amplis i precisos. Un altre motiu, més personal, ha sigut l'interès pel món del ferrocarril i per aprendre més sobre ell.

Este treball de fi de grau té com a objectius principals:

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

- La millora del model d'elements finits del banc per mitjà del programa d'elements finits ANSYS Mechanical APDL, consistent en modificar la geometria del banc perquè siga més fidel a la realitat.
- Modelatge del capçal excitador per mitjà d'elements finits.
- Combinació dels models d'elements finits del banc i del capçal excitador per a posteriorment fer l'anàlisi modal.
- Validació del model elaborat a partir de mesures experimentals per mitjà de tècniques d'anàlisi modal.

A més, com a objectiu addicional, figura el següent:

- Redissenyar el banc, realitzant un enrigidiment del mateix per a poder treballar amb freqüències superiors a 25 Hz.

2. Modelatge del banc per mitjà d'elements finits

El mètode dels elements finits (MEF) és una de les tècniques més ben assentades per a la resolució de problemes de contorn que apareixen a l'enginyeria. La tendència actual és la de facilitar a l'usuari la resolució de problemes complexos com els problemes no lineals (plasticitat, viscoelasticitat, contacte, etc.) que poden ser tractats amb més facilitat i de forma més eficaç, i és possible resoldre problemes multi física en què interaccionen problemes que anteriorment eren tractats per separat (anàlisi tensional, tèrmic, interacció fluid - estructura, interacció estructural amb camps magnètics, etc.).

Els problemes de contorn són aquells que estan governats per una o més equacions diferencials o integrals dins d'un domini, i per unes condicions de contorn en eixe domini. Per tal de resoldre un problema de contorn, com que no és possible fer-ho de forma analítica si la geometria és complexa, s'opta per obtenir una solució aproximada sempre que l'error comés siga acceptable i estiga acotat.

Per tant, el mètode dels elements finits és un mètode d'aproximació de problemes continus, de manera que este sistema continu es divideix en un conjunt de subdominis (anomenats elements finits) el comportament dels quals es regeix mitjançant paràmetres associats a uns punts característics anomenats nodes. Estos nodes són els que uneixen els elements entre si i les funcions associades a aquests nodes són les incògnites del problema de contorn, és a dir, que el comportament a l'interior dels elements queda definit per estes funcions associades als nodes anomenades funcions de forma (Tesis Doctorals en Xarxa, 2004).

El mètode per a solucionar un problema d'elements finits és similar als procediments emprats per a encaixar de forma matricial les estructures. Aquests procediments solen ser la imposició de condicions de contorn, resolució de sistemes d'equacions, obtenció de tensions i deformacions, etc. Així, considerant una estructura com la de la Figura 8, que està formada per barres (elements discrets) unides per uns punts que es podrien considerar nodes, s'exposaran les equacions que defineixen cada element discret per separat i posteriorment la unió matricial d'estes equacions per obtenir la solució global. Destacar que les barres es consideren uniformes amb comportament elàstic lineal i articulades en els extrems. S'assumeix, a més, la hipòtesi de desplaçaments menuts.

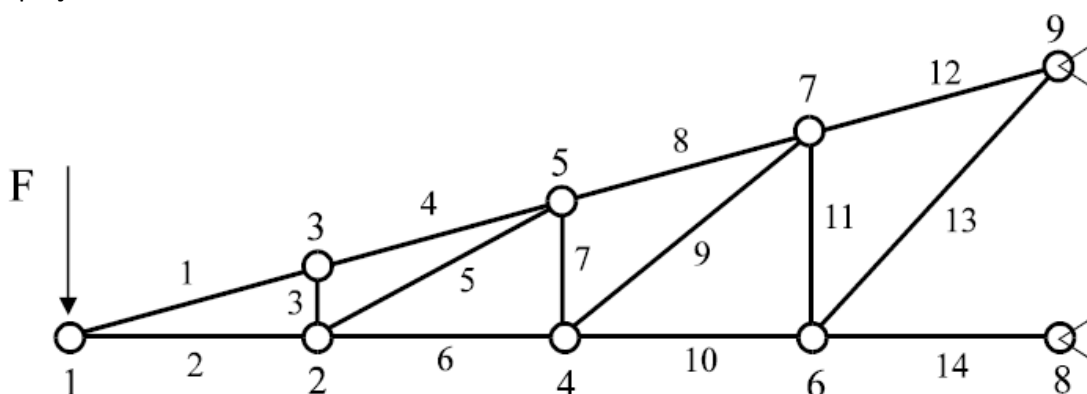


Figura 8: Estructura plana formada per barres articulades. Font: Apunts de Tècniques computacionals.

Els desplaçaments que es poden produir com a conseqüència de l'aplicació d'una força per a cada node són dos: vertical i horitzontal. Per tant, l'estructura té 18 graus de llibertat (9 nodes amb dos desplaçaments possibles cada un). En l'àmbit del mètode dels elements finits, els graus de llibertat (N) es defineixen com als paràmetres necessaris (desplaçaments en aquest cas) per a definir la configuració de l'estructura. La relació entre desplaçaments (vector U) i forces (vector F) es realitza amb la matriu de rigidesa global (K) de l'estructura (Equació 1).

$$K \cdot U = F \quad (1)$$

La matriu de rigidesa K està formada per files "i" i columnes "j". La columna "j" es podria interpretar com el vector de forces necessari per a mantenir un estat de deformació amb valor la unitat en el desplaçament del grau de llibertat "j" i de valor zero a la resta de graus de llibertat. Per a cada element discret, designat amb el superíndex "e" (Equació 2), s'aplica el mateix principi.

$$k^e \cdot u^e = f^e \quad (2)$$

Per a resoldre el problema, es busca definir les equacions globals a partir de les de cada element. Així, es realitza un procés d'assemblatge que comença amb una matriu K nul·la de N x N (18 x 18 en este cas) a la qual es van afegint (Equació 3) les contribucions de cada una de les matrius k^e dels elements discrets (Figura 9).

$$K = \sum_{e=1}^{ne} k^e \quad (3)$$

$k_{11}^1 + k_{11}^2$	k_{12}^2	k_{13}^1						
k_{21}^2	$k_{22}^2 + k_{22}^3$ $k_{22}^5 + k_{22}^6$	k_{23}^3	k_{24}^6	k_{25}^5				
k_{31}^1	k_{32}^3	$k_{33}^1 + k_{33}^3$ $+ k_{33}^4$		k_{35}^4				
	k_{42}^6		$k_{44}^6 + k_{44}^7$ $k_{44}^9 + k_{44}^{10}$	k_{45}^7	k_{46}^{10}	k_{47}^9		
	k_{52}^6	k_{53}^4	k_{54}^7	$k_{55}^4 + k_{55}^5$ $k_{55}^7 + k_{55}^8$		k_{57}^8		
			k_{64}^{10}		$k_{66}^{10} + k_{66}^{11}$ $k_{66}^{13} + k_{66}^{14}$	k_{67}^{11}	k_{68}^{14}	k_{69}^{13}
			k_{74}^9	k_{75}^8	k_{76}^{11}	$k_{77}^8 + k_{77}^9$ $k_{77}^{11} + k_{77}^{12}$		k_{79}^{12}
					k_{86}^{14}		k_{88}^{14}	
					k_{96}^{13}	k_{97}^{12}		$k_{99}^{12} + k_{99}^{13}$

Figura 9: Assemblatge de la matriu de rigidesa on cada posició correspon a una matriu de 2 x 2. Font: Apunts de Tècniques Computacionals.

Cal remarcar que si existiren forces aplicades sobre els elements, s'haurien de calcular les forces equivalents sobre els nodes, per a posteriorment obtenir el vector global de forces per mitjà d'un procés d'assemblatge similar al de la matriu de rigidesa.

En resum, el mètode dels elements finits es basa a transformar un cos continu en un model discret aproximat, procés que rep el nom de discretització. Tot el que ocorre a l'interior d'este cos discretitzat s'obté per mitjà de la interpolació dels valors coneguts als nodes. La solució al problema complet es basa en unir tots els elements discrets en un de continu per mitjà del procés d'assemblatge de matrius descrit anteriorment (Tesis Doctorals en Xarxa, 2004).

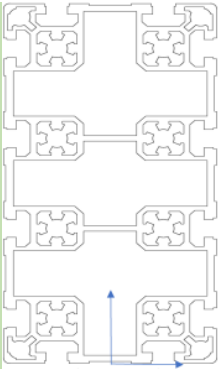
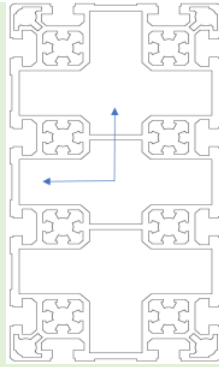
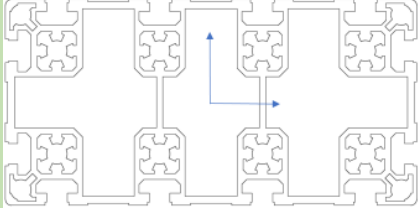
2.1. Canvis realitzats al model d'elements finits del banc

El TFM realitzat per Juan Ramon Roca Castro inclou un model d'elements finits del banc d'assajos en ANSYS. Aquest es va modelar utilitzant keyponits units per mitjà de línies per a representar els eixos dels pilars i les bigues, i àrees per representar totes les plaques. Durant el modelatge es van definir també una sèrie de paràmetres necessaris que s'exposen a continuació.

En primer lloc, es va definir com a material l'alumini. Seguidament, els tipus d'elements per a l'hora de mallar el model, tals com SHELL181 (per a les plaques rigiditzadores), SHELL281 (per a la resta de components que representaven plaques), BEAM188 (per a les bigues) i MASS21 (per a representar unions caragolades, plaques i altres elements com a masses puntuals, que resultarien complexos de modelar). A més, per a poder definir un valor de massa per a aquests punts, fou necessari utilitzar l'opció "real constants" que permet emmagatzemar un valor

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

determinat per a després poder-lo assignar a un element del model d'elements finits (pot ser un valor de massa, l'espessor d'una placa, etc). Es van definir dues "real constant", una per a representar la unió entre bigues i pilars (de valor 7,18 kg) i l'altra per a incloure el pes del capçal excitador al centre de la biga (16,24 kg). Pel que fa a les condicions de contorn, es van aplicar restriccions al desplaçament en tots els graus de llibertat (X, Y i Z) als huit punts on està ancorat a terra el banc real. Per últim, cada component del banc tenia una secció associada. Per a les plaques es van definir les següents seccions: PRIN (placa inferior), PRSU (placa superior), RIG (plaques rigiditzadores), PlacaSo (per a la placa central de la biga); i LAT, BAS, L i C per a la resta de plaques que formen el suport del capçal excitador. Per al cas de bigues i pilars, a la Taula 2 es mostra la secció associada a cada un d'aquests elements. Totes aquestes seccions només seran visibles si es troba activada l'opció "size and shape", que permet mostrar amb detall les seccions de cada element.

Dimensions de la secció	Geometria de la secció
200 x 100 mm (biga)	
200 x 100 mm (pilar exterior)	
200 x 100 mm (pilar interior i base)	
100 x 100 mm (riostes)	

Taula 2: Seccions dels perfils longitudinals de les bigues i pilars. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

Amb tot i això, aquest model d'elements finits del banc presentava una sèrie de diferències que no el feien del tot fidel a la realitat. Les modificacions realitzades al model original són les següents:

- Les plaques rigiditzadores presentaven unes dimensions menors a les reals (0,5 x 0,64 m i no 0,9 x 0,594 m). Amb la finalitat de mantenir intactes les plaques ja modelades, s'han definit àrees addicionals als seus voltants (Figura 10) de manera que la suma de totes elles donara lloc a les buscades àrees de 0,9 x 0,594 m. Tot seguit, s'han mallat i s'han unit els nodes de les línies coincidents mitjançant l'opció "merge items" per tal de simular les unions caragolades.

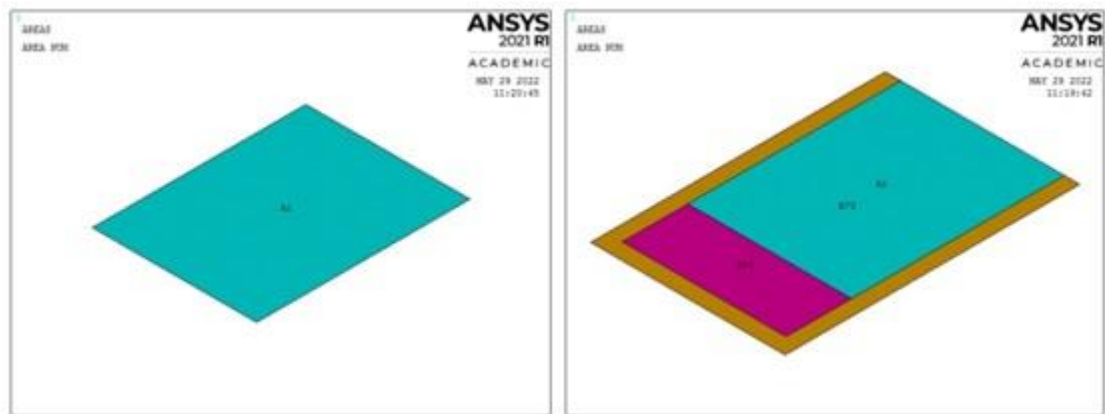


Figura 10: Àrees corresponents a les plaques rigiditzadores originalment (esquerra) i després de modificar-les (dreta). Font: Elaboració pròpia.

- Les plaques de serratge dels caragols, situades sobre els pilars, no estaven modelades geomètricament, ja que estaven integrades en les masses puntuals de les unions entre bigues i pilars. Per mitjà de "modeling" i "areas" s'han representat les plaques sobre els pilars. La forma de representació ha sigut similar a l'anterior: s'ha realitzat per mitjà de dues àrees distintes que la suma de les quals dona com a resultat l'àrea total (Figura 11). A més, ha sigut necessària la creació d'una nova secció, amb un offset de 0,204 m. Posteriorment, s'han unit a les bigues i a les plaques rigiditzadores per mitjà de l'opció abans descrita, "merge items".

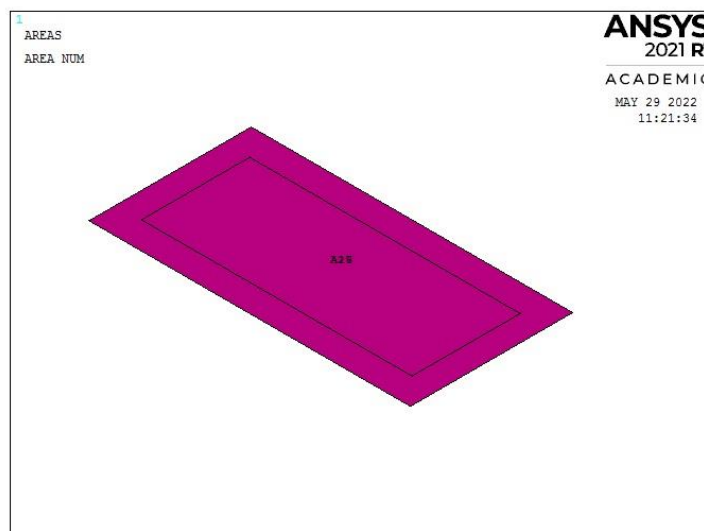


Figura 11: Placa de serratge de caragols. Font: Elaboració pròpia.

- L'espessor d'algunes de les plaques no coincideix amb el real. Pel que fa a la placa superior que forma part del suport del motor lineal, la seua espessor era més gran que el real (20 mm i no 15 mm). A més, el de les bases de les cartel·les era menor al real (10 mm i no 12 mm). Per a la placa superior, s'ha definit una nova secció amb una espessor de 15 mm, i per a les bases de les cartel·les s'ha definit una altra secció amb una espessor de 12 mm. Per tal d'assignar aquestes noves seccions a les àrees corresponents, s'ha fet ús de l'opció "move/modify", "elements", "modify att". Aquesta opció permet modificar les propietats dels elements (tipus de material, secció, etc) així com canviar la posició de punts, línies, àrees, etc.
- Per tal d'incloure les masses reals del sistema físic al model d'elements finits, s'han inclòs a les distintes unions entre barres, les masses puntuals associades a plaques, cartel·les i perfils. S'han definit com a masses puntuals, mallades amb l'element MASS21. A les taules 3, 4, 5, 6 i 7 es mostren els valors de massa en kg que s'han aplicat a cada punt. I a la Figura 12 es mostra la situació de cadascuna de les masses afegides.

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 3 (kg)	
Placa ancoratge principal	0,35
Placa serratge	0,15
TOTAL	0,50

Taula 3: Valors que formen la "Real constant" 3. Font: Elaboració pròpia.

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 4 (kg)	
Placa ancoratge lateral	0,16
Placa serratge	0,15
TOTAL	0,31

Taula 4: Valors que formen la "Real constant" 4. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 5 (kg)	
Placa unió lateral 60° (2 unitats)	2 x 0,24
TOTAL	0,48

Taula 5: Valors que formen la "Real constant" 5. Font: Elaboració pròpia.

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 6 (kg)	
Placa unió lateral 30° (2 unitats)	2 x 0,33
TOTAL	0,66

Taula 6: Valors que formen la "Real constant" 6. Font: Elaboració pròpia.

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 7 (kg)	
Cartel·la 100 x 100	0,465
Cartel·la 50 x 100 (2 unitats)	2 x 0,215
TOTAL	0,895

Taula 7: Valors que formen la "Real constant" 7. Font: Elaboració pròpia.

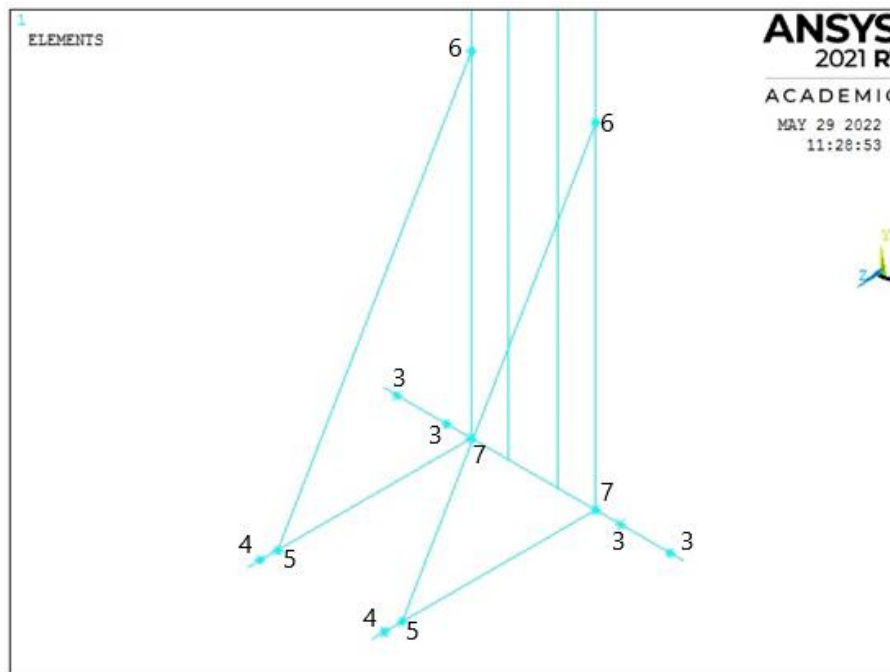


Figura 12: Ubicació de les "Real constants" (igual per al pilar oposat). Font: Elaboració pròpia.

- S'ha substituït la massa puntual corresponent al capçal excitador per un model del mateix capçal, que s'explicarà a l'apartat 2.3.

Així mateix, s'han realitzat canvis en alguns paràmetres definits prèviament al model tals com:

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

- Les masses puntuals del suport de l'excitador corresponents a la "real constraint 2", el valor del qual és 16,42 kg i no 16,24 kg. A més, el valor de la "real constraint 1" s'ha hagut de modificar, ja que les plaques de serratge estan modelades i per tant també ho estan les seues masses, i a més, la massa de les cartelles no era precisa. Per a saber esta última, s'ha contactat amb el fabricant, que ha proporcionat el valor exacte de massa exacta d'aquestes peces (Annex 6). Per últim, s'ha inclòs també la massa de les plaques que tapen els perfils de la biga. A la Taula 8 queda resumida la informació relativa a la "real constant 1".

Masses considerades per a la REAL COSNATNT 1 (kg)	
Placa de connexió de la biga	12,91
Placa de connexió del pilar	10,19
Cartel·la 100 x 100 (5 unitats)	5 x 0,465
Cartel·la 50 x 50 (10 unitats)	10 x 0,077
Tapa lateral perfil (2 unitats)	2 x 0,15
TOTAL	26,495

Taula 8: Valors que formen la "Real constant" 1. Font: Elaboració pròpia.

- El paràmetre K4 del tipus d'element BEAM188 estava definit com a "torsional only". S'ha considerat definir-lo com a "include both" per a assolir resultats més precisos.
- Els offsets de les seccions ja existents, que s'han hagut de modificar perquè quadraren amb les noves seccions creades i no se superposaren.

Finalment, el pòrtic amb les modificacions realitzades fins ara es mostra a la Figura 13.

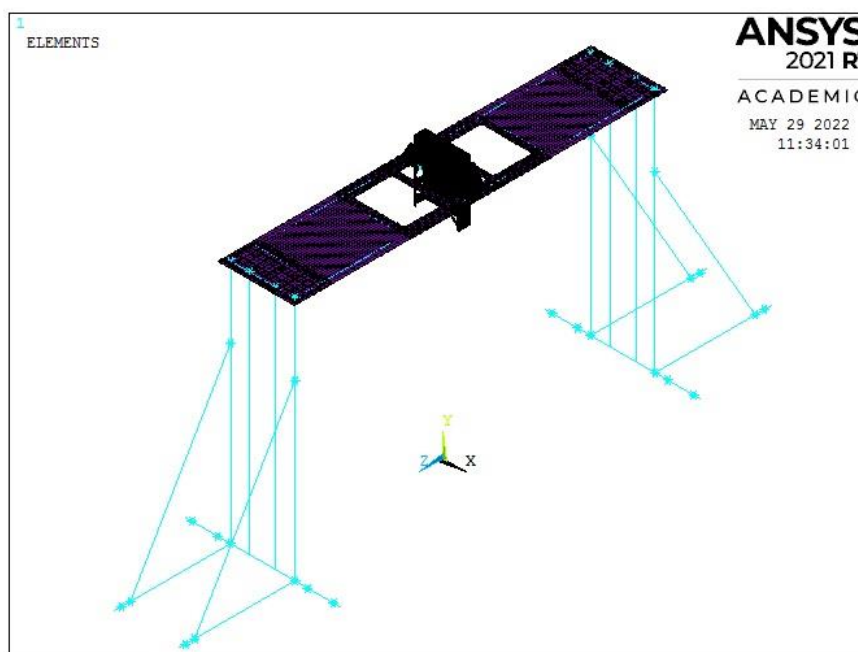


Figura 13: Malla del pòrtic amb les modificacions realitzades. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

2.2. Modelatge del capçal excitador

L'estructura del capçal excitador és complexa (Figura 14), ja que està formada per elements continus. Per tant, s'ha d'analitzar amb el mètode dels elements finits. El tipus d'anàlisi emprat serà modal, ja que este proporciona els modes de vibració i les freqüències naturals. Per a modelar el capçal excitador s'introduiran les propietats del material (acer i alumini), es construirà la geometria, s'aplicaran les condicions de contorn i es discretitzarà (mallarà).



Figura 14: Capçal excitador en posició extrema inferior. Font: Elaboració pròpia.

2.2.1. Procés de modelatge

A partir dels plànols del capçal excitador (Annex 1), s'introdueixen les coordenades dels keypoints que formaran part de les línies que representaran les guies. Tot seguit, es tracen les línies per a unir els keypoints. A continuació, se situen els keypoints que formaran les àrees de les plaques. Estes àrees són la peça anomenada com a "extremo guia" (Annex 1) i la placa hexaèdrica, que no apareix als plànols, les dimensions de la qual són: 625 x 72 x 25 mm, mesurades directament del banc real. Per al modelatge de la peça "extremo guia" (Annex 1) s'han assumit una sèrie de simplificacions, de manera que la geometria d'aquesta queda com en la Figura 15.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

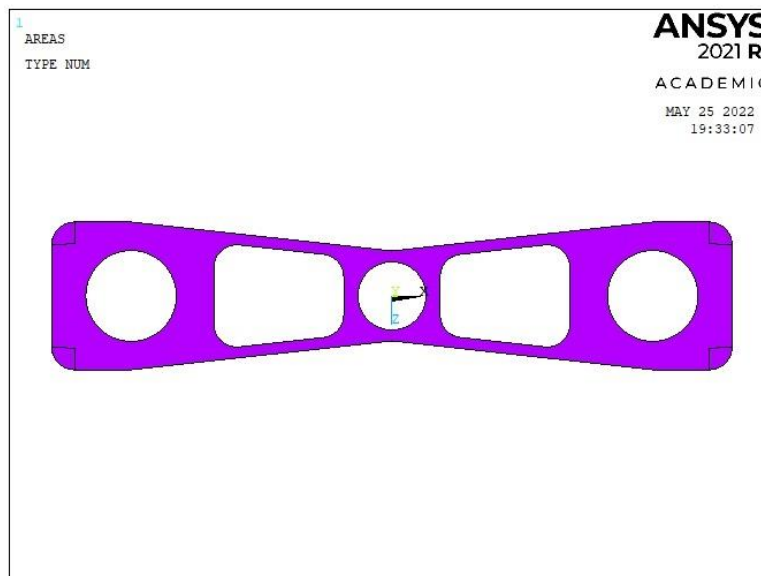


Figura 15: Geometria de l'àrea de l'extrem de les guies. Font: Elaboració pròpia.

El següent pas consisteix a definir les seccions per a les plaques i les guies. A partir dels plànols, s'han definit espessors, diàmetres i materials. S'ha emprat BEAM188 per a les guies i SHELL281 per a les plaques. La guia del motor lineal s'ha considerat com a massissa. Cal remarcar que a la part inferior del capçal, on estan situades les plaques hexaèdrica i l'extrem de la guia, no s'han modelat superposades, sinó situant-les en el seu pla mitjà i reubicant-les amb un "offset" (Figura 16) per a posteriorment poder unir-les més còmodament amb l'opció "Coupling DOF". A més, en modelar-se d'aquesta manera, s'ha pogut analitzar el comportament de la placa hexaèdrica amb més detall.

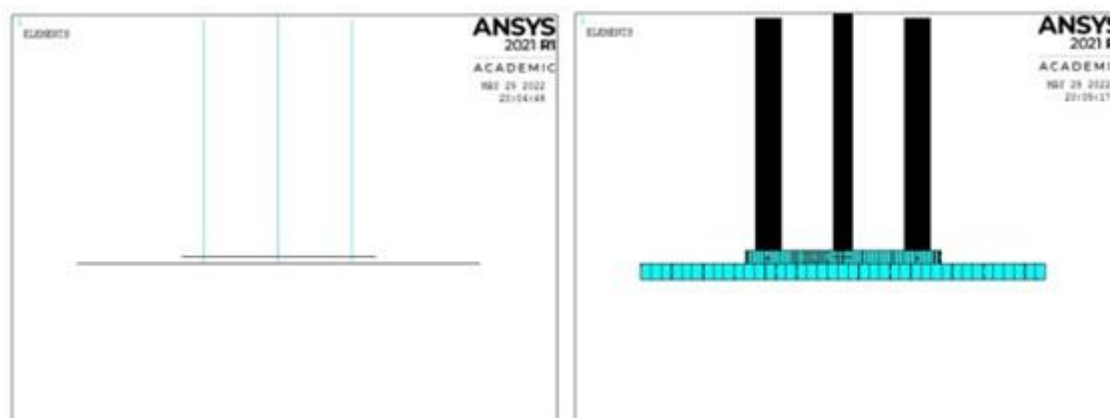


Figura 16: Comparació entre l'extrem de guia inferior amb l'opció "Size and shape" en OFF (esquerra) i en ON (dreta). Font: Elaboració pròpia.

A continuació, s'apliquen les condicions de contorn. Com que les guies del motor lineal estan subjectes a quatre rodaments lineals (dos per cada guia), es restringiran tots els graus de llibertat, excepte el vertical (direcció Y), al llarg de les línies que representen estos rodaments. Pel que fa al motor lineal, la zona del mateix en la qual es troba tot l'entramat magnètic, ha de ser restringida en tots els graus de llibertat per tal de simular que el motor està engegat però no es mou (Figura 19).

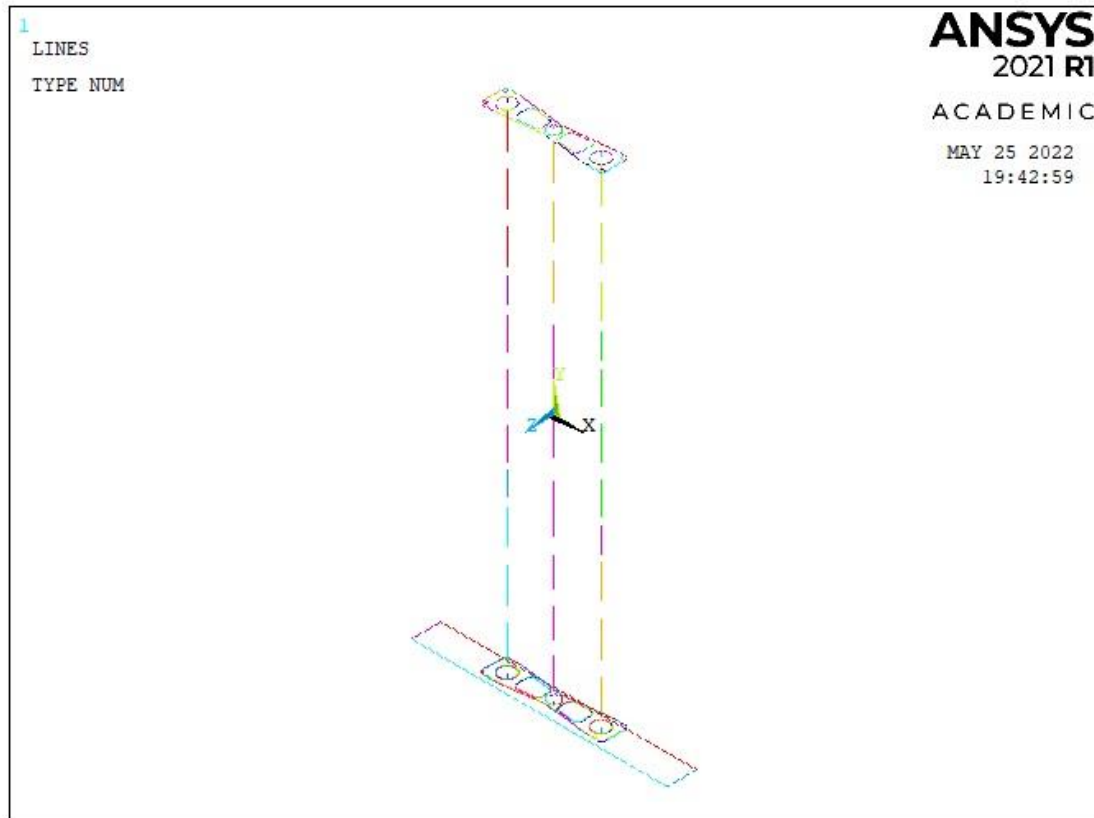


Figura 17: Geometria del capçal excitador. Font: Elaboració pròpia.

Per a mallar, s'utilitzarà acer per a les guies i alumini per a les plaques. Les guies s'han mallat de manera que en cada tram només hi haja un element, pel fet que no és necessària tanta precisió. Pel que fa a la placa hexaèdrica, s'ha mallat amb elements de la mida de 0,05 x 0,05 m, mentre que per al "extremo guia", donada la seua complexitat geomètrica, la mida dels elements és de 0,005 x 0,005 m i amb elements triangulars. Cal destacar que les propietats de l'acer de les guies són les de l'estàndard: 0,3 per al coeficient de Poisson, $2,1 \cdot 10^{10}$ Pa per al mòdul de Young i una densitat de 7850 kg/m^3 . No obstant, per a la guia del motor, s'ha calculat la densitat per mitjà del volum i la massa de la guia. Sabent que la longitud de la guia és de 1224 mm (Annex 1) i que per a la secció s'ha suposat un diàmetre de 30 mm, es pot obtenir el volum de la guia central. Amb aquest volum i la massa, obtenim una densitat de $6460,974 \text{ kg/m}^3$.

Tal com ha quedat el model (Figura 17), les plaques no estan unides entre si ni tampoc a les guies. Este problema se soluciona amb l'opció "Coupling DOF", que s'encarrega que els grups de nodes seleccionats tinguen els mateixos graus de llibertat. Es procedix a realitzar esta operació en les unions entre les guies i els orificis de les plaques "extremo guia" i entre les plaques de la part inferior, en els punts on se situen els quatre caragols que uneixen aquestes dues plaques (Figura 18). D'esta forma, el model ja està preparat per a realitzar l'anàlisi modal (Figura 19). La finalitat d'aquesta anàlisi és comprovar que el model s'ha construït correctament, i no la de tractar els seus resultats.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

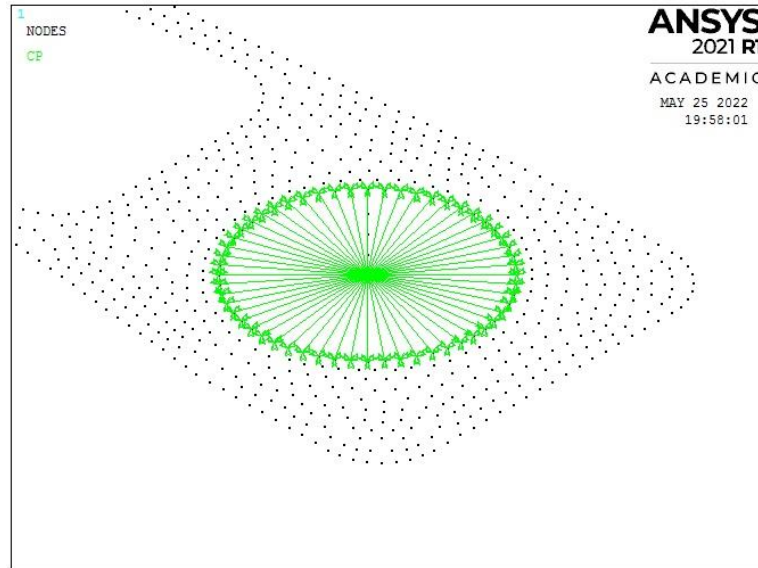


Figura 18: Detall de l'acoblament dels graus de llibertat nodals de la guia i de l'extrem de la guia. Font: Elaboració pròpia.

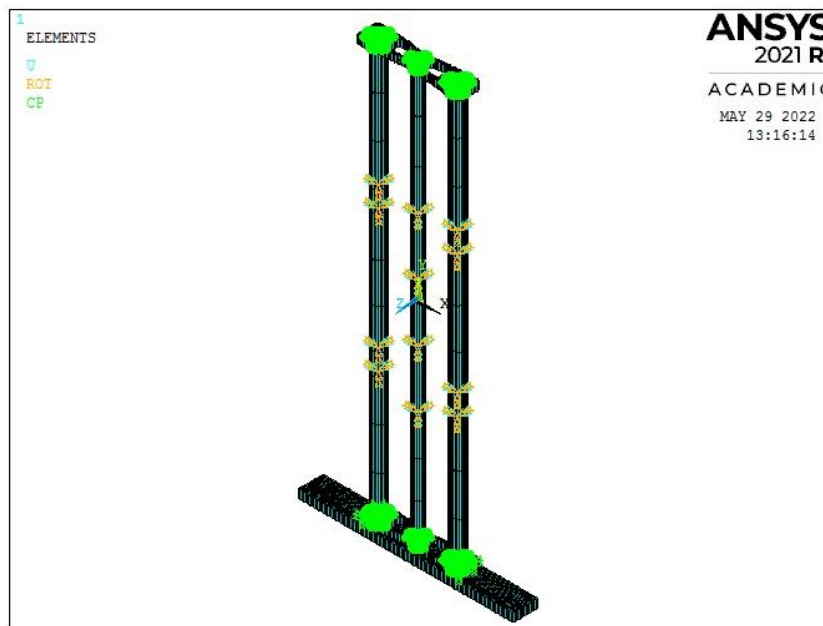


Figura 19: Geometria del capçal excitador amb l'opció "Size and shape" en ON, amb totes les restriccions i acoblaments de graus de llibertat. Font: Elaboració pròpia.

2.3. Unió del pòrtic i del capçal excitador

Una vegada es té el pòrtic i el capçal, es procedeix a la seua combinació. Prenent com a base el pòrtic, s'importa la geometria del capçal excitador. Com que aquest no està en la posició adequada respecte al pòrtic, caldrà reubicar-lo mitjançant l'opció "move/modify", ja explicada en altres apartats. Cal destacar que quan es van realitzar les mesures experimentals, el capçal es trobava en la seua posició extrema inferior (Figura 14), per tant serà en aquesta situació amb la qual quedarà modelat.

Amb el capçal en la posició desitjada, és necessari unir-lo al pòrtic. Aquesta unió es realitzarà amb l'opció "Coupling DOF" unint els nodes de les línies de les guies que representen els rodaments del capçal excitador, amb la placa posterior del suport del capçal, que està unida al pòrtic. Com que els rodaments només permeten el moviment vertical, s'han acoblat tots els graus de llibertat excepte els corresponents als desplaçaments en direcció vertical. S'ha realitzat la mateixa operació amb la guia central del motor amb la diferència que en aquest cas sí que s'han acoblat tots els graus de llibertat.

El model del pòrtic original tenia representat el capçal per mitjà d'una massa puntual definida en la "real constant 2". Com que ara el capçal s'ha modelat, aquesta s'ha eliminat. Així i tot, ha sigut necessari afegir una altra massa puntual junt amb la guia central del motor (Taula 9) per a representar la carcassa del motor lineal, de l'estator i els seus elements (Annex 2).

Masses considerades per a la REAL CONSTANT 8 (kg)	
Brida del motor	4,056
Estatore	8,25
TOTAL	12,306

Taula 9: Valors que formen la "Real constant" 8. Font: Elaboració pròpia.

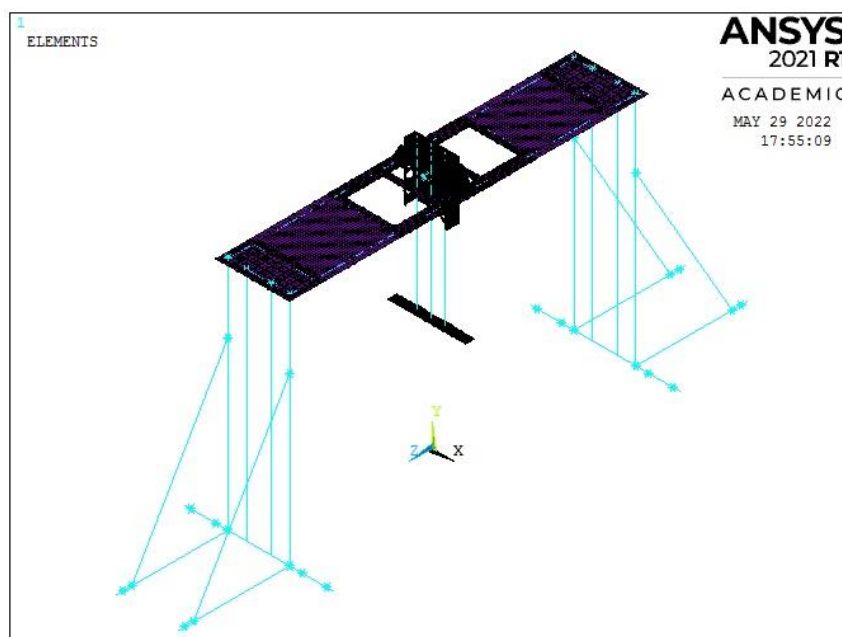


Figura 20: Pòrtic amb el capçal excitador acoblat. Font: Elaboració pròpia.

Una vegada es té el model finalitzat (Figura 20) es procedeix a executar l'anàlisi modal. Es decideixen extraure 30 modes de vibració, principalment per a assegurar la cobertura d'un ampli rang de freqüències i modes de vibració, però també per a estalviar temps de computació ja que a partir dels 40 modes s'excedeix la memòria disponible. Com que se sap del TFM realitzat per Juan Ramón Roca que no se superaran els 70 Hz, serà aquesta la freqüència escollida per a l'anàlisi modal. Per a calcular els modes de vibració s'utilitzarà en ANSYS l'opció de "to mass matrix", que significa normalitzar els modes a la matriu de massa unitària.

2.4. Resultats de l'anàlisi modal per mitjà d'elements finits

Als resultats de l'anàlisi modal apareixeran molts modes de vibració. D'aquests només es necessiten l'axial, el de torsió en Y, el lateral i el vertical perquè són els més representatius. A la Taula 10 i en les següents imatges es mostren aquests modes de vibració i les seues freqüències naturals.

Resultats de l'anàlisi modal pel mètode dels elements finits		
Mode de vibració	Freqüència natural (Hz)	Direcció
2	17,41	Axial
3	24,69	De torsió en Y
4	33,67	Lateral
7	60,67	Vertical

Taula 10: Freqüències naturals de cada mode de vibració. Font: Elaboració pròpia.

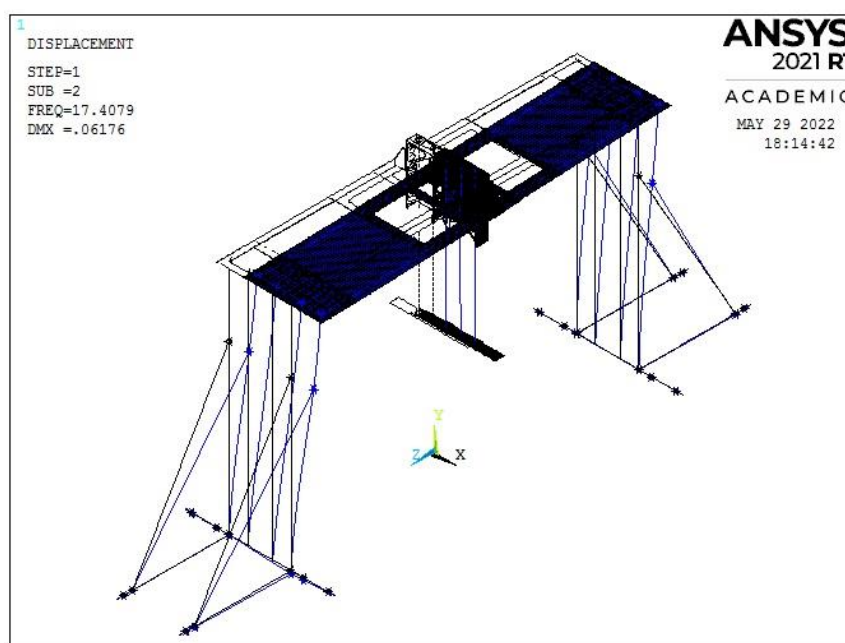


Figura 21: Captura del mode axial en elements finits. Font: Elaboració pròpia.

El mode axial es mostra a la Figura 21. Les línies negres representen el banc sense deformar mentre que les blaves són el banc deformat. S'aprecia clarament que és un mode axial al llarg de l'eix X. S'observa fàcilment que hi ha una desviació major respecte de l'estructura sense deformar a la part esquerra (Z positiva) perquè un dels ancoratges al sòl del banc està més allunyat dels pilars que els altres tres. De fet, ANSYS ho interpreta com si la columna s'enfoncava lleugerament, traspasant el terra. La freqüència natural d'aquest mode és de 17,41 Hz, és a dir, que si es produïra una excitació a aquesta mateixa freqüència, faria entrar el banc en ressonància.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

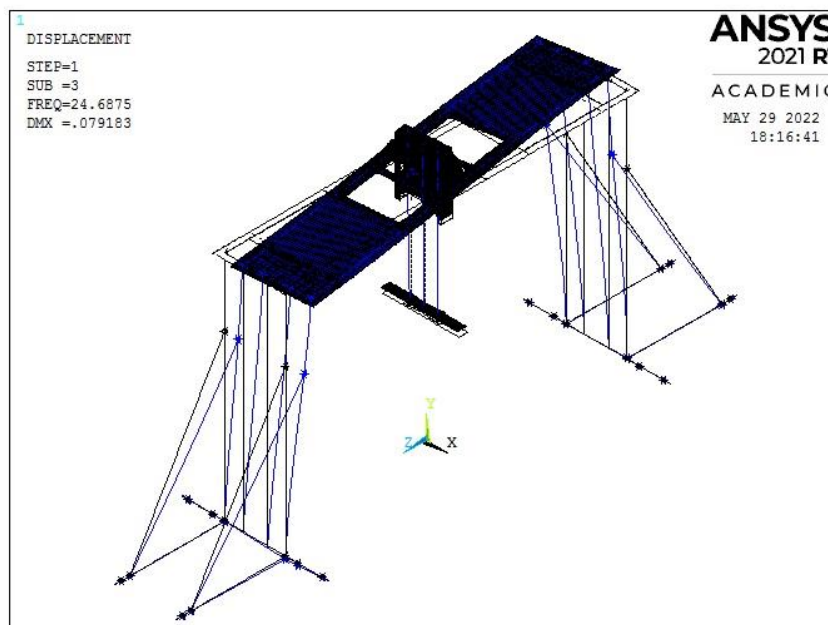


Figura 22: Captura del mode de torsió en elements finits. Font: Elaboració pròpia.

El mode de torsió es mostra a la Figura 22. Igual que per al mode axial, les línies negres representen el banc sense deformat mentre que les blaves són el banc deformat. També s'aprecia amb claredat l'efecte de torsió al voltant de l'eix Y. La seua freqüència natural és de 24,69 Hz.

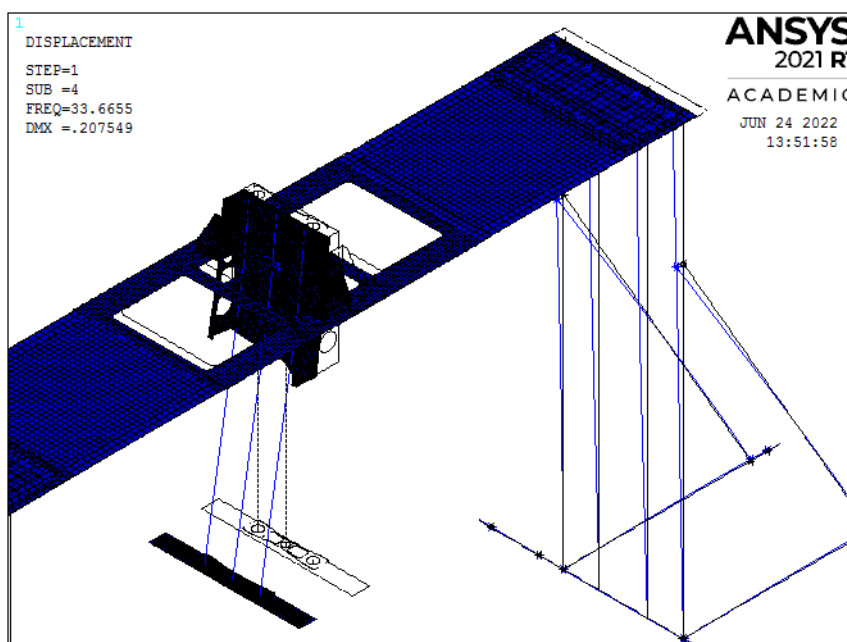


Figura 23: Captura del mode lateral en elements finits. Font: Elaboració pròpia.

El mode lateral es mostra a la Figura 23. Este mode, que apareix a una freqüència de 33,67 Hz, potser no s'aprecia amb tanta facilitat com els anteriors (per aquesta raó la imatge apareix ampliada) si s'observa el centre de la biga, però sí mirant el capçal, on apareix un moviment de balancí. Com que el moviment es produeix en la direcció de l'eix Z, les riostes resulten imprescindibles per a enrigidir el desplaçament lateral. A més, per a aquest mode és important

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

conèixer el seu comportament ja que en un futur es planeja instal·lar un mecanisme per a produir desplaçaments laterals del capçal excitador que produiran aquest moviment. Per tant, s'haurà de tenir en compte per a futures modificacions del disseny.

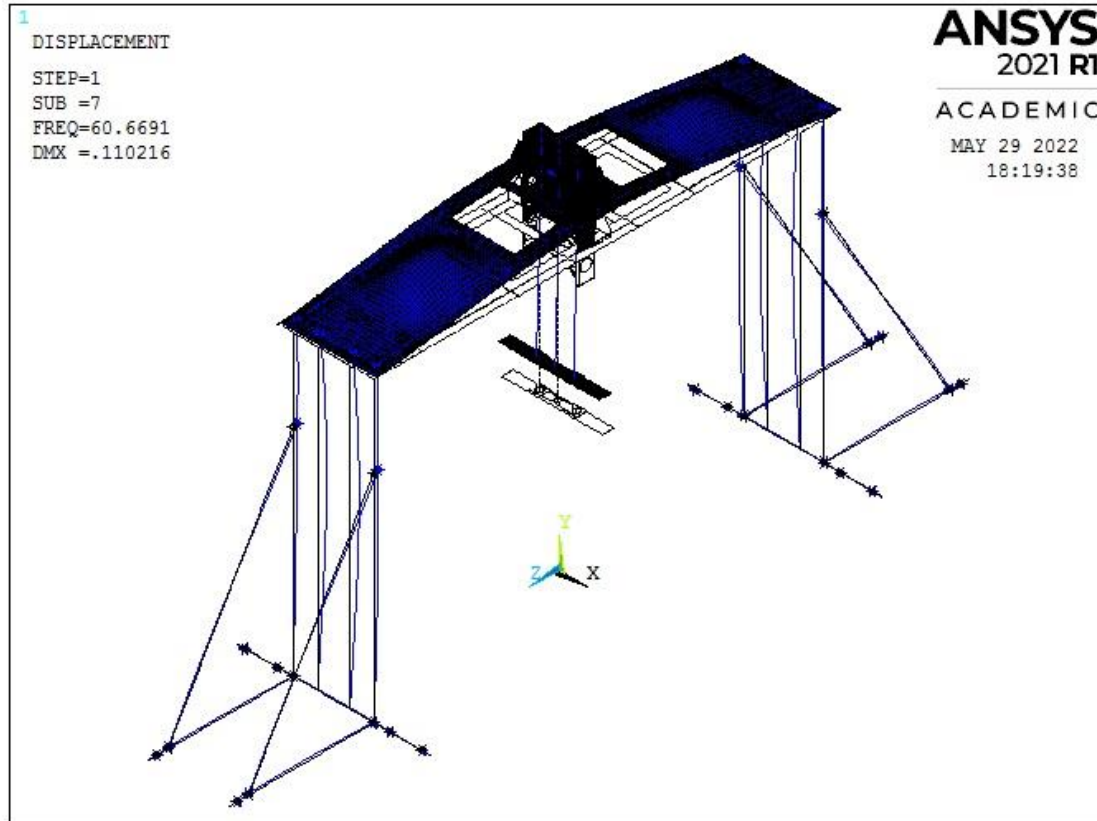


Figura 24: Captura del mode vertical en elements finits. Font: Elaboració pròpia.

El mode vertical es mostra a la Figura 49. Este mode, que es genera en excitar el banc a 60,67 Hz, igual que els dos primers es pot visualitzar clarament. Es pot observar com el centre de les plaques rigiditzadores es deforma notablement cap amunt, probablement perquè no hi ha cap tipus de subjecció en aquesta zona de les plaques, encara que es desconeix si s'ha realitzat alguna modificació a la zona que hi ha entre aquestes plaques rigiditzadores i que siga la responsable d'esta deformació. Tot i que no es descarta la possibilitat d'un defecte al model dels elements finits.

2.5. Comparació amb els resultats del TFM realitzat per Juan Ramón Roca

Uns dels objectius principals d'aquest treball de fi de grau és el de millorar el model d'elements finits del banc a partir del ja existent realitzat com a TFM realitzat per Juan Ramón Roca. A la Taula 11 es mostra la comparació entre les freqüències natural obtingudes en l'anàlisi modal de cada model.

MODES	Model base	Model modificat	Variació
Axial (Hz)	18,08	17,05	-1,03
De torsió (Hz)	25,49	24,69	-0,8
Lateral (Hz)	34,79	33,67	-1,12
Vertical (Hz)	59,43	60,67	+1,24

Taula 11: Comparació entre els resultats del model base i del modificat. Font: Elaboració pròpia.

Com s'observa a la Taula 11, es pot afirmar que la rigidesa del model d'elements finits ha disminuït lleugerament. Els modes axial, de torsió i lateral han reduït la seua freqüència natural al voltant d'1 Hz, que en principi, és molt poc. No obstant, la freqüència natural del mode vertical ha augmentat 1,24 Hz donant com a resultat un mode vertical més rígid que el del model base.

3. Caracterització experimental del comportament dinàmic

Quan es parla de comportament dinàmic, es fa referència a unes accions que varien respecte al temps, en contraposició al comportament estàtic on no hi ha cap tipus de moviment, o aquest és tan menut que es considera nul. Hi ha molts tipus de moviments: rectilini, circular, parabòlic, de sòlid rígid, oscil·latori... Aquest últim serà la base per a este treball de fi de grau.

El moviment oscil·latori o vibratori és aquell en el qual una partícula varia de posició (oscil·la) de forma periòdica respecte a un punt d'equilibri estable. El cas més simple d'aquest tipus de moviment és el moviment harmònic simple (MHS). Aquesta oscil·lació o vibració, du associada una combinació d'energia cinètica amb una dissipació d'energia (excepte en un medi buit).

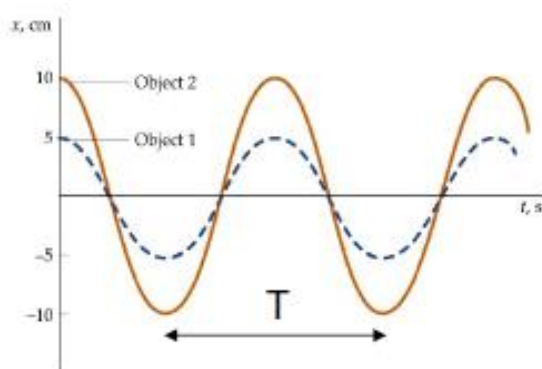


Figura 25: Representació gràfica de dues ones. Font: Apunts de Física d'especialitat.

Els moviments vibratoris es representen gràficament per mitjà de funcions sinusoidals que varien amb el temps dins d'un rang determinat d'amplitud. L'amplitud d'una vibració és la característica que mesura la variació màxima del desplaçament. També es pot definir com la distància entre el punt més allunyat d'una ona i el seu punt d'equilibri. A la Figura 25 s'observen dues ones de funció cosinus (Equació 4), representades en el domini del temps, amb una amplitud de 5 i 10 cm. La T és el període (expressat en segons), que és el temps transcorregut

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

entre dos punts equivalents de l'ona. A partir del període es pot obtenir la freqüència (expressada en Hz o s^{-1}), que és el nombre de cicles o repeticions de l'ona per unitat de temps.

$$x(t) = A\cos(\omega t) \quad (4)$$

3.1. Modelatge de sistemes per a l'anàlisi de vibracions

Si es desitja analitzar un sistema des del punt de vista teòric, primer cal definir un model analític per a aquest, consistent en el plantejament d'un model matemàtic per a posteriorment resoldre'l. Aquest model analític ha de ser senzill de resoldre, al mateix temps que represente les parts més significatives del model real. Els models poden ser discrets, en els quals les seues propietats inercials (m), elàstiques (k) i dissipatives (c) es concentren en punts concrets del sistema, o continus, en els quals aquestes mateixes propietats es troben distribuïdes pel tot el sistema. Realment un sistema continu se sol dividir en un nombre determinat de sistemes discrets que requeriran un nombre discret de variables per a resoldre'l. Aquest nombre de variables que defineix la configuració d'un sistema s'anomena graus de llibertat (gdl).

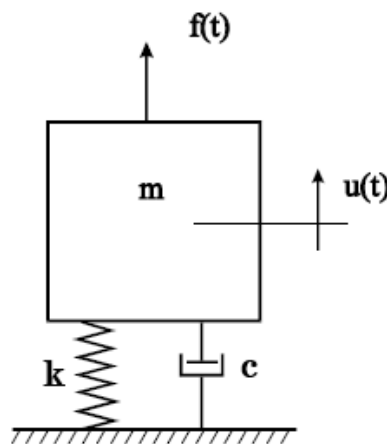


Figura 26: Sistema bàsic d'un grau de llibertat format per una massa m , un molla k i un amortidor c , que té un moviment $u(t)$ generat per la força $f(t)$. Font: Apunts de vibracions mecàniques.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -W + f(t) \quad (5)$$

Els sistemes d'un grau de llibertat (Figura 26) es modelen per mitjà d'equacions diferencials ordinàries (Equació 5). En el moment de resoldre aquestes equacions es poden utilitzar diferents tipus d'anàlisis. Un d'ells és l'anàlisi de les freqüències naturals, que es considera de vibracions lliures, ja que no s'apliquen forces exteriors al sistema. Una freqüència natural (Equació 6) és aquella a la qual tendeix a vibrar el sistema quan existeixen vibracions lliures, i en tindrà tantes com graus de llibertat tinga el sistema. Cada freqüència natural té associat un mode de vibració, que és cada forma de vibrar que té un sistema.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

Pel que fa al banc d'assajos, es tracta d'un sistema de més d'un grau de llibertat. Aquests tipus de sistemes, anomenats comunament com a sistemes de N gdl, necessiten un nombre de coordenades (N) per a poder ser definits. Per tant, el banc no es pot analitzar per mitjà d'equacions diferencials, donada la seua complexitat geomètrica. A més, per a la seua anàlisi s'assumirà la hipòtesi d'un comportament lineal, tenint en compte que les vibracions aplicades generen desplaçaments menuts que no alteren la geometria del sistema (fenomen considerat no lineal). Una forma factible per a l'anàlisi del banc, a més dels elements finits, és pel mètode experimental.

3.2. Tècniques experimentals per a l'anàlisi de vibracions

L'experimentació en vibracions té diversos objectius, tals com: la mesura dels nivells de vibració d'un sistema perquè no se superen els límits acceptables; la validació d'un model teòric; l'obtenció d'un model matemàtic de comportament d'un sistema; etc. Consta de tres fases: generar una excitació controlada, mesurar l'excitació i processar el senyal mesurat a partir d'esta l'excitació.

Per tal de generar un senyal, serà necessari provocar una excitació coneguda al sistema. Existeixen dos tipus de dispositius d'excitació: els excitadors de contacte i els de no contacte. Els primers estan permanentment units al sistema i solen ser mecànics, electromagnètics, electrodinàmics y electrohidràulics. Els més usats són els electrodinàmics, ja que permeten produir l'excitació per mitjà d'un camp magnètic. D'altra banda, com a excitadors de no contacte, que són aquells que no estan necessàriament units al sistema de forma permanent, apareix el martell instrumentat (Figura 27), que incorpora un transductor de força, un capçal i una punta amb la qual s'excita el sistema. Esta punta haurà de ser més rígida com més altes siguen les freqüències que es volen excitar. Cal remarcar que en este tipus d'instrument, l'energia comunicada al sistema depèn de la velocitat i de la massa associada. A més, serà necessari excitar diverses vegades al mateix punt i fer una mitjana dels resultats. Per tant, cal una certa habilitat per a usar aquest aparell.



Figura 27: Martell instrumentat. Font: Elaboració pròpia.

La mesura de la resposta es realitza de forma comuna amb un acceleròmetre piezoelèctric (Figura 28) (genera una determinada tensió elèctrica quan se li sotmet a una deformació, produïda en aquest cas per una vibració) que s'incorpora físicament al sistema al qual se li aplica l'excitació. Concretament per a aquest treball de fi de grau, l'acceleròmetre s'apega amb cera a la superfície del banc en un punt prèviament marcat i en el qual es vol mesurar la resposta.



Figura 28: Acceleròmetre piezoelèctric. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

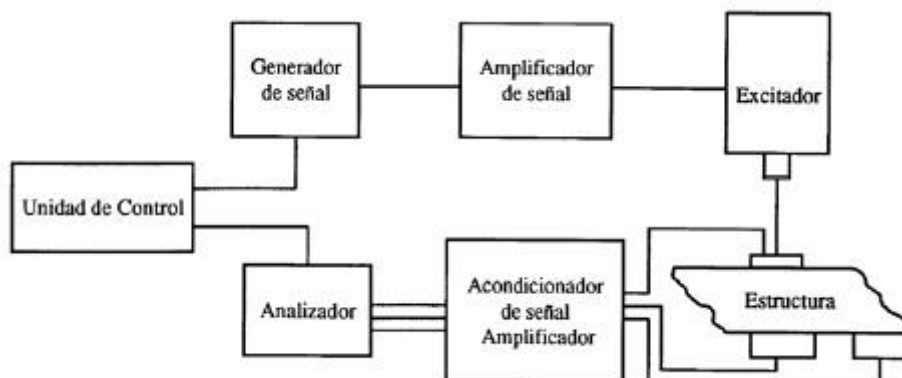


Figura 29: Sistema bàsic de mesura. Font: Apunts de vibracions mecàniques.

Pel que fa al tractament dels senyals, aquests es processen de forma digital segons, l'esquema de la Figura 29, per mitjà d'unes accions que consisteixen a dividir l'ona en una quantitat determinada d'instantos consecutius per a obtenir les característiques d'aquesta. Quan es parla de vibracions, l'anàlisi dels senyals es realitza en el domini de la freqüència. Com que els dispositius mesuren en el domini del temps, serà necessari emprar la Transformada de Fourier (Equació 7). La Transformada de Fourier permet analitzar funcions periòdiques a través de la descomposició d'aquestes funcions en una suma d'altres funcions sinusoidals (o de cosinus) més simples. A més, quan s'analitza un senyal, només es considera una part d'aquesta, és a dir, que s'assumeix una longitud finita del senyal, que es troba dins d'una finestra temporal (Figura 30).

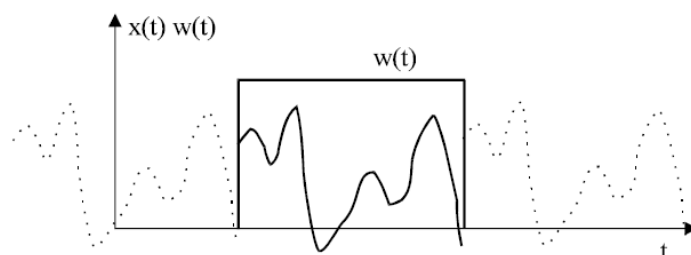


Figura 30: Representació d'una finestra temporal $w(t)$ que conté una longitud finita de l'ona $x(t)$. Font: Apunts de vibracions mecàniques.

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

Quan es considera només la longitud finita del senyal, el valor d'aquesta és de $x(t) \cdot w(t)$. La finestra temporal $w(t)$ de la Figura 30 pot adoptar dos valors: 0 quan es troba fora del rectangle i 1 quan es troba dins. Per tant, com que el senyal es troba acotat dins d'un període T , és possible aplicar una descomposició en desenvolupament de Fourier (Equació 8), de manera que es podrà descriure el senyal per mitjà d'un conjunt de freqüències discretes (Figura 31) associades a un conjunt d'harmònics de freqüència ω_p .

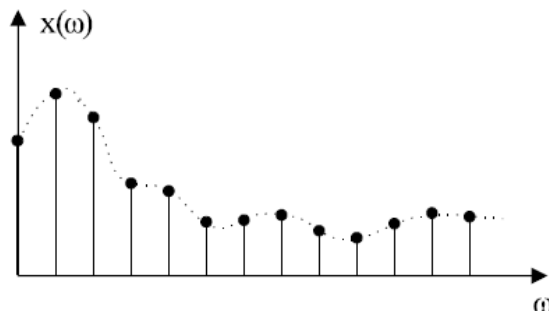


Figura 31: Senyal de l'ona $X(\omega)$ en el domini de la freqüència. Font: Apunts de vibracions mecàniques.

$$X(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i\omega_p t} dt \text{ amb: } \omega_p = p \frac{2\pi}{T}; p = 0, \pm 1 \dots \quad (8)$$

Com que quan s'aplica la Transformada de Fourier es produeix un error (error de leakage), és necessari utilitzar unes finestres temporals per a corregir-lo. Per al cas de senyals aleatoris o periòdics de període distint al temps de registre, que són les d'interés a efectes d'este treball de fi de grau, s'usen finestres temporals del tipus Hanning o Flat Top. Aquestes tenen un valor de 0 tant a l'inici com al final de temps de mesura. Per a forçar aquesta situació, apliquen, per al domini de la freqüència, una sèrie de filtres passabanda que són aquells que només deixen passar un determinat rang de freqüències, atenuant-ne la resta.

Una vegada digitalitzat el senyal original, s'ha de tenir en compte que si no es realitza un mostreig a una freqüència adequada, aquesta no es podrà recuperar. Aquest fenomen es coneix com a "aliasing", i és l'efecte que causa que els senyals continus que són distintes no es puguin distingir quan es realitza el seu mostreig digitalment. Per tant, per a solucionar aquest problema la freqüència màxima analitzable ha de ser la meitat de la freqüència de mostreig.

La informació a obtenir és la relativa a les funcions de resposta en freqüència i les funcions coherència. D'una banda, les funcions de resposta en freqüència (FRF) mesuren la relació entre la resposta a l'excitació d'un sistema (lineal per a este cas; Figura 32) i la mateixa excitació. Aquestes es calculen de la següent forma. Si es produeix una excitació $x(t)$ sobre un sistema que provoca una resposta $y(t)$, la FRF serà $h(t)$ (Equació 9).

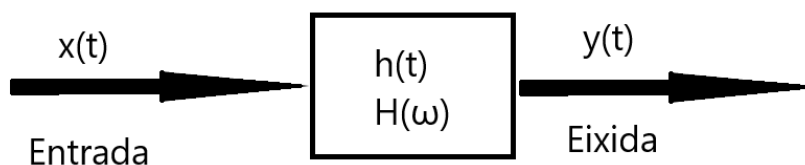


Figura 32: Sistema lineal amb una entrada $x(t)$ (excitació) i una eixida $y(t)$ (resposta). Font: Elaboració pròpia.

$$h(t) = \frac{y(t)}{x(t)} \quad (9)$$

Però com que es necessita obtenir aquesta FRF en el domini de la freqüència, per mitjà de la Transformada de Fourier es podrà determinar el valor d'aquesta $H(\omega)$ (Equació 10), passant

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

prèviament al domini de la freqüència les funcions $x(t)$ i $y(t)$ utilitzant l'Equació 8, quedant aquestes com a $X(\omega)$ i $Y(\omega)$.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (10)$$

D'altra banda, les funcions coherència serveixen per a comprovar si la resposta que mesurem és causada completament per l'entrada (Equació 11). Per tant, si hi ha algun tipus d'interferència externa, el valor de la coherència es reduirà. Aquest valor pot estar entre 0 i 1. Una coherència pròxima a 0 pot ser un indicatiu de defectes en la mesura, no linealitats, excitacions no mesurades... Mentre que una coherència pròxima a 1 indica que les mesures són correctes.

$$\gamma^2(\omega) = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad 0 \leq \gamma^2(\omega) \leq 1 \quad (11)$$

3.3. Mètode per a l'obtenció de resultats de forma experimental

Tot i que el model experimental del pòrtic ja es va construir com a TFM (Roca Castro, 2022), s'ha optat per tornar a mesurar en els mateixos punts (36 en total) per tal de comprovar que es va realitzar correctament, i a més, mesurar en uns altres 22 punts amb la finalitat de comprovar si es produeix un moviment relatiu entre les barres que formen els pilars (20 punts), així com observar el comportament del centre de les plaques rigiditzadores superiors (2 punts). El mètode d'assaig consisteix a excitar el banc mitjançant un martell instrumentat, i per mitjà d'un acceleròmetre piezoelèctric, mesurar la resposta. A continuació es mostra la posició dels punts originals i dels nous a les vistes: superior (Figura 34), frontal (Figura 35), posterior (Figura 36) i els detalls de l'interior del pilar esquerre (Figura 37), del pilar dret (Figura 38), laterals (Figura 39), de la barra de contacte (Figura 40) i del suport de l'excitador (Figura 41), així com el sistema de referència escollit per al banc (Figura 33).

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

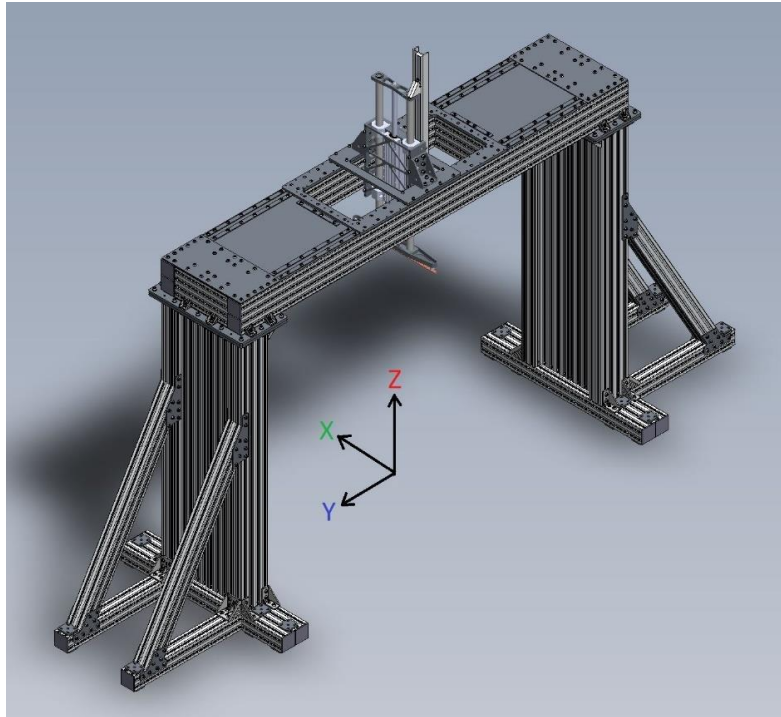


Figura 33: Sistema de coordenades global del banc. Font: TFM Juan Ramon Roca.

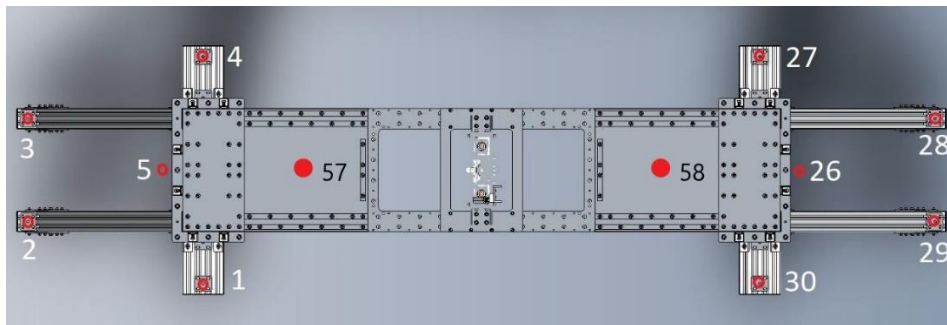


Figura 34: Posicions en vista superior. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

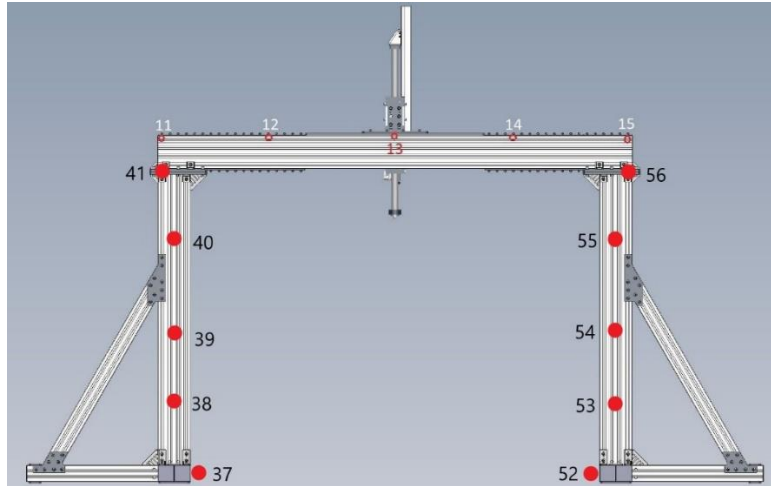


Figura 35: Posicions frontals. Font: Elaboració pròpia.

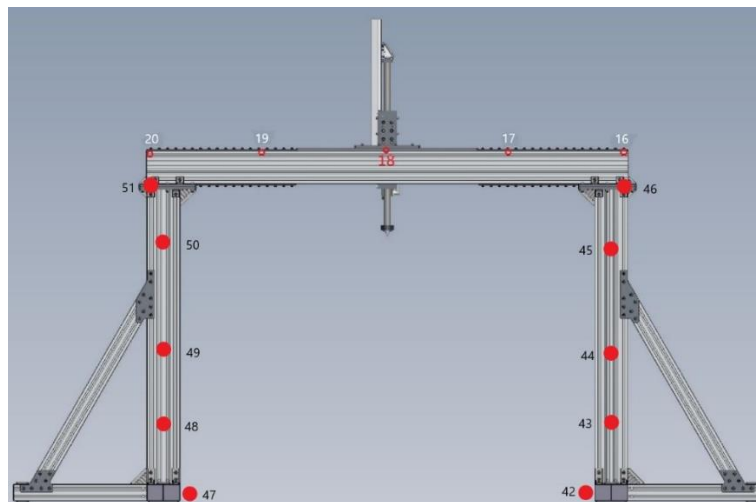


Figura 36: Posicions posteriors. Font: Elaboració pròpia.



Figura 37: Detall de la posició dels punts a l'interior del pilar esquerre. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs



Figura 38: Detall de la posició dels punts a l'interior del pilar dret. Font: Elaboració pròpia.

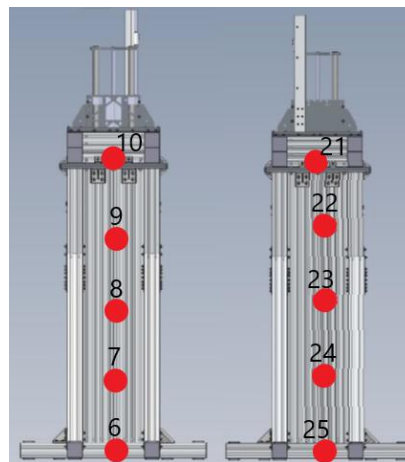


Figura 39: Posicions laterals. Font: Elaboració pròpia.

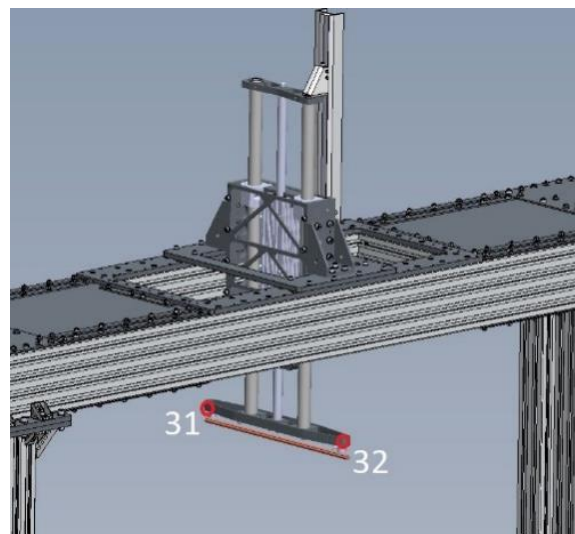


Figura 40: Posicions barra de contacte (Nota: aquesta barra s'ha substituït per una placa hexaèdrica de dimensions 625 x 72 x 25 mm). Font: TFM Juan Ramón Roca.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

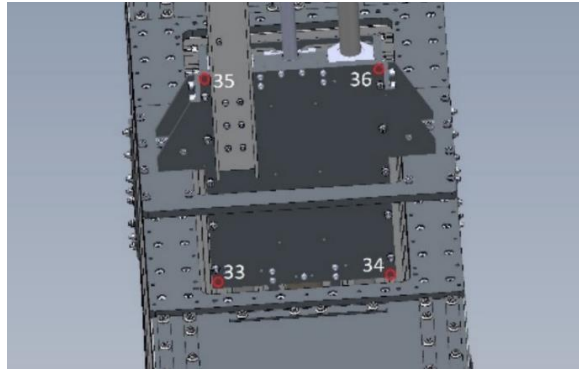


Figura 41: Posicions suport de l'excitador. Font: TFM Juan Ramón Roca.

Per tal de poder analitzar les dades, serà necessari realitzar el següent muntatge: es connectarà el martell instrumentat i l'acceleròmetre a un sistema d'adquisició (Figura 42). Este sistema d'adquisició disposa d'un canal d'entrada per al martell instrumentat i de tres canals d'entrada per a l'acceleròmetre, que representen els eixos X, Y i Z. El sistema d'adquisició es connectarà a l'ordinador per mitjà d'un canal de sortida USB. Tot seguit, s'escull la punta de goma per al martell instrumentat, ja que l'excitació serà a freqüències menors a 200 Hz. Pel que fa a l'acceleròmetre, s'haurà de situar en aquells punts en els quals es desitge mesurar la resposta.

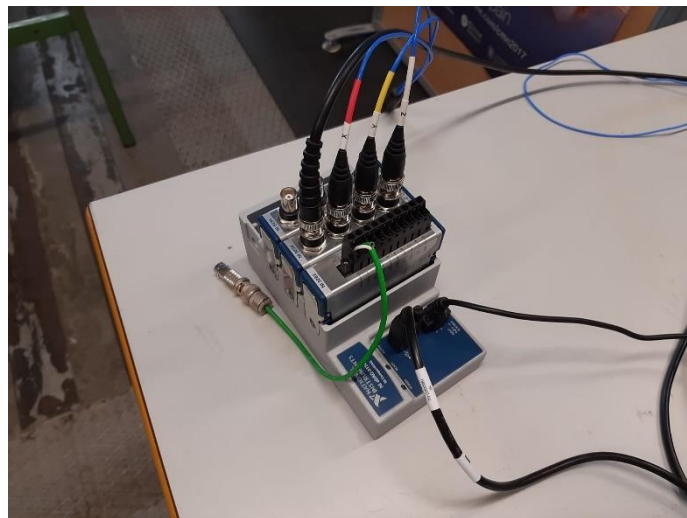


Figura 42: Targetes d'adquisició de dades. Font: Elaboració pròpia.



Figura 43: Vista general del muntatge per a l'obtenció de dades. Font: Elaboració pròpia.

Una vegada s'ha realitzat el muntatge (Figura 43), es procedeix a realitzar les mesures. S'ha escollit el punt 10 per a l'excitació en direcció lateral i el punt 12 per l'excitació en les direccions vertical i axial, mentre que l'acceleròmetre s'haurà de situar en cada un dels 58 punts. Totes les dades recopilades s'obtenen per mitjà del programa ADC, desenvolupat pels investigadors del I2MB de la Universitat Politècnica de València utilitzant MATLAB.

Este programa permet també establir la configuració dels instruments de mesura. D'aquesta manera, es defineixen els paràmetres referents a freqüència de mostreig i al nombre de mostres. Basant-se en el TFM realitzat per Juan Ramón Roca, les freqüències associades als quatre modes analitzats a penes arriba als 60 Hz, per tant serà suficient establir una freqüència de 100 Hz (102,4 Hz segons el programa ADC), i amb un nombre de mostres de 2048. A partir d'aquests, el programa definirà la resta de paràmetres de manera automàtica (Taula 12).

Paràmetres de mesura de la resposta	
Freqüència de mostreig (Hz)	204,8
Freqüència d'anàlisi (Hz)	102,4
Nombre de mostres per bloc (-)	2048
Resolució (Hz)	0,1
Temps de mesura per bloc (s)	10

Taula 12: Paràmetres de mesura de l'excitació als punts. Font: Elaboració pròpia.

Com ja s'ha mencionat abans, l'acceleròmetre se situarà en cada un dels 58 punts que es mesuraran. Per a cada punt s'excitarà en les tres direccions (punt 10 en -Y i punt 12 en +X i +Z, segons la Figura 33), de manera que s'obtingran tres arxius de funció de resposta en freqüència (FRF) i tres de coherència. En total, s'obtingran 174 arxius de FRF i 174 de coherència. S'ha excitat tres vegades en el mateix punt per a reduir la probabilitat d'errors en la mesura, a fi que el programa calcule una mitjana amb els resultats de les tres excitacions realitzades.

Quan ja es tenen tots els fitxers necessaris de FRF i freqüència de cada punt, es procedeix a la visualització dels modes. Primer s'ha de completar el fitxer ModGeo_Banco_nous_pilars (Annex 7) amb les coordenades dels nous punts que s'han mesurat i que no figuraven al projecte anterior, així com les línies que uneixen estos punts. Tot seguit, s'executa el programa APM, desenvolupat també per el I2MB de la Universitat Politècnica de València utilitzant MATLAB, i es carreguen en ell els fitxers de dades referents als modes lateral, vertical i axial. De manera

que es construeixen tres models del pòrtic, una per cada mode mencionat anteriorment. Pel que fa al mode de torsió, es visualitzarà al mateix model que l'axial. Les gràfiques que apareixen baix dels models virtuals, generades pel mateix programa, permeten identificar les ressonàncies més notables amb les seues freqüències naturals amb l'objectiu de determinar els modes de vibració associats.

3.4. Resultats de l'anàlisi experimental

Una vegada ja es tenen totes les dades de cada punt referents a les funcions de resposta en freqüència i a les coherències, es procedeix a la seua anàlisi. De tots els punts, només es representaran gràficament les FRF de punt, que són aquelles que relacionen excitació i resposta d'un mateix punt. En aquest cas, el 10 per a la direcció lateral i el 12 per a les direccions axial i vertical. A continuació es mostra la representació de les FRF i de les coherències.

Cada FRF s'identifica a la llegenda dels gràfics com la resposta en un punt (en una direcció) provocada per una excitació en el mateix punt (en una altra direcció). Els punts poden ser el 10 i el 12, com ja s'ha mencionat al paràgraf anterior, i les direccions poden ser 1, 2 i 3 corresponents amb els eixos X, Y i Z de l'acceleròmetre. Així per exemple, si una FRF es mostra com a $12_3/12_1$ (Figura 45) significa que aquesta és la resposta en el punt 12, provocada per una excitació en el punt 12 en una direcció determinada corresponent al mode que es vol analitzar.

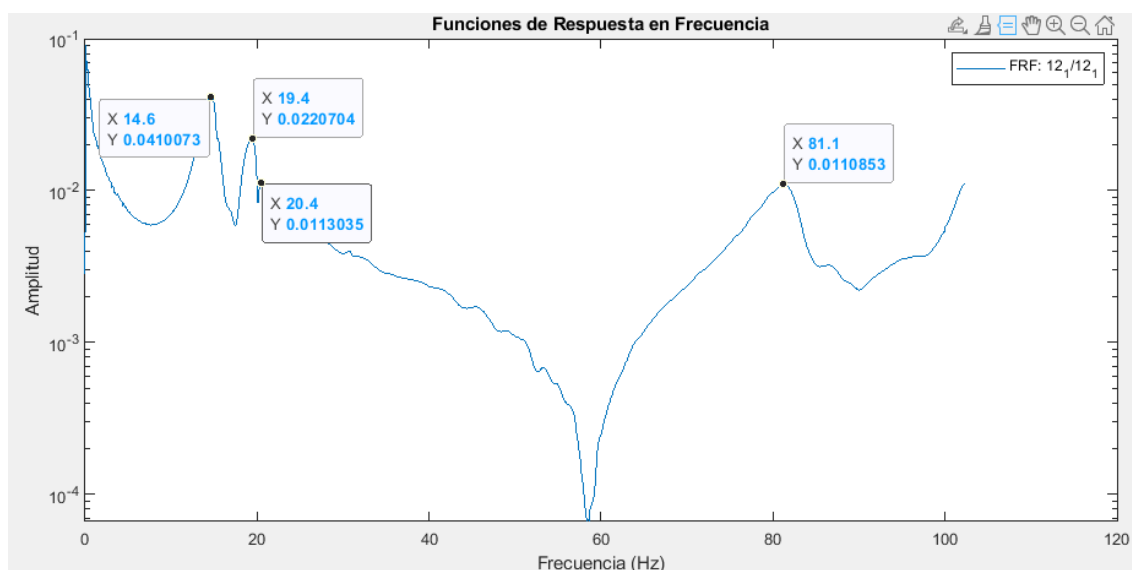


Figura 44: Gràfica de les FRF del punt 12 excitat en direcció axial. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

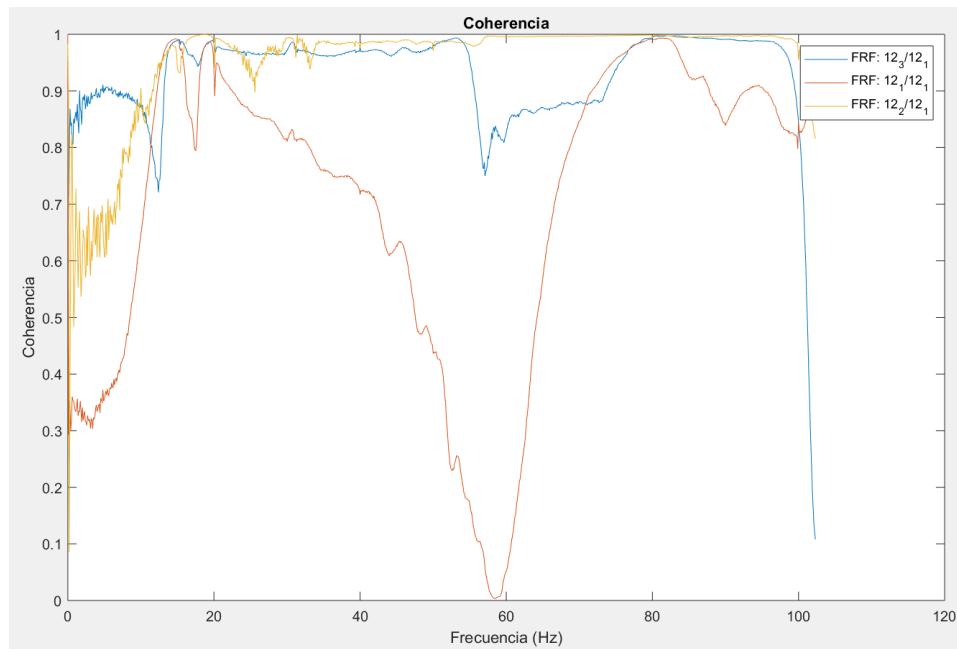


Figura 45: Gràfica de les coherències del punt 12 excitat en direcció axial. Font: Elaboració pròpia.

La Figura 44 correspon a les funcions de resposta en freqüència i a les coherències en el punt 12 quan s'excita en direcció axial (+X segons la Figura 33). D'una banda, pel que fa a l'amplitud d'ona, apareixen quatre pics que són les resonàncies que pateix el banc. El pic de 14,60 Hz és el de major amplitud. D'altra banda, els valors de coherència inferiors als 15 Hz no són bons. Aquest fet és degut probablement a l'error de l'operador a causa de realitzar una excitació més fluixa prop de l'acceleròmetre per tal de no colpir-lo. A la freqüència de 58 Hz també hi ha una coherència molt baixeta a causa de la presència d'una antiressonància, que fa que la resposta siga baixa (Figura 45). Per últim, per davall dels 10 Hz no s'obtenen coherències bones ja que l'acceleròmetre no mesura adequadament freqüències tan baixes.

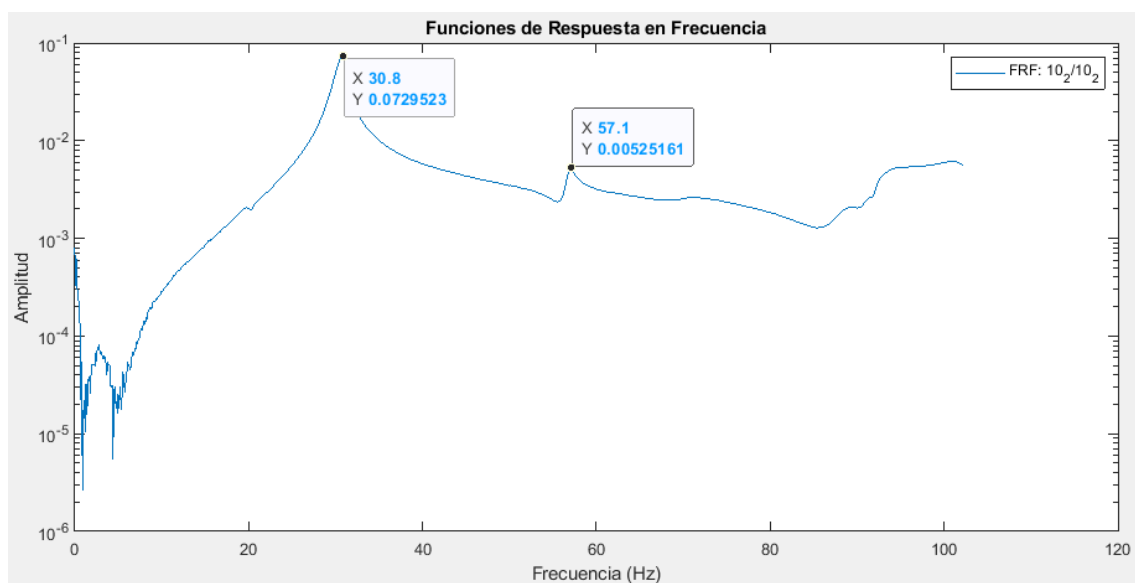


Figura 46: Gràfica de les FRF del punt 10 excitat en direcció lateral. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

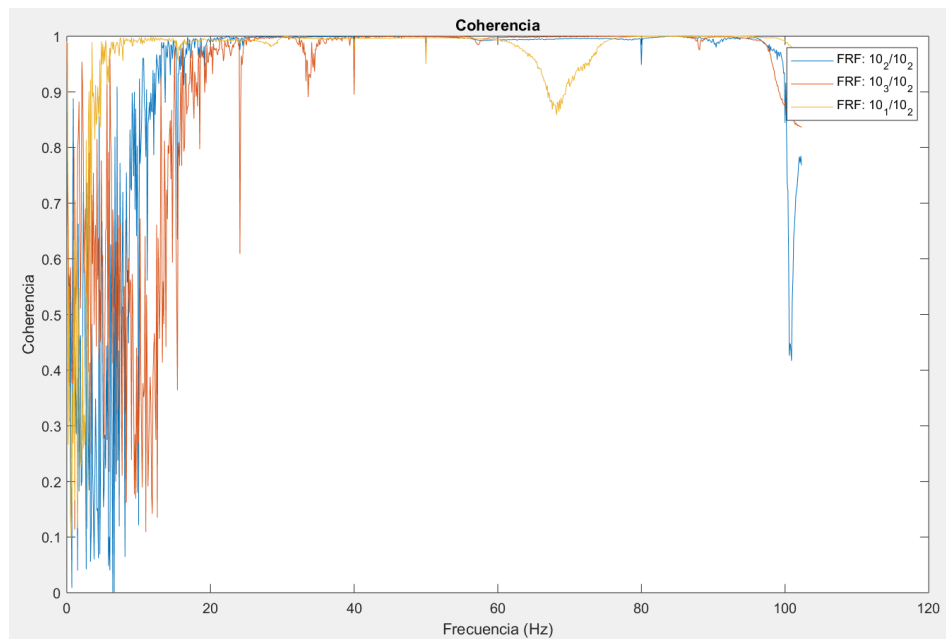


Figura 47: Gràfica de les coherències del punt 10 excitat en direcció lateral. Font: Elaboració pròpia.

La Figura 46 correspon a les funcions de resposta en freqüència i a les coherències en el punt 10 quan s'excita en direcció lateral (-Y segons la Figura 33). D'una banda, pel que fa a l'amplitud d'ona, apareixen dues ressonàncies. El pic de 30,80 Hz és el de major amplitud. D'altra banda, els valors de coherència inferiors als 25 Hz comencen a no ser bons, un fet que es repeteix per a les antiresonàncies (Figura 47) per les raons ja explicades anteriorment.

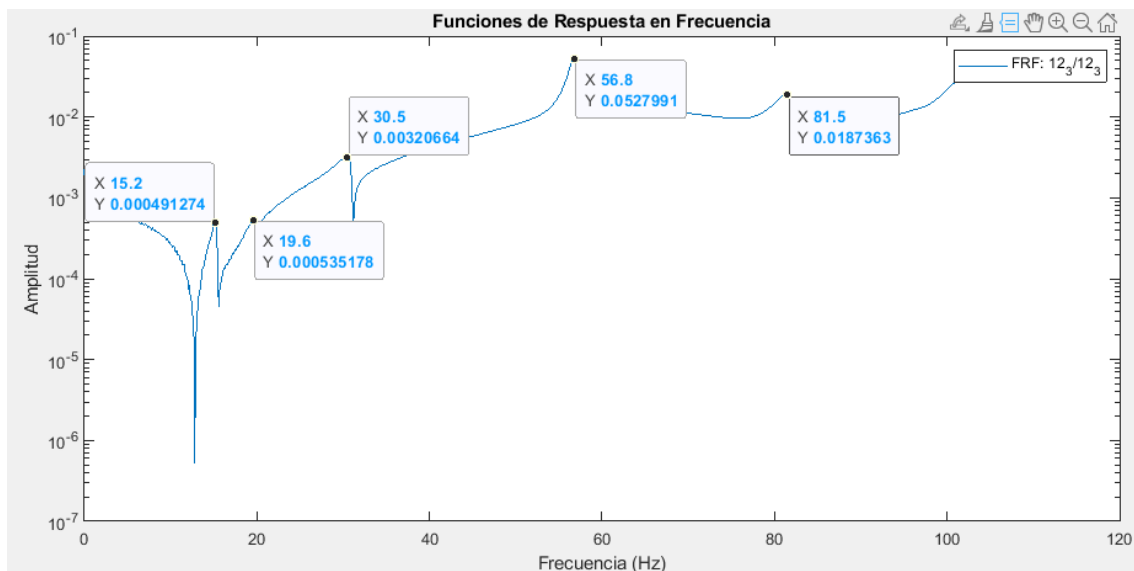


Figura 48: Gràfica de les FRF del punt 12 excitat en direcció vertical. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

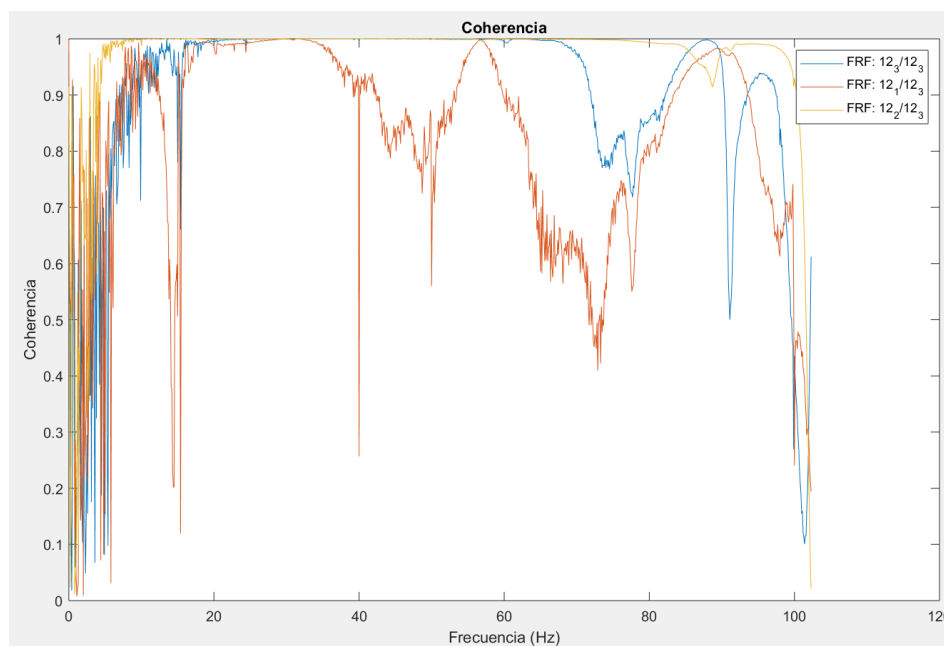


Figura 49: Gràfica de les coherències del punt 12 excitat en direcció vertical. Font: Elaboració pròpia.

La Figura 48 correspon a les funcions de resposta en freqüència i a les coherències en el punt 12 quan s'excita en direcció vertical (+Z segons la Figura 33). D'una banda, pel que fa a l'amplitud d'ona, apareixen cinc ressonàncies. El pic de 56,80 Hz és el de major amplitud. D'altra banda, els valors de coherència inferiors als 20 Hz i pròxims a 100 comencen a no ser bons, i igual com abans, també a les antiressonàncies (Figura 49).

Una vegada ja es tenen tots els valors de freqüències naturals, es compararan amb aquells obtinguts al TFM realitzat per Juan Ramón Roca. Com es pot observar a la Taula 13, la diferència entre els resultats d'ambdós models és mínima, a excepció del mode lateral, que supera la unitat. Aquests resultats són deguts a dos motius. D'una banda, amb el pas del temps potser les unions caragolades s'han afluixat donant com a resultat una pèrdua de rigidesa. D'altra banda, és possible que part d'aquesta variació és deguda a l'error introduït per l'operador, ja que en un mètode experimental mai es poden realitzar dues mesures exactament iguals i amb més motiu si es tracta del martell instrumentat, on l'operador s'ha d'assegurar de realitzar la força suficient i de mantenir l'orientació adequada.

MODES	Model amb 22 punts	Model amb 58 punts	Variació
Axial (Hz)	14,75	14,60	-0,15
De torsió (Hz)	19,50	19,20	-0,3
Lateral (Hz)	32,00	30,80	-1,2
Vertical (Hz)	57,25	56,80	-0,45

Taula 13: Comparació de les freqüències de cada model de banc. Font: Elaboració pròpia.

Tot seguit es mostra el pòrtic modelat amb el programa de MATLAB anomenat APM amb els 58 punts, tot i que en realitat només s'utilitzaran 56, excloent-ne el 31 i el 32 (Figura 40) per una qüestió que s'exposarà al final d'este apartat. Cal destacar que algunes coordenades utilitzades per al TFM anterior s'han hagut de modificar, ja que no eren del tot fidels a la realitat. Per als quatre modes mostrats a continuació, la unió dels punts rojos representa l'estructura sense deformar i la unió dels punts blaus, la deformada. La fletxa blava indica la direcció de la deformació.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

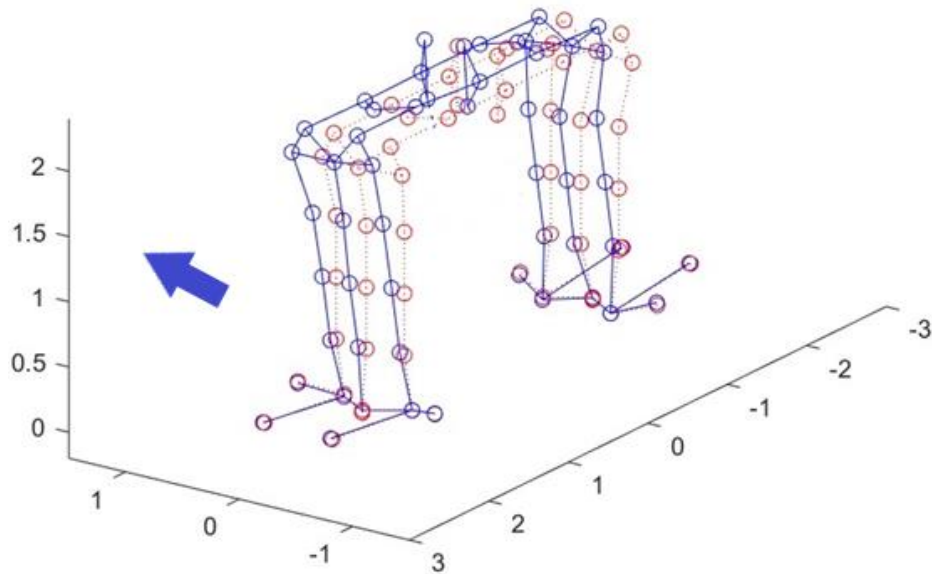


Figura 50: Captura de l'animació del mode axial experimental. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 50 es mostra el mode axial, que es correspon amb la freqüència natural de 14,6 Hz. Es pot observar com tots els punts que no formen la base es mouen pràcticament igual en la direcció de l'eix X del pòrtic (Figura 33), cosa que valida les mesures realitzades als 22 punts addicionals.

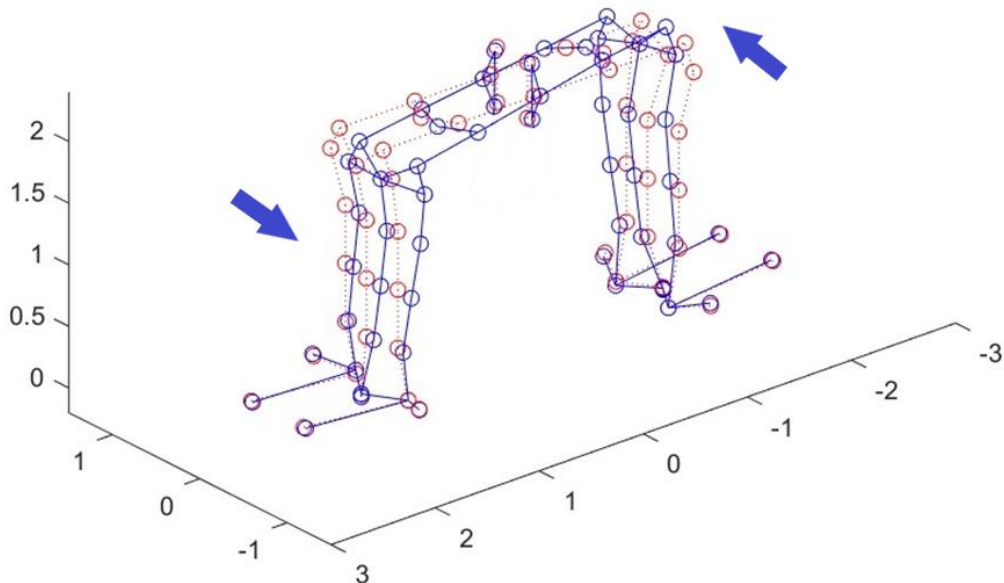


Figura 51: Captura de l'animació del mode de torsió experimental. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 51 es mostra el mode de torsió, que es correspon amb la freqüència natural de 19,2 Hz. Es pot observar com els extrems de la biga es desplacen al llarg de l'eix X (Figura 33) en sentits oposats, mentre que els punts del centre, corresponents al capçal excitador, romanen pràcticament immòbils (són els anomenats nodes). D'aquesta manera, el mode de torsió queda visualitzat amb claredat.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

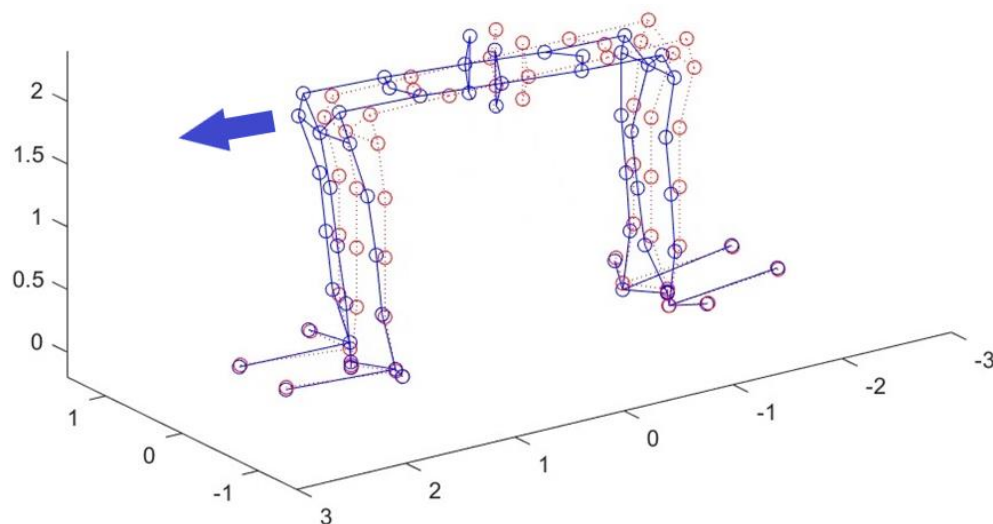


Figura 52: Captura de l'animació del mode lateral experimental. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 52 es mostra el mode lateral, que es correspon amb la freqüència natural de 30,8 Hz. En aquest cas, els punts 10 i 21 (Figura 39) tendeixen a avançar-se respecte a les columnes de punts que tenen a ambdós costats. Aquest fet potser siga produït per l'existència d'un mínim lliscament entre les plaques d'unió de la biga i de la columna, o pel fet que alguns caragols no estan collats del tot.

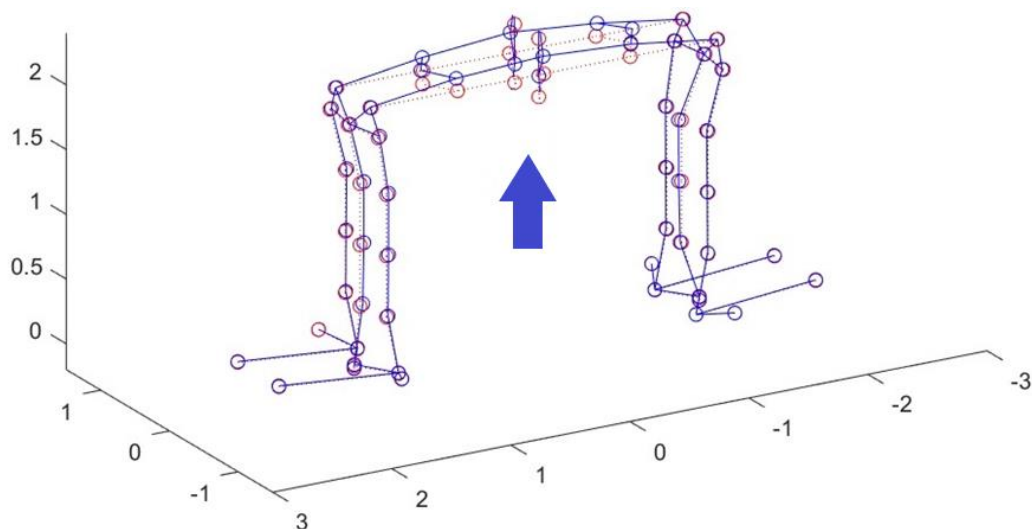


Figura 53: Captura de l'animació del model vertical experimental. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 53 es mostra el mode vertical, que es correspon amb la freqüència natural de 56,8 Hz. Aquest mode s'aprecia clarament, ja que l'única part que es mou és la biga. Per tant, les mesures realitzades als nous punts són correctes. La incorporació al model dels punts 57 i 58 (Figura 34) es va realitzar especialment per a estudiar el comportament del centre de les plaques rigiditzadores, però com es pot observar no presenten cap anormalitat. Per tant, és probable que el model d'elements finits tinga un defecte en estos punts.

El motiu pel qual s'han exclòs els punts 31 i 32 (Figura 40) s'exposa a continuació. A la placa hexaèdrica, situada a l'extrem del capçal excitador, es produeix un moviment accentuat de balancí. Aquest moviment és degut a què les guies tenen joc amb els suports, un factor que es considera no lineal, i com que per a l'anàlisi modal experimental s'ha assumit la hipòtesi de que

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

el sistema és lineal i el model d'elements finits no considera les "no linealitats", només s'han inclòs els punts del pòrtic que representaren moviments lineals. Així i tot, a les figures 54 (axial), 55 (de torsió), 56 (lateral) i 57 (vertical) es mostra el model experimental del pòrtic amb l'extrem del capçal excitador. S'observa com fins i tot en els modes axial (Figura 54) i lateral (Figura 56), els punts 31 i 32 presenten un desfasament de 180° respecte de la resta dels punts del pòrtic.

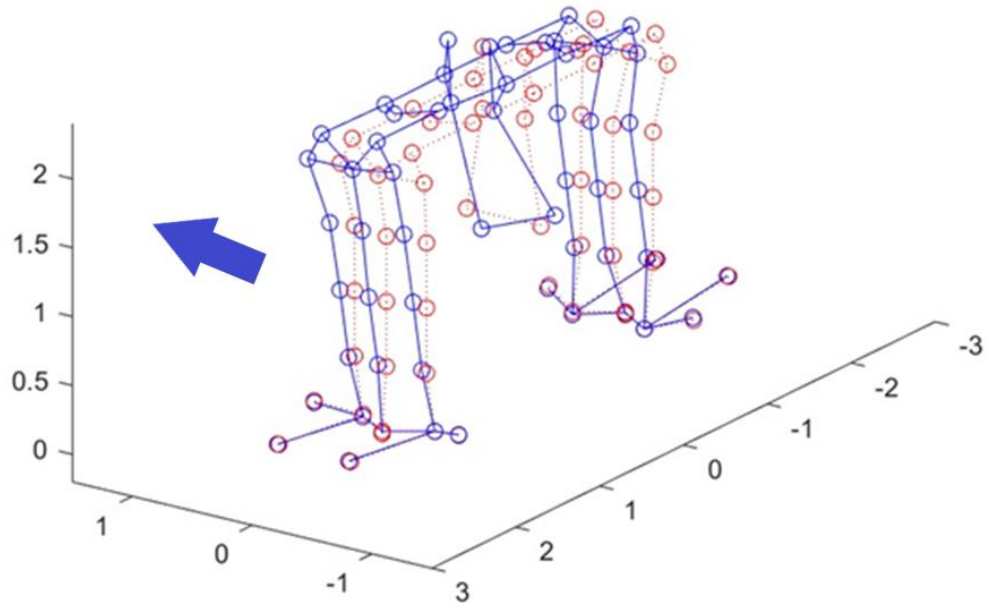


Figura 54: Captura de l'animació del mode axial experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.

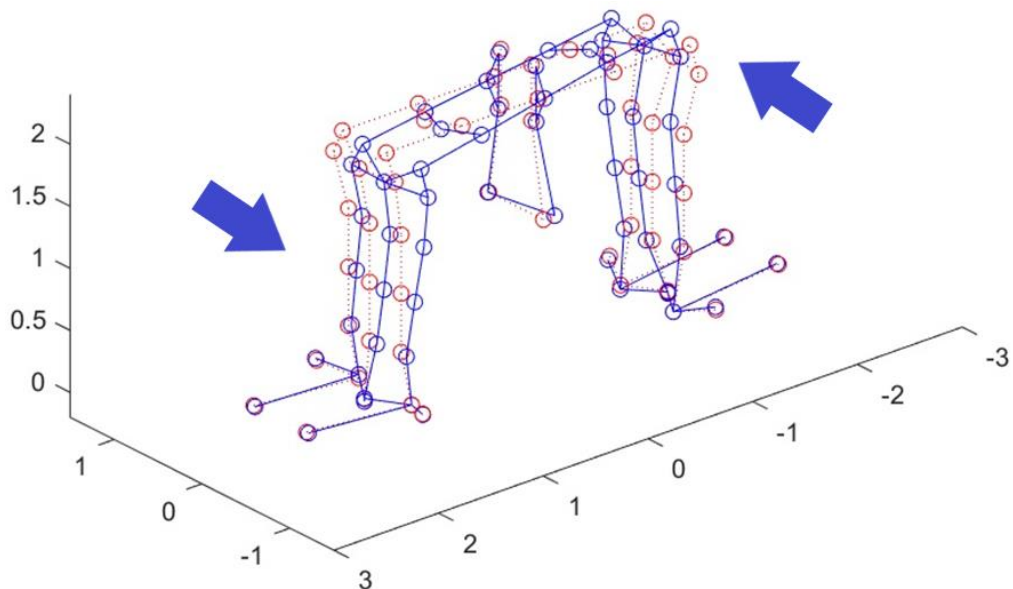


Figura 55: Captura de l'animació del mode de torsió experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

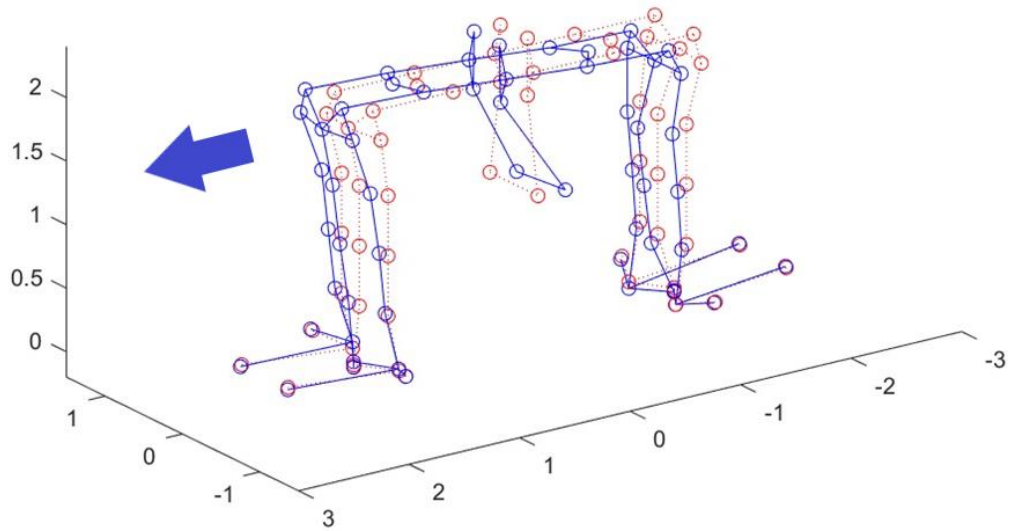


Figura 56: Captura de l'animació del mode lateral experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.

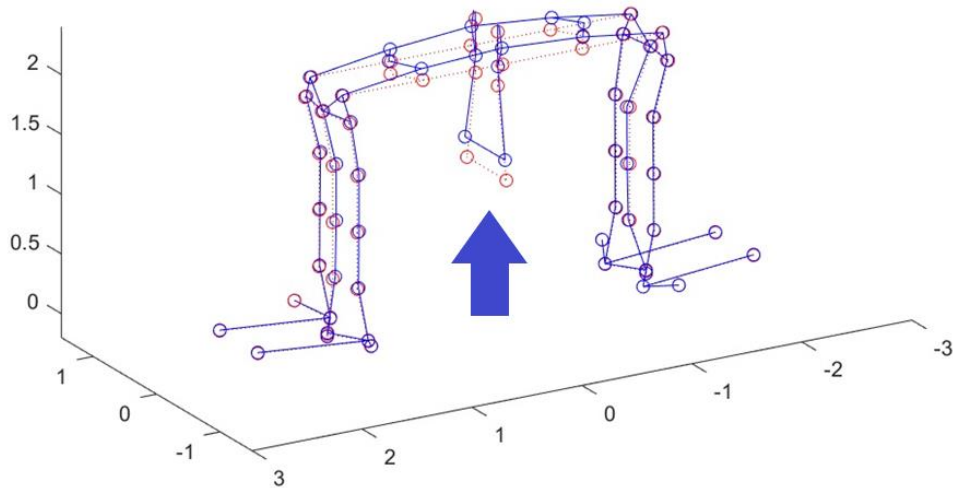


Figura 57: Captura de l'animació del mode vertical experimental amb l'extrem del capçal. Font: Elaboració pròpia.

4. Comparació entre el model d'EF i l'experimental

Per tal de validar el nou model d'elements finits, es compararan els resultats d'aquest amb els resultats del model experimental, obtingut a partir de mesurar en els 58 punts.

MODES	Elements finits	Experimental	Error
Axial (Hz)	17,05	14,60	17%
De torsió (Hz)	24,69	19,20	29%
Lateral (Hz)	33,67	30,80	10%
Vertical (Hz)	60,67	56,80	7%

Taula 14: Comparació entre els nous resultats obtinguts del pòrtic modificat, amb el percentatge d'error. Font: Elaboració pròpia.

A la Taula 14 es pot observar que el model d'elements finits és més rígid que el model experimental, ja que les freqüències naturals d'aquest últim són menors que les del model d'elements finits. Aquest fet és degut a diversos factors. Les unions entre barres al model d'elements finits (bigues amb columnes, bigues amb altres bigues, plaques amb bigues, etc) s'han modelat amb una unió convencional sense tenir en compte que entre barres es poden produir xicotets desplaçaments relatius. Tenint en compte que la freqüència natural d'un cos augmenta si la rigidesa és elevada i disminueix si ho és la massa, d'una banda es pot afirmar que aquest lleuger augment de freqüència és degut probablement a què la part del pòrtic que experimenta aquest mode de manera més notable, la biga, no inclou la massa real de la mateixa, ja que aquesta és també la part del pòrtic que més caragols de tota mena conté i per tant, és una aportació de massa important que no s'ha considerat de cap manera al model d'elements finits. D'altra banda, el fet d'haver augmentat la mida i nombre de les plaques, influeix notablement en l'augment de rigidesa perquè a banda de la que aporten les mateixes plaques geomètricament, la manera amb la qual s'han definit les unions entre elles i a la biga, concretament els caragols destinats a aquest fi, no considera cap aportació de massa al banc. La raó per la qual no s'ha inclòs la massa dels caragols és per l'enorme complexitat a nivell de geometria i per l'excessiu temps de modelatge que suposaria fer-ho.

Després de comparar els resultats, l'error percentual dels modes axial i de torsió és del 17% i del 29% respectivament, mentre que per als modes lateral i vertical és del 10% i del 7%. Si comparem estos mateixos resultats amb els del TFM realitzat per Juan Ramón Roca (Taula 15) es veu com l'error ha disminuït per als modes axial i de torsió, tot i que continua sent elevat. Pel que fa als modes lateral i vertical, s'observa que els errors han augmentat, però mantenen uns valors acceptables.

MODES	Elements finits	Experimental	Error respecte a l'experimental
AXIAL (Hz)	18,08	14,75	23%
DE TORSIÓ (Hz)	25,49	19,50	31%
LATERAL (Hz)	34,79	32,00	9%
VERTICAL (Hz)	59,43	57,25	4%

Taula 15: Error percentual en modes experimental i MEF. Font: TFM Juan Ramón Roca.

5. Proposta d'enrigitment del banc

El banc d'assajos actual està dissenyat per a treballar a freqüències de fins a 25 Hz. Tal com estan les freqüències naturals actualment, especialment la del mode vertical, si s'excitara el banc a freqüències molt més grans aquest podria entrar en ressonància. Seguidament s'argumenta com solucionar aquest problema per a cada mode de vibració.

5.1. Modes axial i de torsió

Com que el capçal excitador produeix un moviment vertical, els modes axial i de torsió no es produiran baix la seua acció. Tampoc es produirien en cas d'existir un accionament que generara un moviment lateral. Per tant, aquests dos modes no és necessari considerar-los a l'hora de dissenyar un banc més rígid.

5.2. Mode lateral

Com s'ha explicat en un altre apartat, s'està planejant incorporar un sistema de desplaçament lateral al banc. Però el mode de vibració associat a aquest moviment no és probable que entre en ressonància pel motiu que s'exposa a continuació. En un apartat anterior, s'ha vist que la catenària no s'instal·la sobre les vies de manera completament recta i paral·lela a les mateixes, sinó que segueix un recorregut en ziga-zaga amb la finalitat de provocar un desgast uniforme al material del fregador del pantògraf. Com més pròxims estiguen els pals que subjecten la catenària, més ràpid es desgastarà el fregador del pantògraf, ja que el moviment lateral del cable serà més ràpid i passarà més vegades per un mateix punt del fregador. Tot seguit es planteja un exemple per a demostrar tot allò exposat en aquest paràgraf.

Suposant que un tren es desplaça a 300 km/h per una línia de ferrocarril on els pals que subjecten la catenària estan separats 50 metres (Figura 58), es calcularà la freqüència amb què el moviment lateral del fil de contacte sobre el fregador del pantògraf passa per un mateix punt. Sabent que la freqüència es mesura en Hz, que són s^{-1} , caldrà dividir la velocitat en m/s entre la longitud de l'ona triangular (100 metres). Com a resultat s'obtenen 0,833 Hz.

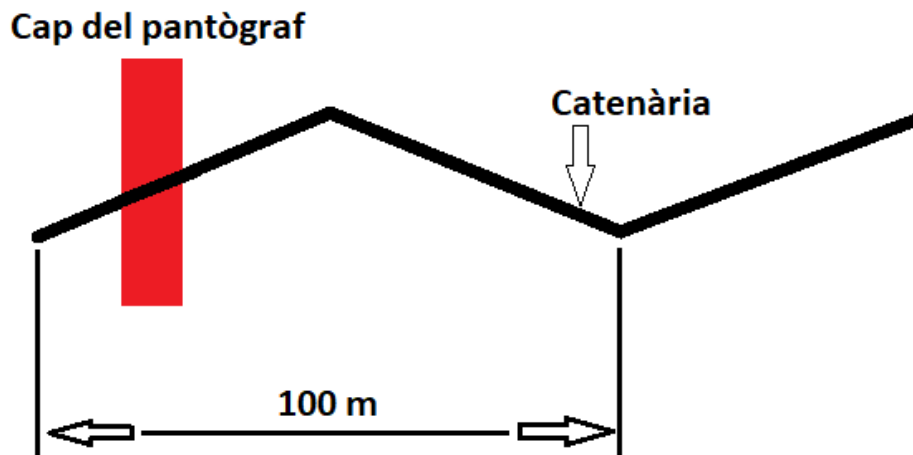


Figura 58: Esquema del recorregut del cap del pantògraf sobre la catenària. Font: Elaboració pròpia.

La freqüència natural obtinguda tant pel mètode dels elements finits com de manera experimental se situa al voltant dels 32 Hz. Tenint en compte que a l'exemple anterior s'ha considerat una distància molt desfavorable entre pals, de 50 metres, es pot concloure que els 0,833 Hz estan suficientment lluny dels 30,8 Hz als quals es produiria la ressonància, i que per tant, no seria necessari un enrigidiment específic per a aquest moviment.

5.3. Mode vertical

El principal moviment que realitza el pantògraf per l'acció de la catenària és el vertical, que es representa als assajos amb l'excitador lineal, de manera que si en un futur es vol treballar amb el banc a majors freqüències d'excitació, és molt probable que hi haja ressonància. Per tant, l'enrigidiment se centrarà en aquest moviment. De nou s'utilitzarà el programari ANSYS mechanical APDL product Launcher. La proposta d'enrigidiment consisteix a augmentar el cantell de la biga per mitjà d'una estructura similar a una encavallada, juntament amb quatre riostes que unisquen els pilars amb la biga (Figura 59). La nova estructura utilitzaria el mateix perfil que les riostes que uneixen la base del pòrtic amb els pilars, el de 100 x 100 mm.

Per a verificar que el nou disseny aporta la suficient rigidesa, es procedeix a realitzar l'anàlisi modal. Com a resultat s'obté una freqüència natural per al mode vertical, de valor 78,16 Hz (Figura 60). Aquest valor és acceptablement major que el del banc sense les riostes (60,67 Hz) tot i que no aconsegueix superar els 100 Hz, que era l'objectiu. Per tant, es pot concloure que el nou disseny és acceptable per a treballar a majors freqüències naturals, allunyant la possibilitat que es produïska ressonància.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

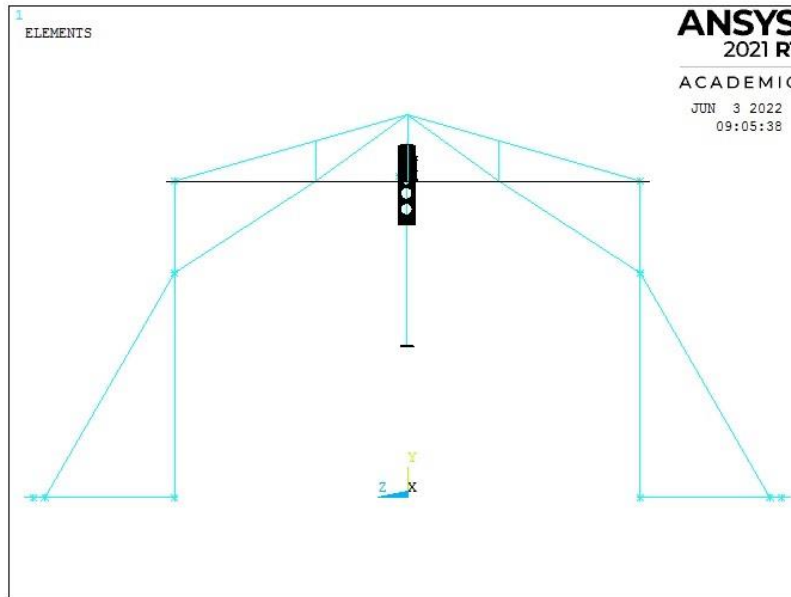


Figura 59: Vista frontal del nou disseny del pòrtic. Font: Elaboració pròpia.



Figura 60: Captura del mode vertical en el nou disseny. Font: Elaboració pròpia.

6. Conclusions

A la vista dels resultats, aquests no han variat significativament si es comparen amb els del TFM de Juan Ramón Roca. No obstant, les millores realitzades al model d'elements finits han sigut adequades ja que han permès afegir al model d'elements finits les parts del banc que abans no estaven modelades. A més, s'ha aconseguit reduir l'error percentual dels modes que més en tenien. Així, per al mode axial s'ha passat d'un error del 23% a un del 17%, i per al de torsió, d'un 31% a un 29%. I tot i que s'ha augmentat lleugerament el corresponent als modes lateral (d'un 9% a un 10%) i vertical (d'un 4% a un 7%), els resultats continuen sent acceptables.

Pel que fa al model experimental, el fet d'haver mesurat en més punts ha permès veure amb més detall el moviment associat a cada mode, ja que s'han pogut considerar els moviments relatius entre els perfils que formen els pilars. A més, comparant els resultats d'aquesta anàlisi amb els d'elements finits, mostra que són coherents entre ells. Per tant, el model d'elements finits ha quedat validat amb les mesures experimentals realitzades.

Les diferències entre els resultats del model d'elements finits i els de l'experimental es deuen d'una banda, principalment al fet de no haver modelat les unions caragolades, que hagueren augmentat la massa del sistema donat l'elevat nombre d'aquests elements. D'altra banda, les unions entre elements al model d'elements finits són més rígides que les reals pel fet de no considerar moviments relatius. Per tant, de cara a futurs assajos, seria recomanable collar tots els caragols que estiguen afluixats per a evitar que afecten a la rigidesa global del banc. Per la part dels resultats experimentals, el tipus d'assaig realitzat, pel nivell d'habilitat del qual requereix, dona lloc a què l'error introduït per l'operador tinga una influència significativa sobre aquests.

Quant a la proposta d'enrigitament del banc, es conclou que és acceptable. El principal moviment que calia considerar és el vertical, la freqüència natural del qual ha passat de 60,67 Hz a 78,16 Hz. Este nou valor de freqüència permetria treballar amb el banc amb una excitació que arribe fins als 50 Hz, ja que si se supera aquest valor, s'aproparia massa als 78,16 Hz. Tot i així, aquesta és una proposta inicial i caldria estudiar amb més deteniment distintes opcions per tal d'assolir una freqüència natural superior a 100 Hz per al mode vertical.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

7. Bibliografia

- BOE. (23 / 4 / 1997). Recollit de BOE: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-8671>
- BOE. (23 / 4 / 1997). Recollit de BOE: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669>
- BOE. (5 / 4 / 2001). Recollit de BOE: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-6697>
- fandom. (26 / 2 / 2019). Recollit de <https://locomotive.fandom.com/wiki/Pantograph>
- Li, H. (2021). *ScienceDirect*. Recollit de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X21006368>
- MERSEN. (27 / Juny / 2017). Recollit de <https://www.mersen.com/sites/default/files/publications-media/ptt-current-collection-technical-guide-mersen-en-1601.pdf>
- Navarro, I. L. (2017). *Riunet.upv*. Recollit de Riunet.upv: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89915/53761379Y_TFG_15047704091392411789793435312453.pdf?sequence=2
- Nåvik, P. R. (19 / 3 / 2016). *NTNU*. Recollit de <https://www.ntnu.edu/kt/research/dynamics/research/catenary-systems>
- Pixabay. (16 / 8 / 2017). Recollit de Pixabay: <https://pixabay.com/es/photos/pant%c3%b3grafo-locomotora-electrica-2647175/>
- Polimi. (1 / 5 / 2022). *polimi*. Recollit de polimi: <https://www.mecc.polimi.it/ricerca/laboratori-dipartimentali/railway-engineering/>
- Roca Castro, J. R. (4 / Abril / 2022). TFM: Análisis del comportamiento dinámico de un banco de ensayos HIL de pantógrafos con catenarias virtuales. *TFM: Análisis del comportamiento dinámico de un banco de ensayos HIL de pantógrafos con catenarias virtuales*.
- SIMPRO. (2020). Recollit de <https://simpro.it/en/2021/03/02/research-on-pantographs-in-the-university-of-huddersfield/>
- Tesis Doctorals en Xarxa*. (Setembre / 2004). Recollit de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf>
- Wu, J. (2017). *Pantograph and Contact Line System*. Academic Press.

Modelatge mitjançant elements finits i validació experimental d'un banc d'assajos HIL per a pantògrafs

8. Pressupost

En aquest apartat es calcula el pressupost total per a la realització del projecte, que ha tingut una duració de 3 mesos. Per al seu càlcul, s'han considerat les despeses necessàries per a l'ús de recursos i de temps.

A la taula següent es mostren els recursos utilitzats, així com les hores de treball.

Concepte	Quantitat	Cost per unitat	Cost total
Llicència de MatLAB	1	500,00 €	500,00 €
Llicència d'ANSYS APDL	1	6.500,00 €	6.500,00 €
Llicència d'Office365	3	7,00 €	21,00 €
Lenovo ThinkBook	1	521,75 €	521,75 €
Treball de l'enginyer	300	30,00 €	9.000,00 €
Total sense IVA	-	-	16.542,75 €
Total amb IVA (21%)	-	-	19.024,16 €

Seguidament, s'exposen els costos d'amortització.

Concepte	Vida útil (h)	Ús (h)	Preu	Amortització	Cost total
Acceleròmetre	1500	80	750,78 €	18,75%	140,77 €
Martell instrumentat	1000	80	839,34 €	12,50%	104,92 €
Sistema d'adquisició	2500	80	668,42 €	31,25%	208,88 €
Total	-	-	-	-	454,57 €

Els costos indirectes són els següents.

Concepte	Cost mensual	Mesos	Cost total
Electricitat	170,00 €	3	510,00 €
Internet	25,00 €	3	75,00 €
Total	-	-	585,00 €

Finalment, es mostra el pressupost final.

Tipus de costos	Cost
Equipament i mà d'obra	19.024,16 €
Amortització	454,57 €
Indirectes	585,00 €
TOTAL	20.063,73 €

El pressupost del projecte ascendeix a un total de **VINT MIL SEIXANTA-TRES EUROS AMB SETANTA-TRES CÈNTIMS.**

9. Plec de condicions

En aquest apartat s'exposen els requisits necessaris per a la realització de treball de fi de grau.

9.1. Normativa

La normativa que s'han tingut en compte durant la realització del treball és la següent:

- Reial Decret 488/1997 del 14 d'abril sobre disposicions mínimes de seguretat i salut relatives al treball amb equips que inclouen pantalles de visualització.
- Disposicions mínimes de salut i seguretat als llocs de treball establertes al Reial Decret 486/1997, del 14 d'abril.
- Reial Decret 309/2001 del 23 de març, pel qual es modifica el Reial Decret 1879/1996, del 2 d'agost, sobre composició de la Comisió Nacional de Seguretat i Salut al treball.

9.2. Llicències

El maquinari utilitzat requereix unes llicències que s'exposen a continuació:

- Llicència D'ANSYS APDL.
- Llicència de MatLAB.
- Llicència d'Office365.

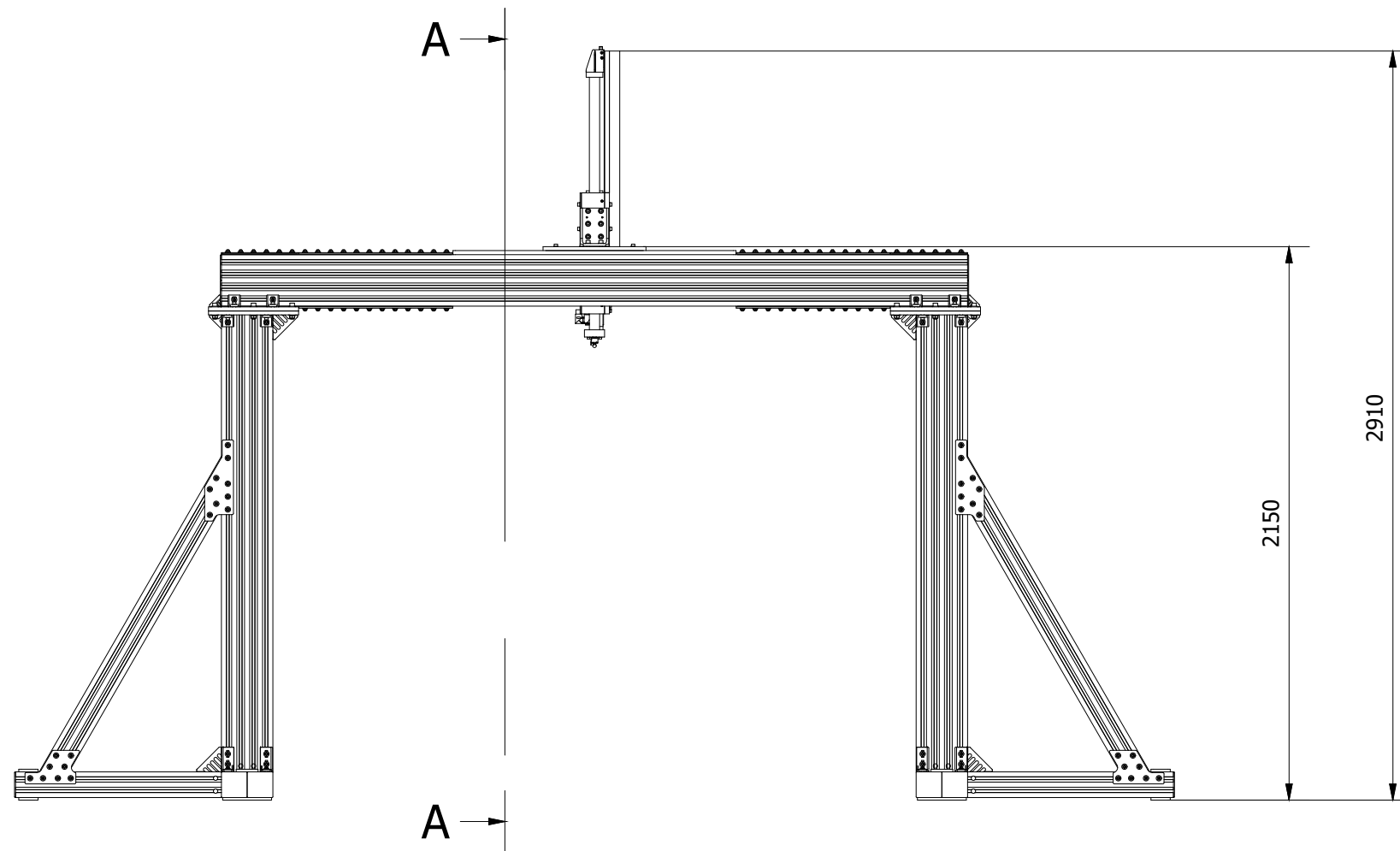
9.3. Coneixements necessaris

Per a la realització del projecte són necessaris els següents coneixements:

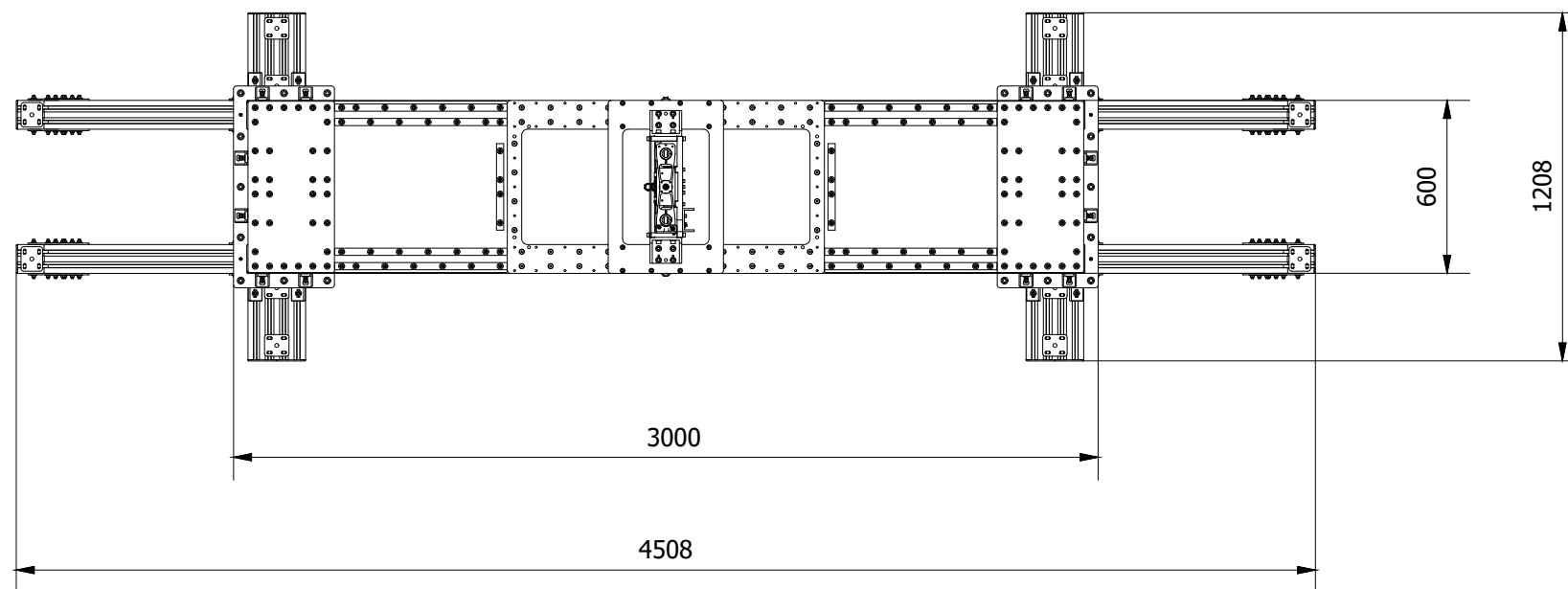
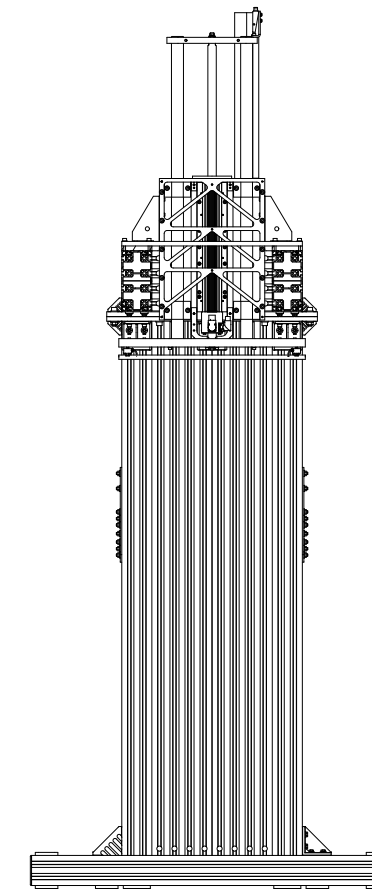
- Coneixements sobre ANSYS APDL i el mètode d'elements finits.
- Coneixements sobre Office365.
- Coneixements sobre vibracions mecàniques i el seu tractament digital.

10. Annexos

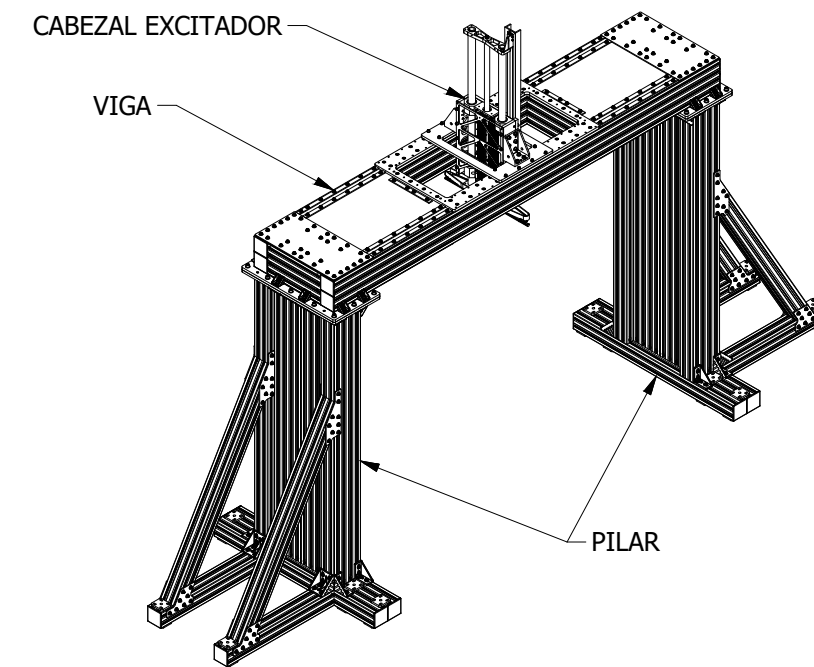
ANNEX 1: Plànol banc d'assajos HIL.



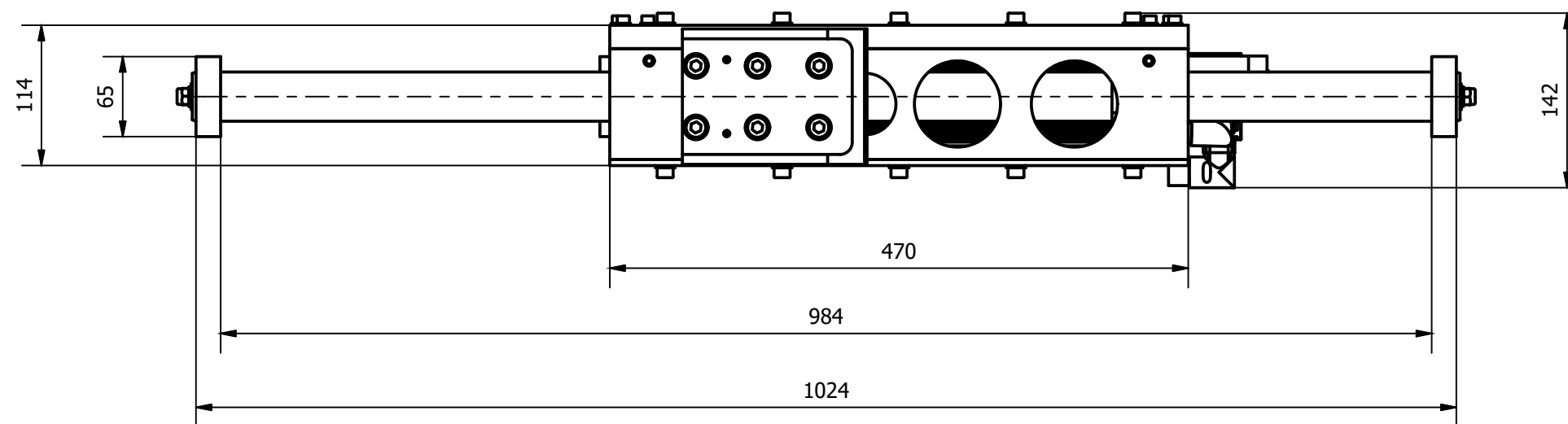
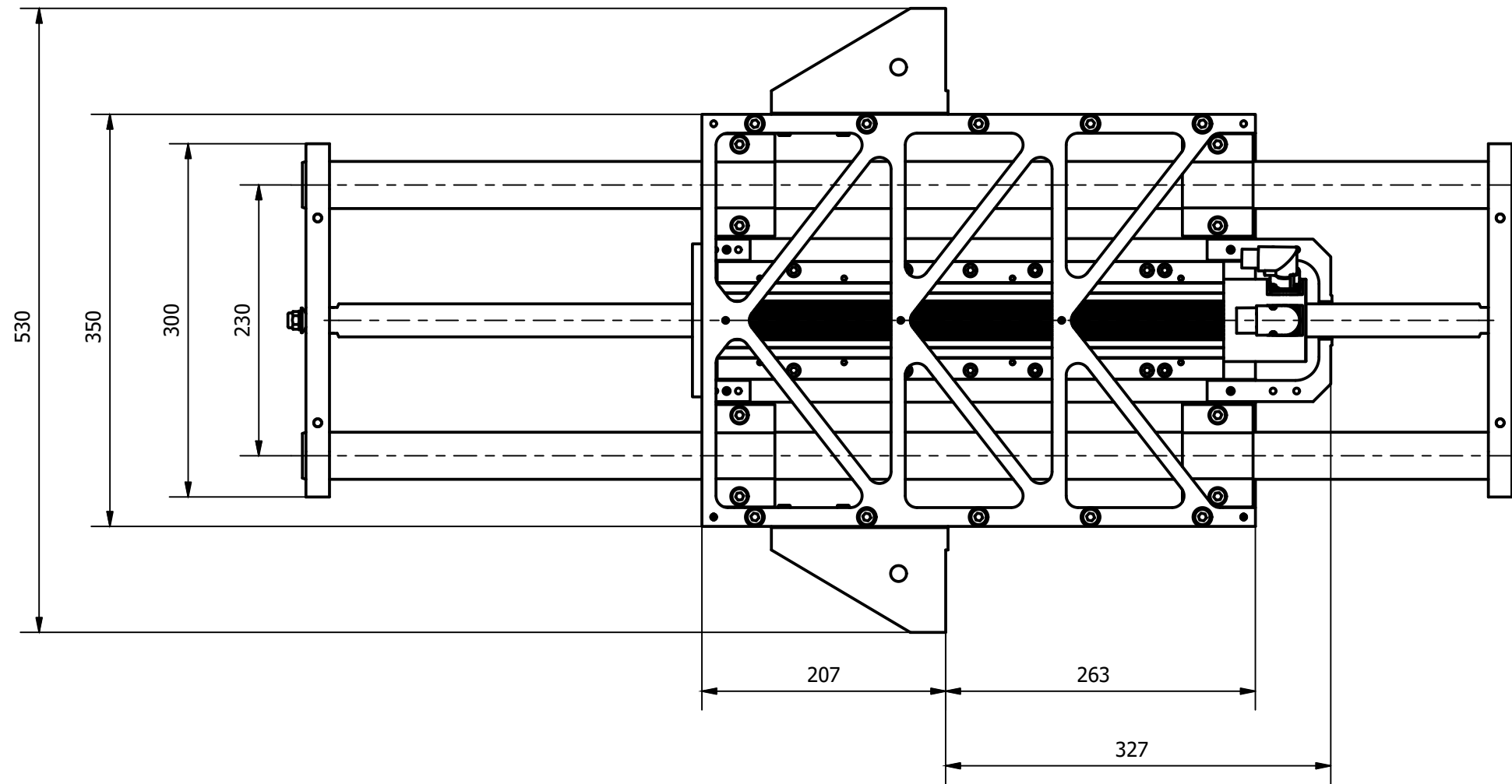
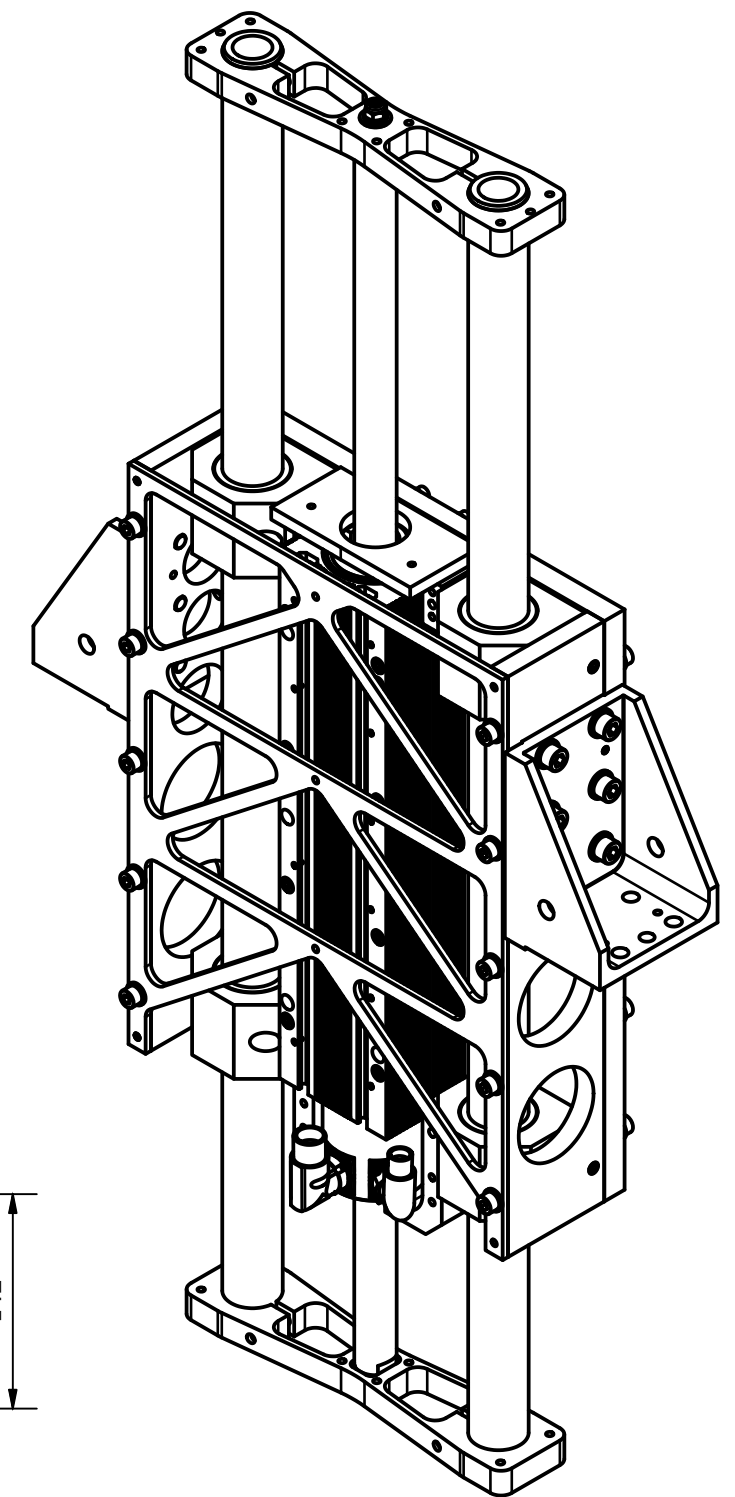
A-A (1 : 25)



VISTA ISOMÉTRICA (1 : 40)



VISTA ISOMÉTRICA



ANNEX 2: Fitxa tècnica de
l'excitador vertical LinMot P10
70x400U/450-BL-QJ.

LINEAR MOTORS P10-70x400U



- ✓ 3 x 400VAC Technology
- ✓ Peak forces up to 2720 N
- ✓ Extremely high dynamic
- ✓ Separate connector for sensor and power cable
- ✓ Can also be controlled by standard third-party servo drives

LINEAR MOTORS P10-70x400U

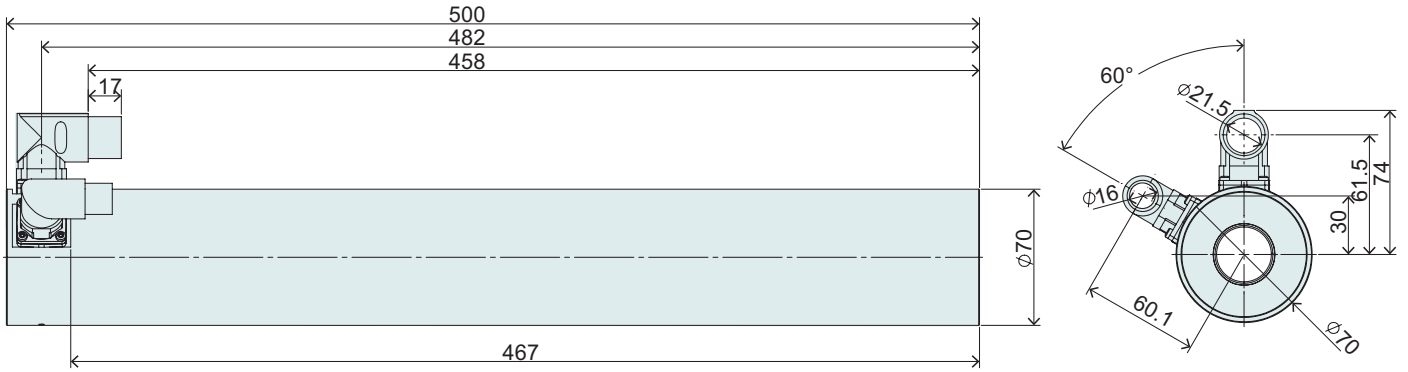
Technical Data	597
Motor Specifications	
P10-70x400U/50	602
P10-70x400U/150	603
P10-70x400U/250	604
P10-70x400U/350	605
P10-70x400U/450	606
P10-70x400U/650	607
P10-70x400U/850	608
P10-70x400U/1050	609
P10-70x400U/1250	610
P10-70x400U/1450	611
Linear Guides	612
Accessories	614



MOTOR FAMILY P10-70x400U

Technical Data			
Stroke			
Max. Stroke (ES)	mm (in)		1450 (57.1)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)		2150 (483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)		2720 (611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)		320 / 500 / 890 (73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})		80 (18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})		113 (25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)		2.2 (89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)		3.9 (159.9)
Position Detection			
Position Resolution	mm (in)		0.005 (0.0002)
Repeatability	mm (in)		±0.05 (±0.002)
Position Resolution with ES	mm (in)		0.001 (0.00004)
Repeatability with ES	mm (in)		±0.01 (±0.0004)
Linearity with ES	mm (in)		±0.01 (±0.0004)
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9
Back EMF Constant	V _{pk} / (m/s) (V _{pk} / (in/s))		92.4 (2.35)
Terminal Resistance 25 °C / 120 °C	Ohm		6.9 / 9.5
Terminal Inductivity	mH		13
Magnetic Period	mm (in)		40 (1.57)
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100
Mechanical Data			
Stator Diameter	mm (in)		70 (2.8)
Stator Length	mm (in)		500 (20)
Stator Mass	g (lb)		8250 (18.15)
Slider Diameter	mm (in)		28 (1.1)
Slider Length	mm (in)		590 - 1990 (23 - 78)
Slider Mass	g (lb)		2770 - 9350 (6.09 - 20.57)
IP Code			IP 65
Certification			
UL	File-No.		E354430

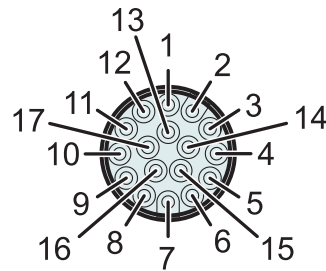
STATOR



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712

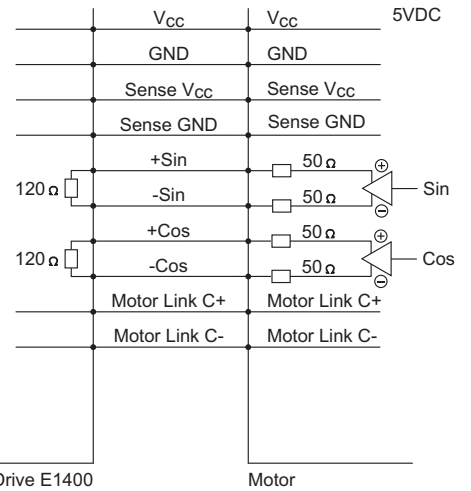
CONNECTOR PS10-70x400U-BL-QJ

Motor Connector Wiring	Connector Encoder J	Wire Color Motor Cable	
+5 VDC	Supply	1	red
GND	Supply	2	black
Sense +5V	Supply Sense	3	white
Sense GND	Supply Sense	4	brown
Mot. Link C+	Communication	5	pink
Mot. Link C-	Communication	6	grey
Sin+	Encoder	7	yellow
Sin-	Encoder	8	orange
Cos+	Encoder	9	green
Cos-	Encoder	10	blue
n. c.	n. c.	11	n. c.
n. c.	n. c.	12	n. c.
n. c.	n. c.	13	n. c.
n. c.	n. c.	14	n. c.
n. c.	n. c.	15	n. c.
n. c.	n. c.	16	n. c.
n. c.	n. c.	17	n. c.



Connector Encoder J

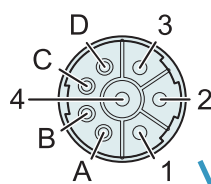
View: Motor connector, plug side



LinMot Drive E1400

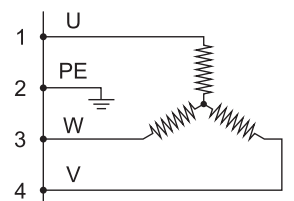
Motor

Motor Connector Wiring	Connector Power Q	Wire Color Motor Cable
Phase U	1	red
PE	2	yellow-green
Phase W	3	green
Phase V	4	blue
n. c.	A	n. c.
n. c.	B	n. c.
n. c.	C	n. c.
n. c.	D	n. c.

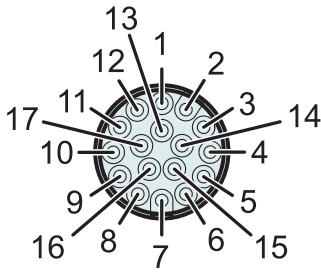


Connector Power Q

View: Motor connector, plug side



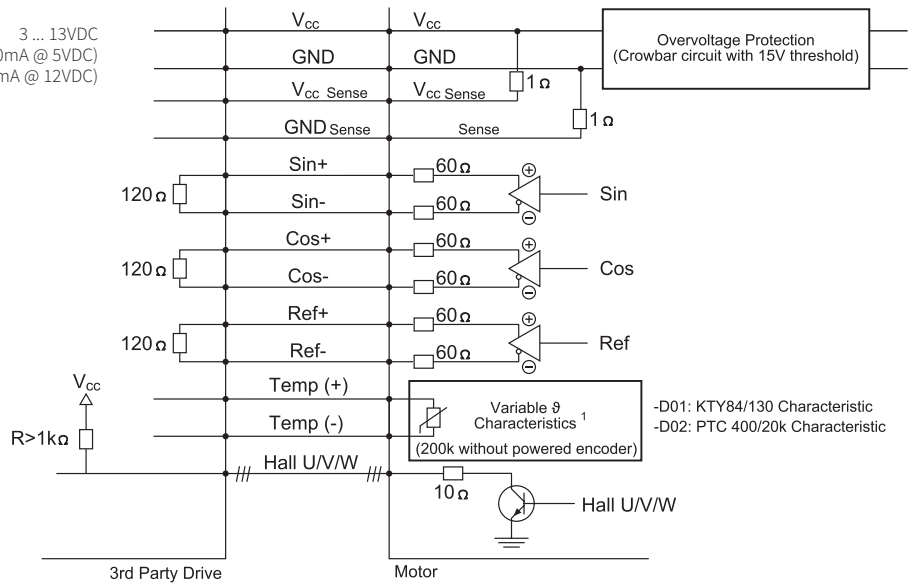
CONNECTOR PS10-70x400U-BL-QJ-D01/02



Connector Encoder J

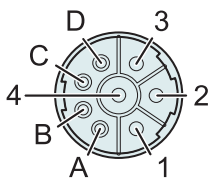
View: Motor connector, plug side

3 ... 13VDC
(I_{max} < 150mA @ 5VDC)
(I_{max} < 80mA @ 12VDC)



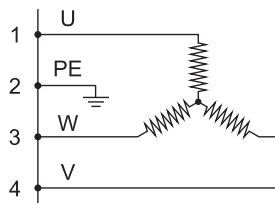
Motor Connector Wiring				
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Function	Connector Encoder J	Wire Color Motor Cable
3 ... 13 VDC	3 ... 13 VDC	Supply	1	white
GND	GND	Supply	2	brown
Vcc Sense (optional)	Vcc Sense (optional)	Supply Sense	3	green
GND Sense (optional)	GND Sense (optional)	Supply Sense	4	yellow
Do not connect	Do not connect	-	5	-
Do not connect	Do not connect	-	6	-
Sin+	Sin+	Encoder 1 Vpp	7	grey
Sin-	Sin-	Encoder 1 Vpp	8	pink
Cos+	Cos+	Encoder 1 Vpp	9	blue
Cos-	Cos-	Encoder 1 Vpp	10	red
Ref+	Ref+	Encoder 1 Vpp	11	black
Ref-	Ref-	Encoder 1 Vpp	12	violett
Hall U	Hall U	Encoder (open collector)	13	grey-red
Hall V	Hall V	Encoder (open collector)	14	red-blue
Hall W	Hall W	Encoder (open collector)	15	white-green
Temp+ (KTY84/130 Char.)	Temp+ (PTC 400/20k Char.)	Temperature ¹	16	yellow-brown
Temp- (KTY84/130 Char.)	Temp- (PTC 400/20k Char.)	Temperature ¹	17	white-yellow

1) The temperature evaluation circuit must be powered from the encoder supply and must be at the same potential. The grounds of the temperature evaluation circuit and the encoder have to be connected. The encoder must have been powered on for at least 50 ms, before valid temperatures can be measured. If the encoder is powered off, 200k Ohms are measured between Pins 16 and 17. The maximum voltage between Pin 16 and 17 must not exceed 16 VDC. The maximum current must not exceed 15 mA.



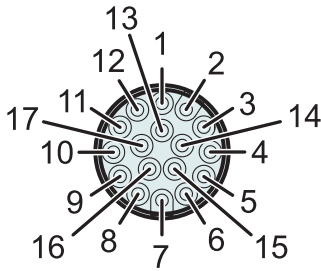
Connector Power Q

View: Motor connector, plug side



Mmotor Steckerbelegung			
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Wire Color Motor Cable	Connector Power Q
Phase U	Phase U	red	1
PE	PE	yellow-green	2
Phase W	Phase W	green	3
Phase V	Phase V	blue	4
n. c.	n. c.	n. c.	A
n. c.	n. c.	n. c.	B
n. c.	n. c.	n. c.	C
n. c.	n. c.	n. c.	D

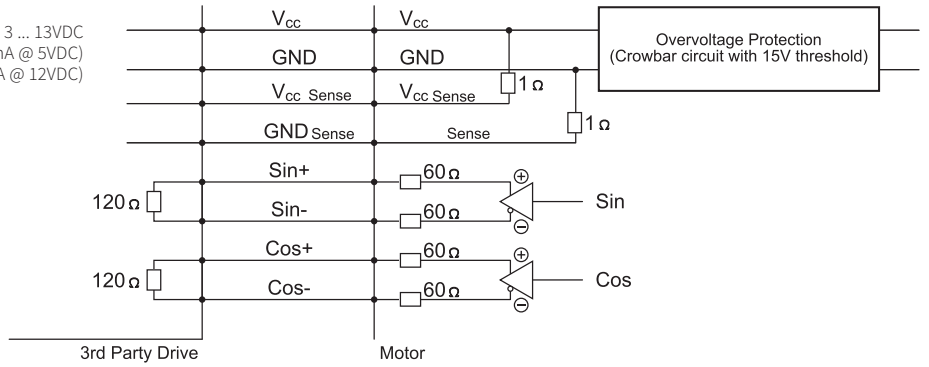
CONNECTOR PS10-70x400U-BL-QJ-D03



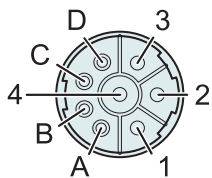
Connector Encoder J

View: Motor connector, plug side

3 ... 13VDC
($I_{max} < 150\text{mA}$ @ 5VDC)
($I_{max} < 80\text{mA}$ @ 12VDC)

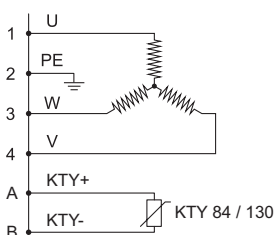


Motor Connector Wiring		Wire Color Motor Cable	Connector Encoder J
3 ... 13VDC	Supply	red	1
GND	Supply	black	2
Vcc Sense (optional)	Supply Sense	white	3
GND Sense (optional)	Supply Sense	brown	4
Do not connect	-	-	5
Do not connect	-	-	6
Sin+	Encoder 1 Vpp	yellow	7
Sin-	Encoder 1 Vpp	orange	8
Cos+	Encoder 1 Vpp	green	9
Cos-	Encoder 1 Vpp	blue	10
n. c.	-	n. c.	11
n. c.	-	n. c.	12
n. c.	-	n. c.	13
Do not connect	-	n. c.	14
n. c.	-	n. c.	15
n. c.	-	n. c.	16
n. c.	-	n. c.	17



Connector Power Q

View: Motor connector, plug side

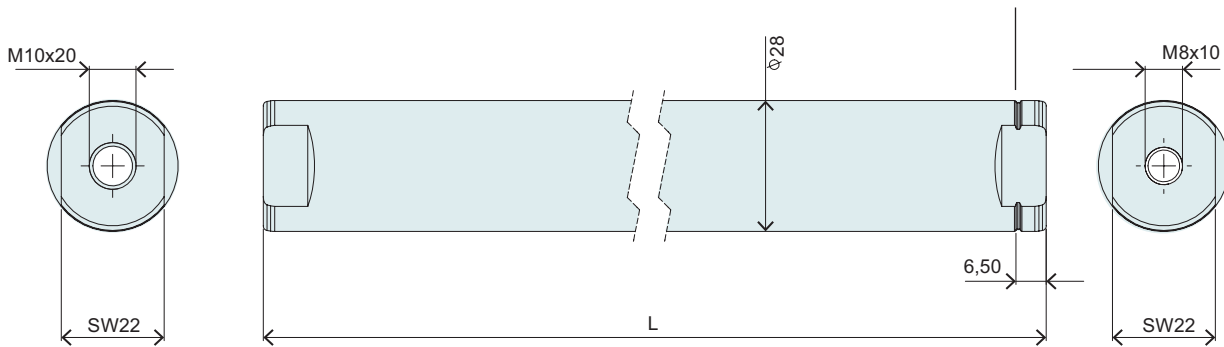


Motor Connector Wiring	Connector Power Q	Wire Color Motor Cable
Phase U	1	red (previously: black 1)
PE	2	yellow-green
Phase W	3	green (previously: black 3)
Phase V	4	blue (previously: black 2)
KTY +	A	purple (previously: black 5)
KTY -	B	grey (previously: black 6)
n. c.	C	yellow (previously: black 7)
n. c.	D	brown (previously: black 8)

SLIDER

Slider Standard

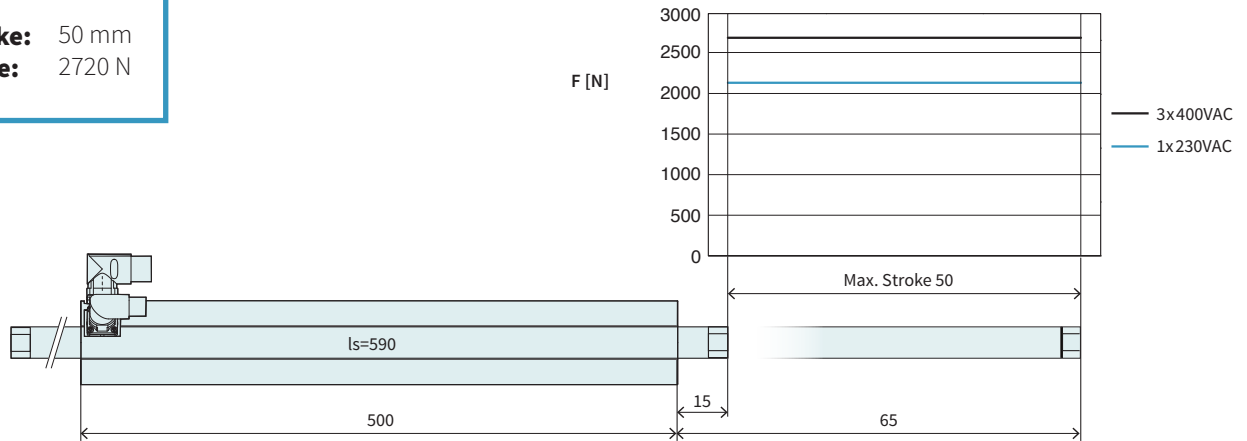
Number of grooves determines the slider type (see chapter 2 / slider) and marks the front end.



Slider Standard			
Item	Description	Max. Stroke [mm]	Item-No.
PL10-28x590/540	Slider for P10-70 'standard'	50	0150-2196
PL10-28x690/640	Slider for P10-70 'standard'	150	0150-2197
PL10-28x790/740	Slider for P10-70 'standard'	250	0150-2198
PL10-28x890/840	Slider for P10-70 'standard'	350	0150-2199
PL10-28x990/940	Slider for P10-70 'standard'	450	0150-2203
PL10-28x1190/1140	Slider for P10-70 'standard'	650	0150-2204
PL10-28x1390/1340	Slider for P10-70 'standard'	850	0150-2205
PL10-28x1590/1540	Slider for P10-70 'standard'	1050	0150-2206
PL10-28x1790/1740	Slider for P10-70 'standard'	1250	0150-2207
PL10-28x1990/1940	Slider for P10-70 'standard'	1450	0150-2208

P10-70x400U/50-BL-QJ

Max. Stroke: 50 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

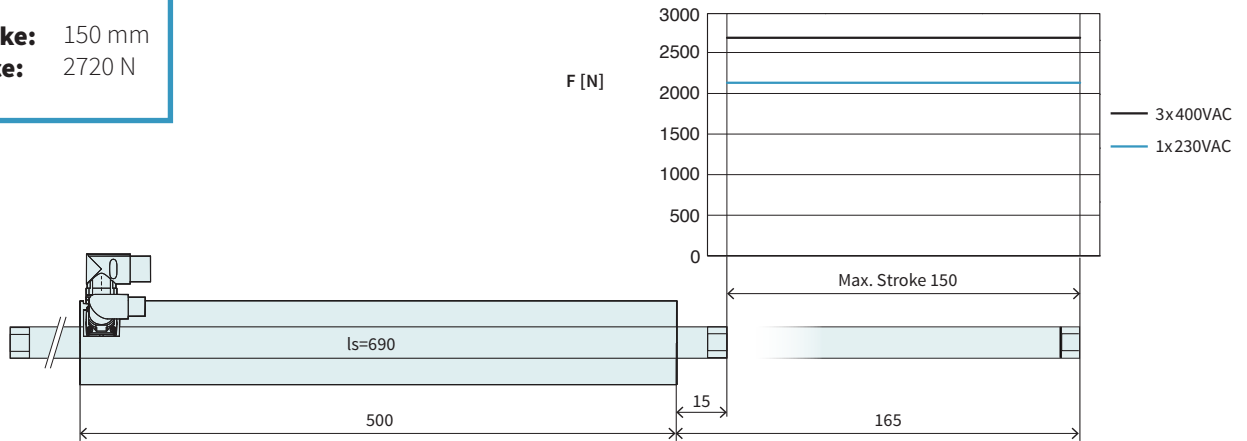
Technical Data P10-70x400U/50			
Stroke			
Max. Stroke	mm (in)	50	(1.96)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%	100	
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm (in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%	± 1.1	
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}	26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}	33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}	4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}	2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C	90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W	0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s	2100 / 500 / 100	
Mechanical Data			
Slider Length	mm (in)	590	(23)
Slider Mass	g (lb)	2770	(6.09)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x590/540	Slider for P10-70 'standard'	0150-2196

P10-70x400U/150-BL-QJ

Max. Stroke: 150 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

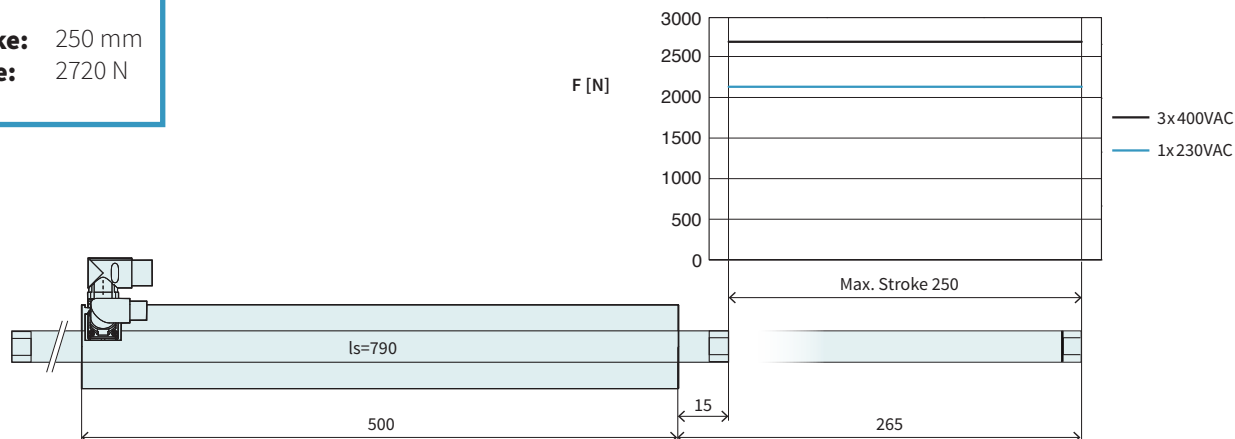
Technical Data P10-70x400U/150				
Stroke				
Max. Stroke	mm	(in)	150	(5.91)
Force				
Max. Force @ 1x230VAC	N	(lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N	(lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N	(lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100	
Force Constant 1	N/A _{pk}	(lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms}	(lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity				
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s	(in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s	(in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection				
Repeatability	mm	(in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%		±0.45	
Electrical Data				
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data				
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100	
Mechanical Data				
Slider Length	mm	(in)	690	(27)
Slider Mass	g	(lb)	3240	(7.13)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x690/640	Slider for P10-70 'standard'	0150-2197

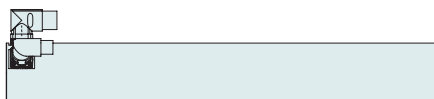
P10-70x400U/250-BL-QJ

Max. Stroke: 250 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

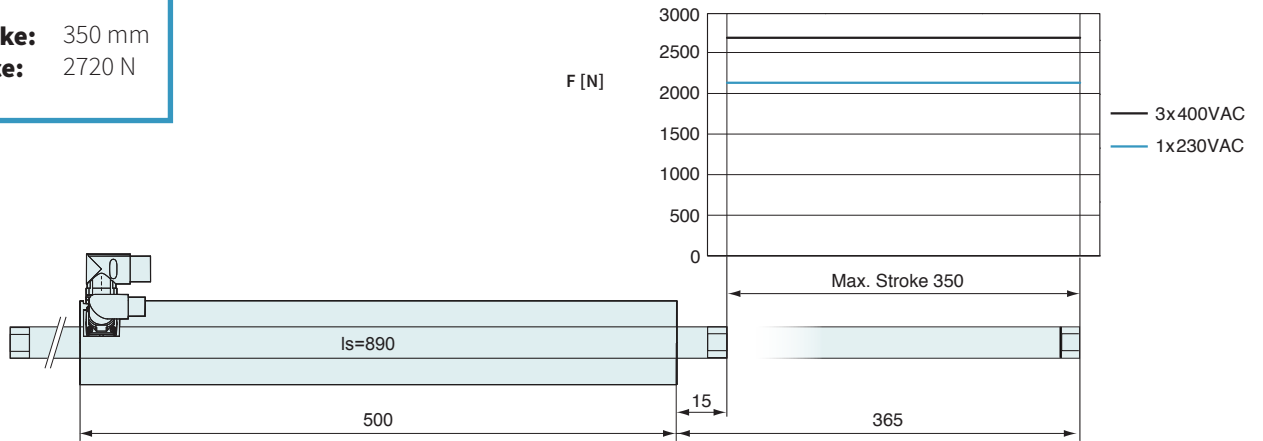
Technical Data P10-70x400U/250				
Stroke				
Max. Stroke	mm	(in)	250	(9.83)
Force				
Max. Force @ 1x230VAC	N	(lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N	(lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N	(lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100	
Force Constant 1	N/A _{pk}	(lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms}	(lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity				
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s	(in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s	(in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection				
Repeatability	mm	(in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%		± 0.3	
Electrical Data				
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data				
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100	
Mechanical Data				
Slider Length	mm	(in)	790	(31)
Slider Mass	g	(lb)	3710	(8.16)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x790/740	Slider for P10-70 'standard'	0150-2198

P10-70x400U/350-BL-QJ

Max. Stroke: 350 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

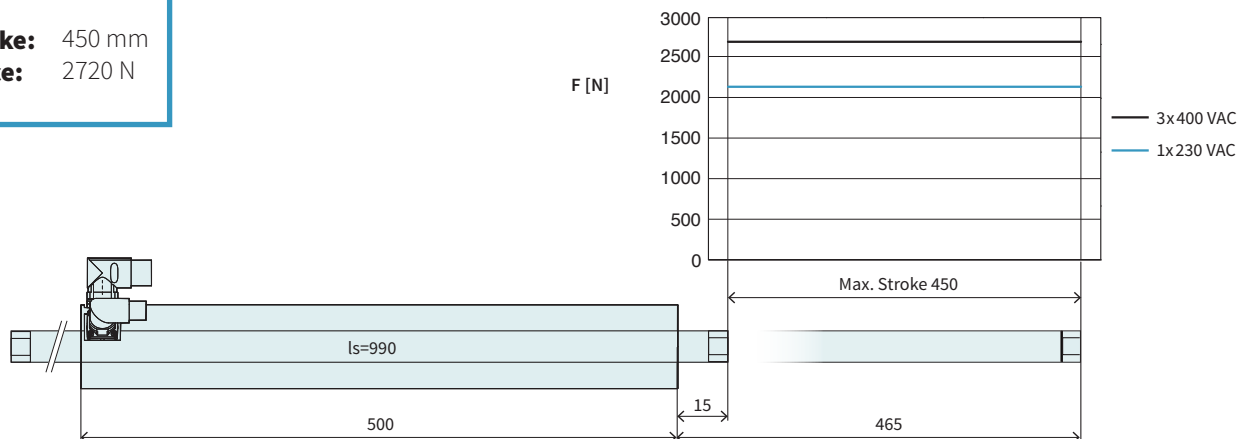
Technical Data P10-70x400U/350			
Stroke			
Max. Stroke	mm (in)		350 (13.8)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)		2150 (483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)		2720 (611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)		320 / 500 / 890 (73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})		80 (18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})		113 (25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)		2.2 (89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)		3.9 (3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm (in)		±0.05 (±0.002)
Linearity	%		± 0.25
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100
Mechanical Data			
Slider Length	mm (in)		890 (35)
Slider Mass	g (lb)		4180 (9.2)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x890/840	Slider for P10-70 'standard'	0150-2199

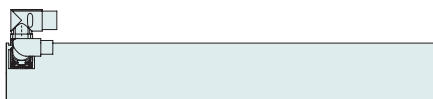
P10-70x400U/450-BL-QJ

Max. Stroke: 450 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

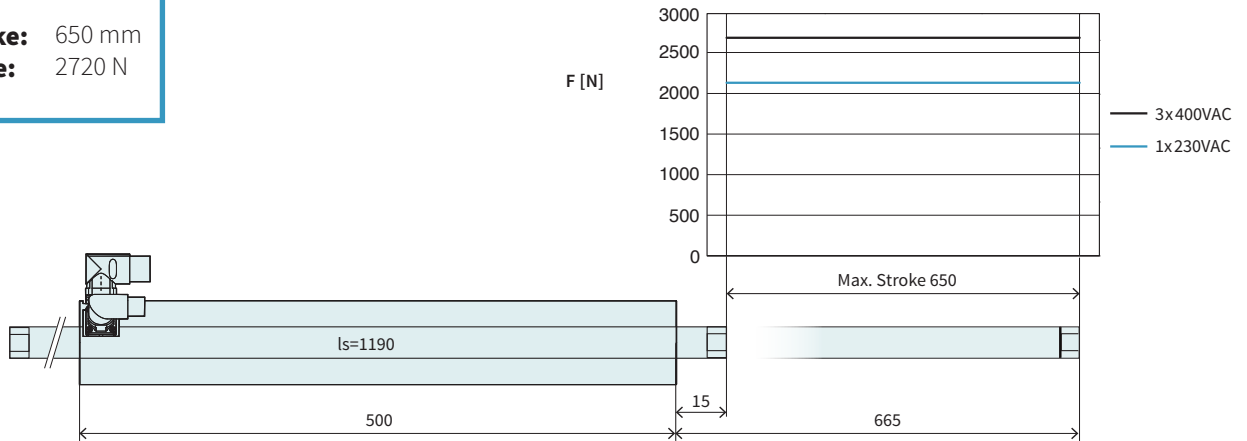
Technical Data P10-70x400U/450				
Stroke				
Max. Stroke	mm	(in)	450	(17.69)
Force				
Max. Force @ 1x230VAC	N	(lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N	(lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N	(lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100	
Force Constant 1	N/A _{pk}	(lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms}	(lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity				
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s	(in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s	(in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection				
Repeatability	mm	(in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%		± 0.2	
Electrical Data				
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data				
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100	
Mechanical Data				
Slider Length	mm	(in)	990	(39)
Slider Mass	g	(lb)	4650	(10.23)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x990/940	Slider for P10-70 'standard'	0150-2203

P10-70x400U/650-BL-QJ

Max. Stroke: 650 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

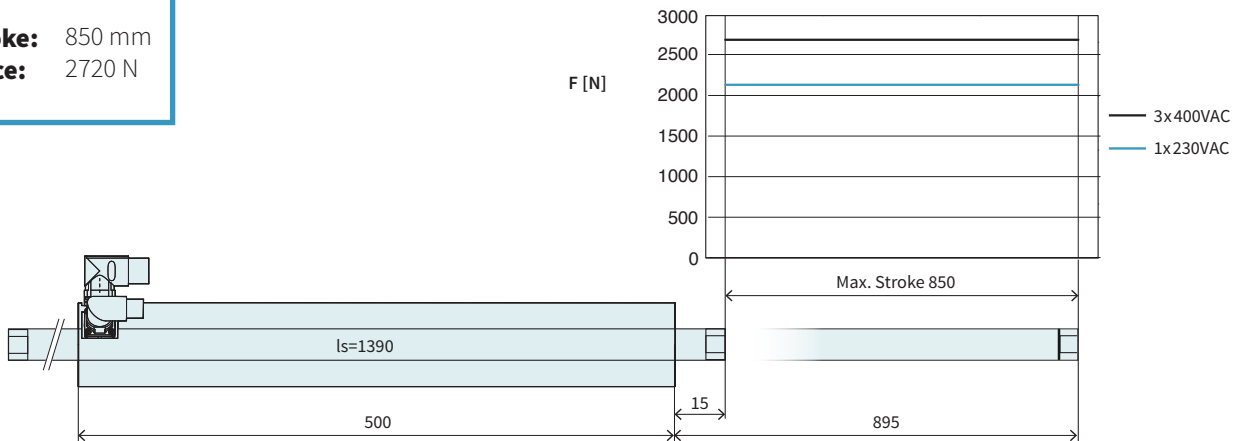
Technical Data P10-70x400U/650				
Stroke				
Max. Stroke	mm	(in)	650	(25.6)
Force				
Max. Force @ 1x230VAC	N	(lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N	(lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N	(lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100	
Force Constant 1	N/A _{pk}	(lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms}	(lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity				
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s	(in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s	(in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection				
Repeatability	mm	(in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%		± 0.2	
Electrical Data				
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data				
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100	
Mechanical Data				
Slider Length	mm	(in)	1190	(47)
Slider Mass	g	(lb)	5590	(12.3)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x1190/1140	Slider for P10-70 'standard'	0150-2204

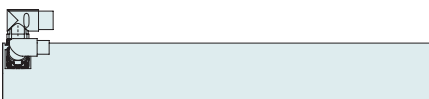
P10-70x400U/850-BL-QJ

Max. Stroke: 850 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

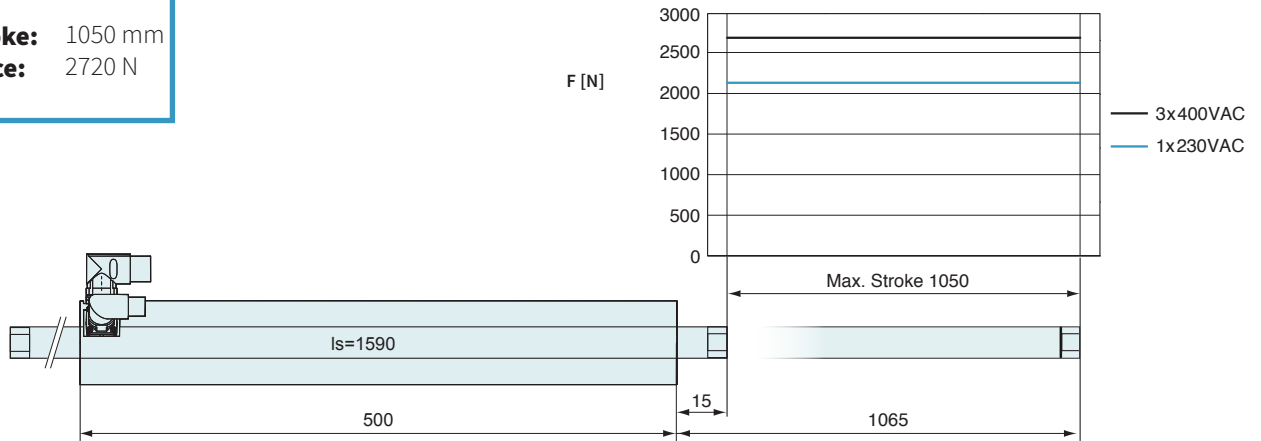
Technical Data P10-70x400U/850			
Stroke			
Max. Stroke	mm	(in)	850 (33.49)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N	(lbf)	2150 (483)
Max. Force @ 3x400VAC	N	(lbf)	2720 (611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N	(lbf)	320 / 500 / 890 (73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100
Force Constant 1	N/A_{pk}	(lbf/ A_{pk})	80 (18)
Force Constant 2	N/A_{rms}	(lbf/ A_{rms})	113 (25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s	(in/s)	2.2 (89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s	(in/s)	3.9 (3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm	(in)	±0.05 (±0.002)
Linearity	%		± 0.15
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A_{pk} / A_{rms}		26.8 / 18.9
Max. Current @ 3x400VAC	A_{pk} / A_{rms}		33.9 / 23.9
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A_{pk}		4 / 6.2 / 11
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A_{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100
Mechanical Data			
Slider Length	mm	(in)	1390 (55)
Slider Mass	g	(lb)	6530 (14.37)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x1390/1340	Slider for P10-70 'standard'	0150-2205

P10-70x400U/1050-BL-QJ

Max. Stroke: 1050 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

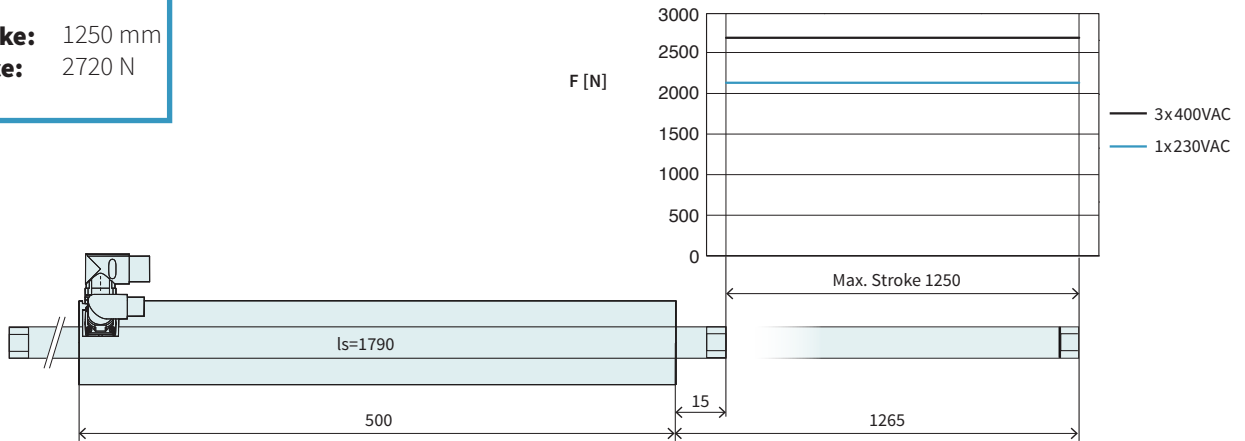
Technical Data P10-70x400U/1050			
Stroke			
Max. Stroke	mm (in)	1050	(41.29)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%	100	
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm (in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%	±0.15	
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}	26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}	33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}	4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}	2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C	90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W	0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s	2100 / 500 / 100	
Mechanical Data			
Slider Length	mm (in)	1590	(63)
Slider Mass	g (lb)	7470	(16.43)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x1590/1540	Slider for P10-70 'standard'	0150-2206

P10-70x400U/1250-BL-QJ

Max. Stroke: 1250 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

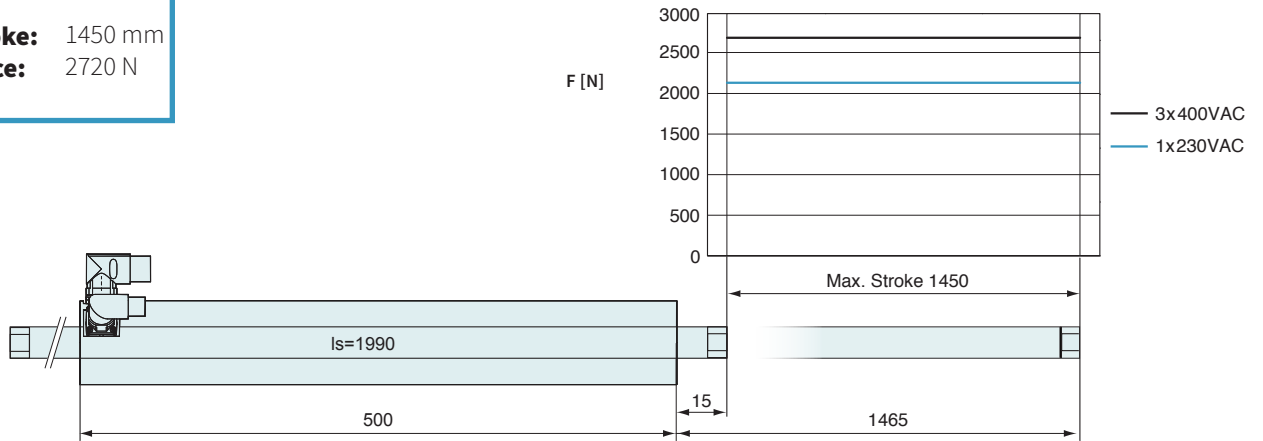
Technical Data P10-70x400U/1250			
Stroke			
Max. Stroke	mm (in)		1250 (49.2)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)		2150 (483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)		2720 (611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)		320 / 500 / 890 (73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%		100
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})		80 (18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})		113 (25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)		2.2 (89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)		3.9 (3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm (in)		±0.05 (±0.002)
Linearity	%		± 0.15
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}		26.8 / 18.9
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}		33.9 / 23.9
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}		4 / 6.2 / 11
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}		2.9 / 4.4 / 7.9
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C		90
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W		0.52 / 0.22 / 0.068
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s		2100 / 500 / 100
Mechanical Data			
Slider Length	mm (in)		1790 (70)
Slider Mass	g (lb)		8413 (18.51)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x1790/1740	Slider for P10-70 'standard'	0150-2207

P10-70x400U/1450-BL-QJ

Max. Stroke: 1450 mm
Peak Force: 2720 N



Dimensions in mm

Technical Data P10-70x400U/1450			
Stroke			
Max. Stroke	mm (in)	1450	(57.1)
Force			
Max. Force @ 1x230VAC	N (lbf)	2150	(483)
Max. Force @ 3x400VAC	N (lbf)	2720	(611)
Max. Cont. Force [Passive cooling / Fan / Fluid]	N (lbf)	320 / 500 / 890	(73 / 110 / 200)
Max. Border Force relative	%	100	
Force Constant 1	N/A _{pk} (lbf/A _{pk})	80	(18)
Force Constant 2	N/A _{rms} (lbf/A _{rms})	113	(25.4)
Velocity			
Max. Velocity @ 1x230VAC	m/s (in/s)	2.2	(89.9)
Max. Velocity @ 3x400VAC	m/s (in/s)	3.9	(3.9)
Position Detection			
Repeatability	mm (in)	±0.05	(±0.002)
Linearity	%	± 0.15	
Electrical Data			
Max. Current @ 1x230VAC	A _{pk} / A _{rms}	26.8 / 18.9	
Max. Current @ 3x400VAC	A _{pk} / A _{rms}	33.9 / 23.9	
Max. Cont. Current 1 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{pk}	4 / 6.2 / 11	
Max. Cont. Current 2 [Passive cooling / Fan / Fluid]	A _{rms}	2.9 / 4.4 / 7.9	
Thermal Data			
Max. Winding Temperature (Sensor)	°C	90	
Thermal Resistance [Passive cooling / Fan / Fluid]	°K/W	0.52 / 0.22 / 0.068	
Thermal Time Constant [Passive cooling / Fan / Fluid]	s	2100 / 500 / 100	
Mechanical Data			
Slider Length	mm (in)	1990	(78)
Slider Mass	g (lb)	9350	(20.57)



Item	Description	Item-No.
PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
PL10-28x1990/1940	Slider for P10-70 'standard'	0150-2208

Linear Guides H10



HM10-70x400/50 | Linear Module 70x400 with 50 mm Stroke

→	H-Guide	H10-70x400/50	H-Guide for P10-70x400, Stroke max. 50 mm	0150-5419	
	→	Stator	PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
			PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
			PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
			PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
→	Slider	PL10-28x590/540	Slider for P10-70 'standard'	0150-2196	

HM10-70x400/150 | Linear Module 70x400 with 150 mm Stroke

→	H-Guide	H10-70x400/150	H-Guide for P10-70x400, Stroke max. 150 mm	0150-5420	
	→	Stator	PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
			PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
			PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
			PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
→	Slider	PL10-28x690/640	Slider for P10-70 'standard'	0150-2197	

HM10-70x400/250 | Linear Module 70x400 with 250 mm Stroke

→	H-Guide	H10-70x400/250	H-Guide for P10-70x400, Stroke max. 250 mm	0150-5421	
	→	Stator	PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
			PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
			PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
			PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
→	Slider	PL10-28x790/740	Slider for P10-70 'standard'	0150-2198	

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "LINEAR GUIDES".

HM10-70x400/350		Linear Module 70x400 with 350 mm Stroke		
→	H-Guide	H10-70x400/350	H-Guide for P10-70x400, Stroke max. 350 mm	0150-5422
	Stator	PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
		PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
		PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
		PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
Slider	PL10-28x890/840	Slider for P10-70 'standard'	0150-2199	

HM10-70x400/450		Linear Module 70x400 with 450 mm Stroke		
→	H-Guide	H10-70x400/450	H-Guide for P10-70x400, Stroke max. 450 mm	0150-5423
	Stator	PS10-70x400U-BL-QJ	Stator 3x400VAC, LinMot Encoder	0150-1294
		PS10-70x400U-BL-QJ-D01	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, KTY	0150-2286
		PS10-70x400U-BL-QJ-D02	Stator 3x400VAC, Sin/Cos Encoder 1Vpp, PTC	0150-2363
		PS10-70x400U-BL-QJ-D03	Stator 3x400VAC, Sin/Cos 1Vpp, KTY on power connector	0150-2712
Slider	PL10-28x990/940	Slider for P10-70 'standard'	0150-2203	

Accessories				
→	Fan	HV01-37/48	Fan cooling for H01-37/48 & PF02-37/48	0150-5051

Motor Cable

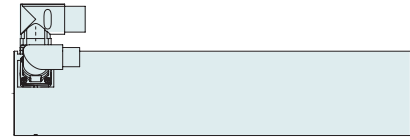
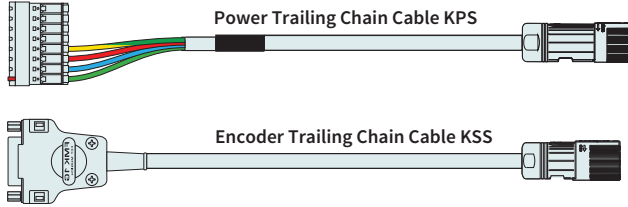
4



C1400

B Connector MC10-B/m

Q Connector MC10-Q/f



P10-70x400U

D15 Connector MC01-D15/f

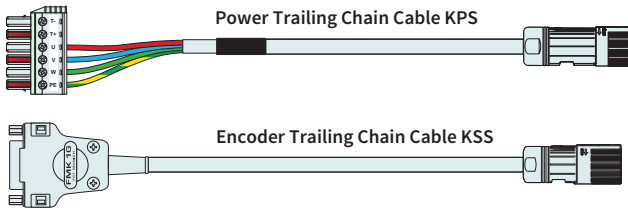
J Connector MC10-J/f



E1400

L Connector MC10-L/m

Q Connector MC10-Q/f



P10-70x400U

D15 Connector MC01-D15/f

J Connector MC10-J/f

ORDERING INFORMATION

TRAILING CHAIN CABLE FOR LINMOT DRIVES

Item	Description	Item-No.
KPS15-04-L/Q-3	Power Trailing Chain Cable E1400/P10-70, 3 m	0150-2266
KPS15-04-L/Q-5	Power Trailing Chain Cable E1400/P10-70, 5 m	0150-2261
KPS15-04-L/Q-8	Power Trailing Chain Cable E1400/P10-70, 8 m	0150-2267
KPS15-04-L/Q-12	Power Trailing Chain Cable E1400/P10-70, 12 m	0150-2268
KPS15-04-L/Q-	Power Trailing Chain Cable L/Q-, Custom length	0150-3388
KPS15-04-B/Q-3	Power Trailing Chain Cable C1400/P10-70, 3 m	0150-3660
KPS15-04-B/Q-5	Power Trailing Chain Cable C1400/P10-70, 5 m	0150-3661
KPS15-04-B/Q-8	Power Trailing Chain Cable C1400/P10-70, 8 m	0150-3662
KPS15-04-B/Q-12	Power Trailing Chain Cable C1400/P10-70, 12 m	0150-3663
KPS15-04-B/Q-	Power Trailing Chain Cable B/Q-, Custom length	0150-3608

TRAILING CHAIN CABLE FOR LINMOT DRIVES

Item	Description	Item-No.
KSS 05-02/08-D15/J-3	Encoder Trailing Chain Cable D15/J, 3 m	0150-2263
KSS 05-02/08-D15/J-5	Encoder Trailing Chain Cable D15/J, 5 m	0150-2262
KSS 05-02/08-D15/J-8	Encoder Trailing Chain Cable D15/J, 8 m	0150-2264
KSS 05-02/08-D15/J-12	Encoder Trailing Chain Cable D15/J, 12 m	0150-2265
KSS 05-02/08-D15(f)-45°/J-	Encoder Trailing Chain Cable D15/J-, Custom length	0150-3389

TRAILING CHAIN CABLE FOR STATOR SERIES D01 / D02

Item	Description	Item-No.
KPS15-04-.../Q-10	Power Trailing Chain Cable .../Q, 10 m for D0x	0150-2376
KPS15-04-./Q-	Power Trailing Chain Cable .../Q, for D0x, Custom length	0150-3491
KSS05-02/13-./J-10	Encoder Trailing Chain Cable ./J, 10 m for D0x	0150-2377
KSS05-02/13-./J-	Encoder Trailing Chain Cable ./J, for D0x, Custom length	0150-3492
KPS15-04	Power Trailing Chain Cable P10-70 (per m)	0150-2257
KSS05-02/13	Trailing Chain Cable Encoder P10-...-Dxx (per m)	0150-2259

TRAILING CHAIN CABLE FOR STATOR SERIES D03

Item	Description	Item-No.
KPS15-04/04.../Q-10	Power Trailing Chain Cable .../Q, 10 m for D03	0150-3654
KPS15-04/04-./Q-	Power Trailing Chain Cable .../Q, for D03, Custom length	0150-3579
KSS05-02/06-./J-10	Encoder Trailing Chain Cable ./J, 10 m for D03	0150-3655
KSS05-02/06-./J-	Encoder Trailing Chain Cable ./J, for D03, Custom length	0150-3611
KPS15-04/04	Power Trailing Chain Cable P10-...-Dx3 (per m)	0150-2269
KSS05-02/06	Trailing Chain Cable Encoder P10-...-Dx3 (per m)	0150-2490

CONNECTOR

Item	Description	Item-No.
MC10-L/m	Connector Power E1400/X2	0150-3382
MC01-D15/f	Motor Connector D15 (f)	0150-3136
MC10-Q/f	Connector Power PS10-70	0150-2268
MC10-J/f	Connector Encoder PS10-70	0150-2269

MOTOR FLANGES

4



Item	Description	Item-No.
PF10-70x430	Flange for PS10-70x400	0150-2276



Item	Description	Item-No.
PF10-70x430-FC	Flange for PS10-70x400 fluid cooling	0150-2295

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".

FANS



Item	Description	Item-No.
HV01-37/48	Fan cooling for H01-37/48 & PF02-37/48	0150-5051

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".

SLIDER MOUNTING



Item	Description	Item-No.
PLF01-28	Fixed Bearing Set for 27/28 mm sliders	0150-3087
PLF01-28-SS	Fixed Bearing Set for 27/28 mm sliders, stainless steel	0150-3297
PLL01-28	Floating Bearing for 28 mm sliders	0150-3094
PLM01-28-MK	Mounting Kit for 28 mm sliders	0150-3095

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".

BEARING KIT



Item	Description	Item-No.
PB10-70x400-L	Bearing Kit for PS10-70x400	0150-3435

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".

LUBRICANT RESERVOIR

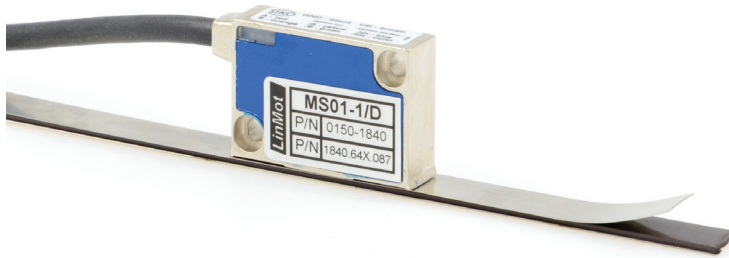


Item	Description	Item-No.
PA10-70/28	Lubricant reservoir for PS10-70 with lubricating nipple	0150-3543

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".

EXTERNAL POSITION SENSORS

4



Item	Description	Item-No.
MS01-1/D	Linear Encoder 1µm, A/B (for incremental strip)	0150-1840
MB01-1000	Magnetic incremental strip for MS01-1/D, per cm	0150-1963
KS025-D15/D-Encoder	Encoder Cable (Length in m)	0150-3168

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".



Item	Description	Item-No.
MS01-1/D-SSI	Linear Encoder 1µm, A/B (for absolute strip)	0150-2095
MB01-1000-ABS	Magnetic absolute strip for MS01-1/D-SSI (per cm)	0150-2096
EC01-ABS/ENC-12-S	MS01-1/D-SSI Encoder connector straight	0150-3616
KSS01-12-D15/ABS-ENC	Special cable for MS01-1/D-SSI on C1100/C1200/C1400/E1200/E1400 Drives	0150-3652

FIND MORE PRODUCT DETAILS IN THE CHAPTER "ACCESSORIES".



SERVICIO TÉCNICO, CONSULTORÍA, TRAINING Y CANAL DE VENTA OFICIAL

Instalaciones centrales

Francisco Aristeguieta Centro Tecnológico (F.A.C.T.)
GI-3162 (Zarautz – Urdaneta) km 2,2
E-20809 AIA (Gipuzkoa), Spain

www.larraioz.com

Tel. (+34) 943 140 139
Fax. (+34) 943 140 327
E-mail. info@larraioz.com



Instalaciones en Getaria

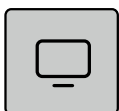
Larraioz Etxea, Eizaga Auzoa,
Garate Mendi E-20808
GETARIA (Gipuzkoa), Spain

Instalaciones América Latina

Carlos Calvo 2480, B8000XAV
Buenos Aires (Buenos Aires),
Argentina

Dirección postal

Larraioz Electrónica Industrial,
S.L. Apartado de Correos
193 E-20800 ZARAUTZ
(Gipuzkoa), Spain



Mechatronics & Robotics



Industrial Automation



Industry 4.0



Vision

ANNEX 3: Fitxa tècnica del sistema d'adquisició de dades NI cDAQ-9174.

SPECIFICATIONS

NI cDAQ™ -9174

NI CompactDAQ Four-Slot USB Chassis

These specifications are for the National Instruments CompactDAQ 9174 chassis only. These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted. For the C Series I/O module specifications, refer to the documentation for the C Series I/O module you are using.

Analog Input

Input FIFO size.....	127 samples per slot
Maximum sample rate ¹	Determined by the C Series I/O module or modules
Timing accuracy ²	50 ppm of sample rate
Timing resolution ³	12.5 ns
Number of channels supported.....	Determined by the C Series I/O module or modules

Analog Output

Number of channels supported	
Hardware-timed task	
Onboard regeneration.....	16
Non-regeneration.....	Determined by the C Series I/O module or modules

¹ Performance dependent on type of installed C Series I/O module and number of channels in the task.

² Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.

³ Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.

Non-hardware-timed task.....	Determined by the C Series I/O module or modules
Maximum update rate	
Onboard regeneration.....	1.6 MS/s (multi-channel, aggregate)
Non-regeneration.....	Determined by the C Series I/O module or modules
Timing accuracy.....	50 ppm of sample rate
Timing resolution.....	12.5 ns
Output FIFO size	
Onboard regeneration.....	8,191 samples shared among channels used
Non-regeneration.....	127 samples per slot
AO waveform modes.....	Non-periodic waveform, periodic waveform regeneration mode from onboard memory, periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

Digital Waveform Characteristics

Waveform acquisition (DI) FIFO.....	127 samples per slot
Waveform generation (DO) FIFO.....	2,047 samples
Digital input sample clock frequency	
Streaming to application.....	System-dependent memory
Finite.....	0 to 10 MHz
Digital output sample clock frequency	
Streaming from application.....	System-dependent memory
Regeneration from FIFO.....	0 to 10 MHz
Finite.....	0 to 10 MHz
Timing accuracy.....	50 ppm

General-Purpose Counters/Timers

Number of counters/timers.....	4
Resolution.....	32 bits
Counter measurements.....	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation, pulse width
Position measurements.....	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications.....	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks.....	80 MHz, 20 MHz, 100 kHz
External base clock frequency.....	0 to 20 MHz
Base clock accuracy.....	50 ppm
Output frequency.....	0 to 20 MHz
Inputs.....	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs.....	Any module PFI, analog trigger, many internal signals
FIFO.....	Dedicated 127-sample FIFO

Frequency Generator

Number of channels.....	1
Base clocks.....	20 MHz, 10 MHz, 100 kHz
Divisors.....	1 to 16 (integers)
Base clock accuracy.....	50 ppm
Output.....	Any module PFI terminal

Module PFI Characteristics

Functionality.....	Static digital input, static digital output, timing input, and timing output
Timing output sources ⁴	Many analog input, analog output, counter, digital input, and digital output timing signals
Timing input frequency.....	0 to 20 MHz
Timing output frequency.....	0 to 20 MHz

Digital Triggers

Source.....	Any module PFI terminal
Polarity.....	Software-selectable for most signals
Analog input function.....	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function.....	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer function.....	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down

Module I/O States

At power-on.....	Module-dependent. Refer to the documentation for each C Series I/O module.
------------------	--



Note The chassis may revert the input/output of the modules to their power-on state when the USB cable is removed.

⁴ Actual signals available dependent on type of installed C Series I/O module.

Power Requirements



Caution You must use a National Electric Code (NEC) Class 2 power source with the NI cDAQ-9174 chassis.



Note Some C Series I/O modules have additional power requirements. For more information about C Series I/O module power requirements, refer to the documentation for each C Series I/O module.



Note Sleep mode for C Series I/O modules is not supported in the NI cDAQ-9174.

Input voltage range.....	9 to 30 V
Maximum required input power ⁵	15 W
Power input connector.....	2 positions 3.5 mm pitch pluggable screw terminal with screw locks similar to Sauro CTMH020F8-0N001
Power input mating connector.....	Sauro CTF020V8, Phoenix Contact 1714977, or equivalent
Power consumption from USB,.....	500 μ A maximum 4.10 to 5.25 V

Bus Interface

USB specification.....	USB 2.0 Hi-Speed
High-performance data streams.....	7
Data stream types available.....	Analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer input, counter/timer output, NI-XNET ⁶



Note If you are connecting the NI cDAQ-9174 chassis to a USB hub, the hub must be externally powered.

⁵ Includes maximum 1 W module load per slot across rated temperature and product variations.

⁶ When a session is active, CAN or LIN (NI-XNET) C Series modules use a total of two data streams regardless of the number of NI-XNET modules in the chassis.

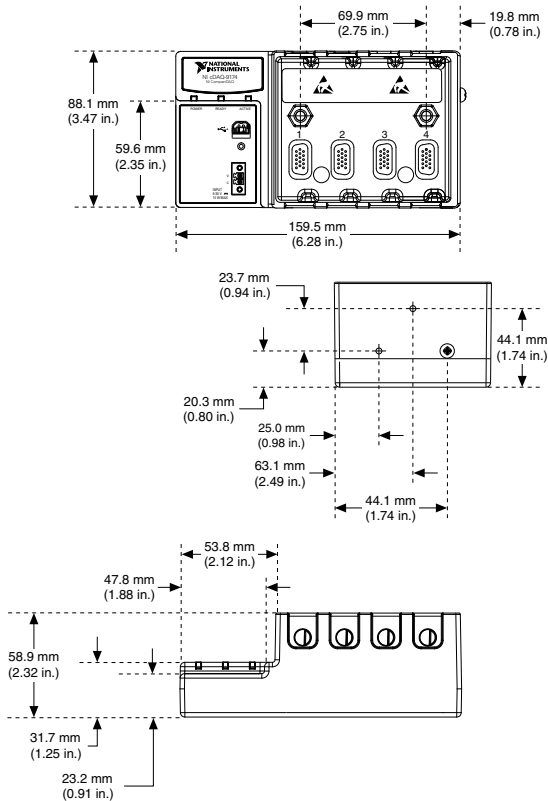
Physical Characteristics

Weight (unloaded).....Approx. 574 g (20.2 oz)

Dimensions (unloaded).....159.5 mm × 88.1 mm × 58.9 mm
(6.28 in. × 3.47 in. × 2.3 in.) Refer to the following figure.

If you need to clean the chassis, wipe it with a dry towel.

Figure 1. NI cDAQ-9174 Dimensions



Environmental

Operating temperature ⁷	-20 °C to 55 °C (IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Storage temperature.....	-40 °C to 85 °C (IEC-600068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Ingress protection.....	IP 30
Operating humidity.....	10 to 90% RH, noncondensing (IEC-60068-2-56)
Storage humidity.....	5 to 95% RH, noncondensing (IEC-60068-2-56)
Pollution Degree (IEC 60664).....	2
Maximum altitude.....	5,000 m
Indoor use only.	

Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the NI cDAQ-9174 system, use an NI locking USB cable, and affix ferrules to the ends of the terminal lines.

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC 60068-2-27. Test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F.)
Random vibration	
Operating.....	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Non-operating.....	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (Tested in accordance with IEC 60068-2-64. Non-operating test profile exceeds the requirements of MIL PRF-28800F, Class 3.)

⁷ When operating the NI cDAQ-9174 in temperatures below 0 °C, you must use the PS-15 power supply or another power supply rated for below 0 °C.

Safety

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia, and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



Note For EMC declarations and certifications, refer to the *Online Product Certification* section.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Online Product Certification

To obtain product certifications and the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of the product life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers, National Instruments WEEE initiatives, and compliance with WEEE Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment, visit ni.com/environment/weee.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at ni.com/trademarks for information on National Instruments trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering National Instruments products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at ni.com/patents. You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the readme file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at ni.com/legal/export-compliance for the National Instruments global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data.

© 2013 National Instruments. All rights reserved.

374045A-01 May13

ANNEX 4: Fitxa tècnica del martell instrumentat PCB Piezotronics 086D20.

Model Number 086D20	ICP® IMPACT HAMMER	Revision: H ECN #: 44362
------------------------	---------------------------	-----------------------------

	<u>ENGLISH</u>	<u>SI</u>
Performance		
Sensitivity(± 15 %)	1 mV/lbf	0.23 mV/N
Measurement Range	± 5000 lbf pk	± 22,240 N pk
Resonant Frequency	≥ 12 kHz	≥ 12 kHz
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %
Electrical		
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	<100 Ohm	<100 Ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
Discharge Time Constant	≥ 1400 sec	≥ 1400 sec
Physical		
Sensing Element	Quartz	Quartz
Sealing	Hermetic	Hermetic
Hammer Mass	2.4 lb	1.1 kg
Head Diameter	2.0 in	5.1 cm
Tip Diameter	2.0 in	5.1 cm
Hammer Length	14.5 in	37 cm
Electrical Connection Position	Bottom of Handle	Bottom of Handle
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack

OPTIONAL VERSIONS

Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4
 TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4

Output Bias Voltage	8.5 to 15 VDC	8.5 to 15 VDC
---------------------	---------------	---------------

NOTES:
 [1]Typical.
 [2]See PCB Declaration of Conformance PS136 for details.

SUPPLIED ACCESSORIES:
 Model 084A60 Tip - super soft plastic, gray (1)
 Model 084A61 Tip - soft plastic, brown (1)
 Model 084A62 Tip - medium plastic, red (1)
 Model 084A63 Tip - hard plastic, black (1)
 Model HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)

Entered: JM	Engineer: NJF	Sales: RWM	Approved: NJF	Spec Number:
Date: 6/29/2015	Date: 6/29/2015	Date: 6/29/2015	Date: 6/29/2015	12923



*All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.*



Phone: 716-684-0001
 Fax: 716-684-0987
 E-Mail: info@pcb.com

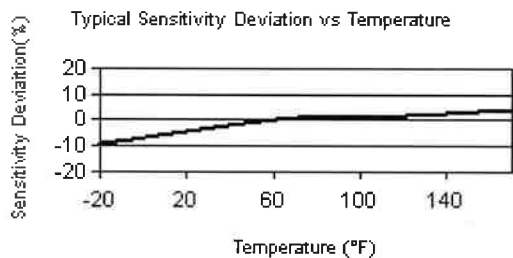
ANNEX 5: Fitxa tècnica de l'acceleròmetre triaxial PCB Piezotronics 356B18.

Model Number
356B18

TRIAxIAL ICP® ACCELEROMETER

Revision: G
ECN #: 26468

Performance	ENGLISH	SI	
Sensitivity(± 10 %)	1000 mV/g	102 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	± 5 g pk	± 49 m/s ² pk	
Frequency Range(± 5 %)	0.5 to 3000 Hz	0.5 to 3000 Hz	
Frequency Range(± 10 %)	0.3 to 5000 Hz	0.3 to 5000 Hz	
Resonant Frequency	≥ 20 kHz	≥ 20 kHz	
Phase Response(± 5 °)(at 70°F [21°C])	2 to 2000 Hz	2 to 2000 Hz	[1]
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.00005 g rms	0.0005 m/s ² rms	[2]
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	
Transverse Sensitivity	≤ 5 %	≤ 5 %	
Environmental			
Overload Limit(Shock)	± 5000 g pk	± 5000 g pk	
Temperature Range(Operating)	-20 to +170 °F	-29 to +77 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Base Strain Sensitivity	0.0007 g/µε	0.007 (m/s ²)/µε	[1]
Electrical			
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤ 600 ohm	≤ 600 ohm	
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	0.8 to 3.0 sec	0.8 to 3.0 sec	
Settling Time(within 10% of bias)	<12 sec	<12 sec	
Spectral Noise(1 Hz)	11.4 µg/√Hz	112 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(10 Hz)	4.0 µg/√Hz	39 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(100 Hz)	1.2 µg/√Hz	12 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise(1 kHz)	0.4 µg/√Hz	4.4 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Physical			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Anodized Aluminum	Anodized Aluminum	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Size (Height x Length x Width)	0.80 in x 1.03 in x 0.80 in	20.3 mm x 26.1 mm x 20.3 mm	[1]
Weight	0.88 oz	25 gm	
Electrical Connector	1/4-28 4-Pin	1/4-28 4-Pin	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female	



OPTIONAL VERSIONS
Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

- A - Adhesive Mount**
Mounting Thread: None - Adhesive Mount Only
None - Adhesive Mount Only
Supplied Accessory: Model 080A109 Petro Wax (1)
Supplied Accessory: Model 080A90 Quick Bonding Gel (1)
- J - Ground Isolated**
Electrical Isolation(Base): >10⁸ ohm
>10⁸ ohm
Size - Height x Length x Width: 0.85 in x 1.03 in x 0.85 in 21.6 mm x 26.1 mm x 21.6 mm
- T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4**
TLA - TEDS LMS International - Free Format
TLB - TEDS LMS International - Automotive Format
TLC - TEDS LMS International - Aeronautical Format
TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4
Output Bias Voltage: 8.5 to 13 VDC 8.5 to 13 VDC

NOTES:
[1] Typical.
[2] Zero-based, least-squares, straight line method.
[3] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.

SUPPLIED ACCESSORIES:
Model 080A109 Petro Wax (1)
Model 080A68 Adhesive mounting base (for Models 356B07 and 356B08) (1)
Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (1)
Model ACS-1T NIST traceable triaxial amplitude response, 10 Hz to upper 5% frequency. (1)
Model M081B05 Mounting Stud 10-32 to M6 X 0.75 (1)

Entered: <i>BIS</i>	Engineer: <i>JS</i>	Sales: <i>ROZ</i>	Approved: <i>[Signature]</i>	Spec Number:
Date: <i>5-16-07</i>	Date: <i>5/16/07</i>	Date: <i>5/16/07</i>	Date: <i>5/16/07</i>	11615

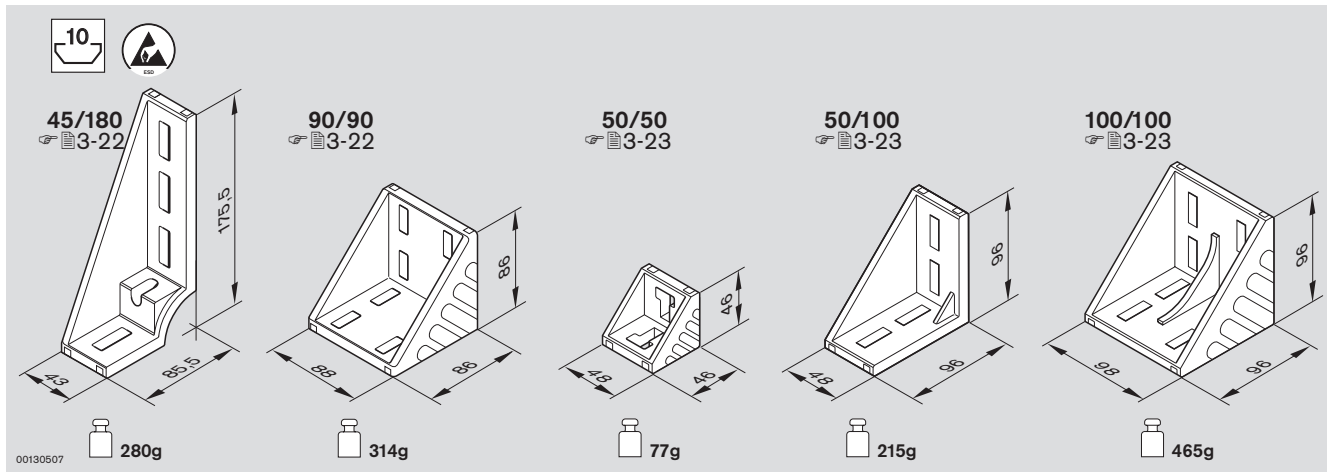
PCB PIEZOTRONICS™
VIBRATION DIVISION
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043

Phone: 716-684-0001
Fax: 716-685-3886
E-Mail: vibration@pcb.com

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

ANNEX 6: Dimensions de les cartelles Bosch Rexroth AG.

Elementi di giunto · Elementos de unión · Elementos de união



Angolare
Escuadra
Cantoneira

Typ		Nr./No./N°
45/180		20 3 842 523 583
90/90		20 3 842 523 575
50/50		20 3 842 530 381
50/100		20 3 842 530 382
100/100		20 3 842 530 460

Cuffia
Tapa
Tampa

Typ		Nr./No./N°
45/180		20 3 842 523 585
90/90		20 3 842 523 580
50/50		20 3 842 530 383
50/100		20 3 842 530 384
100/100		20 3 842 530 461

Angolare *designLINE* - Set (incl. set di fissaggio, cuffia)
Escuadra *designLINE* - Juego (incl. juego de piezas de fijación, tapa)
Cantoneira *designLINE* - Jogo (incl. kit de fixação, tampa)

NEW
2008

Typ				Nr./No./N°	Fastening Set
45/180				1 3 842 538 750	2xG
90/90				1 3 842 538 721	4xG
50/50				1 3 842 538 722	4xG
50/100				1 3 842 538 723	4xG
100/100				1 3 842 538 724	4xG

Angolare - Set (incl. set di fissaggio)
Escuadra - Juego (incl. juego de piezas de fijación)
Cantoneira - Jogo (incl. kit de fixação)

Typ				Nr./No./N°	Fastening Set
90/90				1 3 842 523 578	4xG
50/50				1 3 842 530 259	4xG
50/100				1 3 842 530 260	4xG
100/100				1 3 842 530 361	4xG

Material

- Angolare: alluminio pressofuso
- Cuffia: PA, nera
- Cuffia: (40/...;50/...): ABS, nero

Material

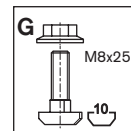
- Escuadra: fundición a presión de aluminio
- Tapa: PA, negro
- Tapa: (40/...;50/...): ABS, negro

Material

- Cantoneira: Alumínio fundido sob pressão
- Tampa: PA, preto
- Tampa: (40/...;50/...): ABS, preto

Fastening Set:

- Incl. set di collegamento per fissaggio nella scanalatura 6, 8 o 10
- Incl. juego de unión para la fijación en las ranuras 6, 8 ó 10
- Incl. jogo de união para fixação em ranhura 6, 8, ou 10



ANNEX 7: Codi font fitxer MATLAB ModGeo_Banco_nous_pilars.

```

function ModGeom_Banco
%=====
% DEFINICION DEL MODELO GEOMETRICO ** BANCO **
%=====

global Geometria
%global NumPG XYZPG NumLG TopLG XYZLG NumPolG TopPolG XYZPolG PG_FRF
xyzlim

%- Puntos geometria
XYZPG= [...
-0.604 1.4 0.1;...
-0.3 2.254 0.1;...
0.3 2.254 0.1;...
0.604 1.4 0.1;...
0 1.45 0;...
0 1.45 0.02;...
0 1.4 0.473;...
0 1.4 0.946;...
0 1.4 1.419;...
0 1.5 1.892;...
-0.25 1.45 2.092;...
-0.25 0.725 2.092;...
-0.25 0 2.092;...
-0.25 -0.725 2.092;...
-0.25 -1.45 2.092;...
0.25 1.45 2.092;...
0.25 0.725 2.092;...
0.25 0 2.092;...
0.25 -0.725 2.092;...
0.25 -1.45 2.092;...
0 -1.5 1.892;...
0 -1.3 1.419;...
0 -1.3 0.946;...
0 -1.3 0.473;...
0 -1.45 0.02;...
0 -1.45 0;...
0.604 -1.4 0.1;...
0.3 -2.254 0.1;...
-0.3 -2.254 0.1;...
-0.604 -1.4 0.1;...
0.31 0 1.14;...
-0.31 0 1.14;...
0.175 0 1.89;...
-0.175 0 1.89;...
0.175 0 2.34;...
-0.175 0 2.34;...
-0.3 1.25 0.02;...
-0.3 1.35 0.473;...
-0.3 1.35 0.946;...
-0.3 1.35 1.419;...
-0.35 1.45 1.892;...
0.3 1.25 0.02;...
0.3 1.35 0.473;...
0.3 1.35 0.946;...

```

```

0.3  1.35  1.419;...
0.35 1.45  1.892;...
0.3  -1.25 0.02;...
0.3  -1.35 0.473;...
0.3  -1.35 0.946;...
0.3  -1.35 1.419;...
0.35 -1.45 1.892;...
-0.3 -1.25 0.02;...
-0.3 -1.35 0.473;...
-0.3 -1.35 0.946;...
-0.3 -1.35 1.419;...
-0.35 -1.45 1.892;...
0     0.875 2.092;...
0     -0.875 2.092];

```

```
NumPG= size(XYZPG,1);
```

```
%- Lineas geometria
```

```
TopLG= [
1  37;
4  42;
3  42;
2  37;
5  6;
6  7;
7  8;
8  9;
9  10;
10 11;
11 12;
12 13;
13 14;
14 15;
15 21;
10 16;
16 17;
17 18;
18 19;
19 20;
20 21;
21 22;
22 23;
23 24;
24 25;
27 47;
28 47;
29 52;
30 52;
25 26;
13 34;
18 33;
31 32;
34 32;
33 31;

```



```
35 33;
34 36;
18 35;
13 36;
42 6;
37 6;
42 43;
43 44;
44 45;
45 46;
46 16;
37 38;
38 39;
39 40;
40 41;
41 11;
47 48;
48 49;
49 50;
50 51;
51 20;
52 53;
53 54;
54 55;
55 56;
56 15;
42 6;
37 6;
47 25;
52 25;
46 10;
41 10;
51 21;
56 21;
17 57;
12 57;
19 58;
14 58];
```

```
NumLG= size(TopLG,1);
```

```
%- Poligonos geometria
```

```
TopPolG= [];
```

```
NumPolG= 0;
```

```
%- Relación puntos geométricos - FRF
```

```
PG_PFRF=
```

```
[1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20;21;22;23;24;25;26;27;
28;29;30;31;32;33;34;35;36;37;38;39;40;41;42;43;44;45;46;47;48;49;50;51;5
2;53;54;55;56;57;58];
```

```
%- CALCULOS
```

```
%- Coordenadas lineas
```

```
XYZLG= zeros(3,2,NumLG);
```

```

for i= 1:NumLG
    for j= 1:2
        XYZLG(:,j,i)= XYZPG(TopLG(i,j),:);
    end
end
%- Coordenadas poligonos
XYZPolG= zeros(3,4,NumPolG);
for i= 1:NumPolG
    for j= 1:4
        if TopPolG(i,j)>0
            XYZPolG(:,j,i)= XYZPG(TopPolG(i,j),:);
        end
    end
end
end
% Tamaños

xyzlim=[[-1.5 1.5];[-3 3];[-0.2 2.4]];

%- Paso a variables globales
Geometria.NumPG = NumPG;
Geometria.XYZPG = XYZPG;
Geometria.NumLG = NumLG;
Geometria.TopLG = TopLG;
Geometria.XYZLG = XYZLG;
Geometria.PG_PFRF= PG_PFRF;
Geometria.xyzlim = xyzlim;
Geometria.NumPolG= NumPolG;
Geometria.TopPolG= TopPolG;
Geometria.XYZPolG= XYZPolG;

end

```