



Universitat de Lleida

Desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços entre tractors i ormejos agrícoles per a la realització d'assajos en camp

Jordi Pijuan Cases

Dipòsit Legal: L.1440-2015
<http://hdl.handle.net/10803/311796>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

6. VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DEL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL

En aquest capítol s'exposa tot el procediment per a la validació del dinamòmetre per a enganxalls de tres punts. La validació consisteix en realitzar un conjunt d'assajos on s'apliquen diferents forces conegudes al dinamòmetre tripuntal, pel costat d'acoblament amb l'ormeig, per obtenir els senyals de resposta en els bolons de mesura. Amb les dades dels assajos experimentals es realitzen els estudis per comprovar l'estabilitat dels bolons en les mesures i validar el model mecànic teòric del dinamòmetre tripuntal.

6.1. Objectius dels assajos experimentals de validació

L'objectiu de la validació mitjançant assajos experimentals és verificar que les mesures obtingudes a partir dels senyals i del model teòric desenvolupat es corresponen amb les càrregues realment aplicades.

Per a la validació experimental s'utilitzen les dades de la força coneguda aplicada al dinamòmetre per la part de l'ormeig i els senyals dels bolons de mesura del dinamòmetre. Amb les dades obtingudes experimentalment es realitzen un conjunt d'estudis. Aquests són:

- Anàlisi de l'estabilitat en la resposta per a cada boló de mesura del dinamòmetre tripuntal. En aquest cas es comprova si el comportament dels bolons de mesura és o no estable, ja que el muntatge d'aquests en el dinamòmetre tripuntal podria implicar que no ho fos.
- Validació de la correcta determinació de les forces i moments en la connexió amb l'ormeig. A partir de les mesures de les cèl·lules de càrrega tipus boló i amb el model mecànic teòric del dinamòmetre es determinen aquestes forces i moments, i es comparen amb els valors de forces i moments aplicats en cada assaig.

Cal destacar que es realitza una validació de tot l'equip dinamomètric perquè es vol analitzar el comportament d'aquest en conjunt. Per tant, no es validen de forma separada cada una de les cèl·lules de càrrega tipus boló del dinamòmetre ja que en aquest cas no es tindrien en compte efectes com precàrregues o friccions entre els components del dinamòmetre degudes a les toleràncies en el muntatge o un possible repartiment no equilibrat de les càrregues. Aquests aspectes comentats són, en principi, la font d'error més important en els equips dinamomètrics amb múltiples components de mesura.

6.2. Procediment dels assajos experimentals

En aquest apartat es defineix el procediment utilitzat en la realització dels assajos experimentals. Es descriuen les diferents configuracions de forces aplicades en els diferents punts del dinamòmetre i la seqüència d'aplicació d'aquestes.

6.2.1. Descripció de les configuracions d'assaig

En l'estudi de l'estat de l'art es posa de manifest que, en la majoria de casos, els diferents investigadors realitzen els assajos estrictament necessaris per a validar cada un dels elements de mesura del dinamòmetre de forma individual (Apartat 2.2). Així, per a un dinamòmetre amb sis cèl·lules de càrrega, es realitzen sis assajos de força independents per a validar cada un dels elements de mesura. En aquesta tesi es pretén realitzar una validació més acurada, i s'analitza el dinamòmetre en múltiples estats de càrrega amb l'objectiu d'identificar i valorar els efectes de la pròpia construcció del dinamòmetre o la sensibilitat creuada en els bolons de mesura.

En el conjunt d'assajos experimentals de validació s'han plantejat un total de 13 configuracions diferents per a l'aplicació de forces sobre el dinamòmetre tripuntal. A la Figura 6.1 es mostren les direccions de força aplicada corresponents a les diferents configuracions estudiades. En aquesta figura s'han representat els vectors que corresponen als assajos en sentit positiu, però cal afegir a més els assajos amb les forces en el sentit contrari a l'indicat a la figura.

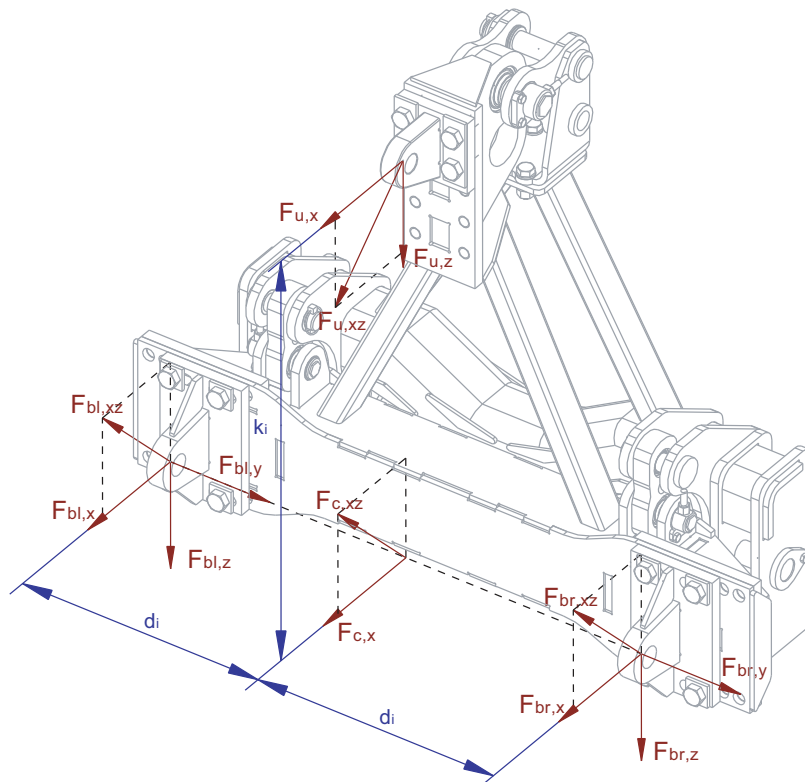


Figura 6.1: Configuracions en els assajos de validació del dinamòmetre tripuntal

En els assajos de forces longitudinals i diagonals (amb subíndexs x i xz) la força màxima aplicada és de 100 kN. En els assajos transversals i verticals (amb subíndex y i z) la força màxima aplicada és de 50 kN.

A la Taula 6.1 s'especifiquen les posicions establertes per als ancoratges inferiors del dinamòmetre per a la fixació de l'ormeig en els assajos on aquesta cota és determinant, i a la Taula 6.2 es defineix, per als corresponents assajos, la posició de l'ancoratge superior.

Taula 6.1: Posició dels ancoratges inferiors en els assajos experimentals de validació

Configuració d'assaig	$F_{br,x}$	$F_{br,z}$	$F_{br,xz}$	$F_{br,y}$		$F_{bl,y}$		$F_{c,x}$
	$F_{bl,x}$	$F_{bl,z}$	$F_{bl,xz}$					$F_{c,xz}$
Sentit força				+	-	+	-	
Dimensió d_i		433,5		443,5	423,5	423,5	443,5	395,5

Taula 6.2: Posició de l'ancoratge superior en els assajos experimentals de validació

Configuració d'assaig	$F_{u,xz}$	
Sentit força	+	-
Dimensió k_i	700	735 765

Entre les configuracions descrites, n'hi ha que corresponen a casos on pràcticament la totalitat de la força recau en un dels bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal. A la Taula 6.3 es mostra la correspondència entre cada boló de mesura i la configuració d'assaig de referència per aquest. Les dades obtingudes en aquestes configuracions són les que s'utilitzen per als estudis particulars del comportament de cada boló de mesura.

Taula 6.3: Configuracions d'assajos per a l'estudi particular de cada un dels bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal

Boló de mesura	Força principal	Direcció - Posició	Configuració de referència
1	F_1	Longitudinal superior	$F_{u,x}$
2	F_2	Vertical dreta	$F_{br,z}$
3	F_3	Vertical esquerra	$F_{bl,z}$
4	F_4	Longitudinal dreta	$F_{br,x}$
5	F_5	Longitudinal esquerra	$F_{bl,x}$
6	F_6	Transversal	$F_{br,y}$

6.2.2. Seqüència d'aplicació de les forces en els assajos experimentals

Per a l'obtenció dels diferents valors de senyals en cada boló de mesura del dinamòmetre en funció de la força aplicada a aquest es realitza un conjunt de cicles o seqüències que consisteixen en aplicar de forma successiva diferents valors de força en la direcció de la configuració que s'analitza en cada cas.

Els cicles d'assaig utilitzats es descriuen al procediment ME-002 del CEM (Centro Español de Metrología) [93]. Aquest procediment és d'aplicació en el cas d'instruments de mesura de forces uniaxials a compressió i/o tracció. En el cas d'estudi d'aquesta tesi, al tractar-se d'un equip de mesura d'esforços amb múltiples components, aquesta norma cal adaptar-la, ja que no existeix cap directriu que defineixi el procés a seguir en aquests equips. Tot i això, la seqüència de valors de cada força aplicada sí que s'ha definit segons els criteris generals d'aquest procediment.

Per a l'assaig en cada configuració de força aplicada, tant a compressió com a tracció, s'han realitzat els cicles de càrrega descrits en detall a continuació: un assaig de repetibilitat (Figura 6.2), un assaig de reversibilitat (Figura 6.3) i un assaig de fluència (Figura 6.4).

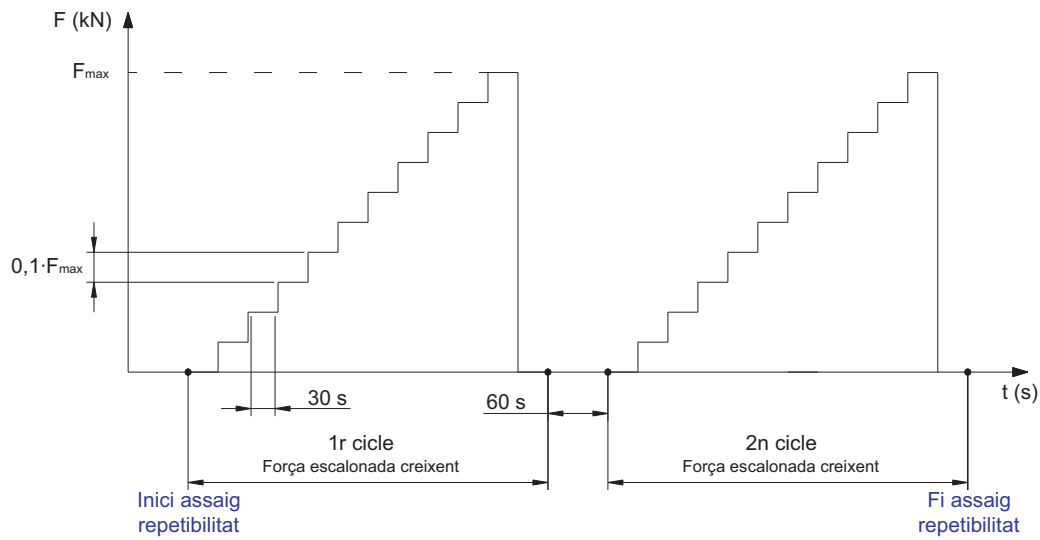


Figura 6.2: Cicle per a l'assaig de repetibilitat

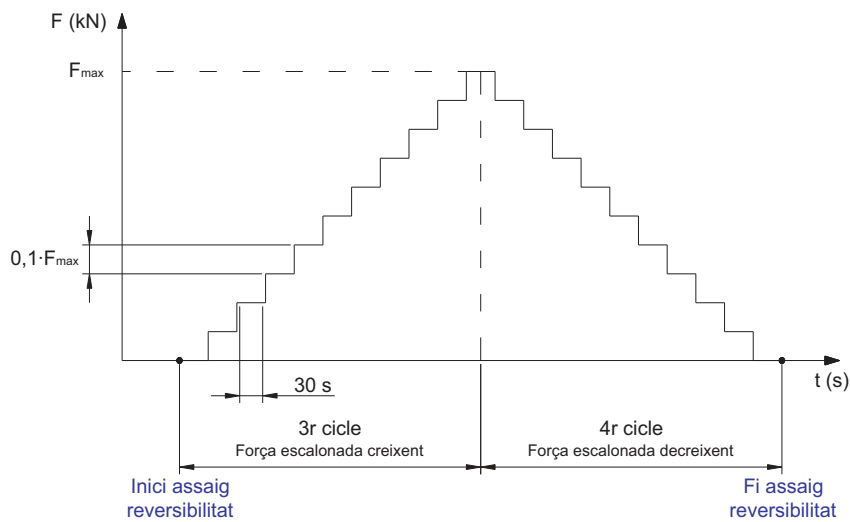


Figura 6.3: Cicle per a l'assaig de reversibilitat

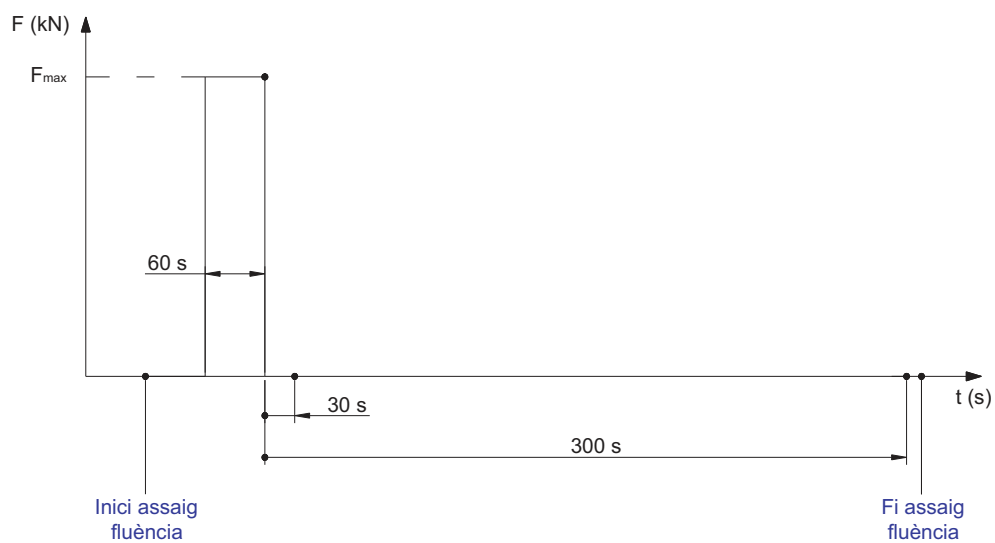


Figura 6.4: Cicle per a l'assaig de fluència

En cada seqüència completa d'aplicació de força, primerament s'ha realitzat el cicle per a l'assaig de repetibilitat, després l'assaig de reversibilitat i finalment l'assaig de fluència. La seqüència completa es descriu a continuació:

1. Es connecta tot l'equipament i es deixa 5 minuts per a que s'estabilitzin els senyals, que podrien variar degut a possibles efectes tèrmics.
2. S'inicia l'enregistrament de les dades amb el programa d'adquisició i control de l'assaig.
3. S'enregistren, a càrrega nul·la, els valors dels senyals dels bolons del dinamòmetre tripuntal i de l'equipament utilitzat per mesurar la força aplicada durant 30 s.
4. Es realitzen tres càrregues amb valors de força iguals al màxim de l'assaig. En cada càrrega es manté la força màxima durant un període de 60 s i posteriorment es deixa d'aplicar la força també durant 60 s.
5. Es realitza una càrrega escalonada creixent, des de força nul·la fins al valor de força màxima. Un cop assolit el valor màxim es retorna a força nul·la (1r cicle).
6. Es repeteix el cicle anterior, aplicant una força escalonada des de zero fins a valor màxim, i un cop assolit aquest es retorna a força nul·la (2n cicle).
7. S'aplica una càrrega a força màxima, amb una durada de 60 s, per a continuació retornar a força nul·la, també durant 60 s.
8. Es realitza un altre cicle de càrrega escalonada creixent fins a força màxima (3r cicle).
9. Un cop assolida la força màxima, es realitza un descens de la força aplicada escalonada fins que la càrrega esdevé nul·la (4t cicle).
10. Es manté la càrrega nul·la durant al menys 60 s, després s'aplica una càrrega a força màxima amb una durada de 60 s, i posteriorment es torna a mantenir la càrrega nul·la durant un mínim de 60 s.
11. S'aplica un altre cop la força màxima durant 60 s per retornar a càrrega nul·la, i llavors es manté el sistema sense aplicar cap tipus de càrrega durant 300 s (cicle de fluència).

Les tres càrregues inicials (pas 4) es realitzen per tal que els elements interns del dinamòmetre s'ajustin a les sol·licitacions de l'assaig. El mateix objectiu tenen les càrregues màximes aplicades de forma individual entre el 2n i 3r cicle de càrrega o abans de l'assaig de fluència. Els dos assajos consecutius de càrrega creixent tenen l'objectiu d'avaluar la repetibilitat de l'equip de mesura. L'assaig de càrrega creixent i decreixent es realitza per a quantificar la reversibilitat o histèresis. L'últim assaig que es realitza correspon a l'assaig de fluència, per determinar si hi ha una deriva del senyal important al llarg del temps al deixar d'aplicar una força.

Els assajos a força escalonada es realitzen de tal forma que es manté aproximadament la mateixa diferència entre valors de càrrega successius. Per als assajos realitzats s'ha definit com a increment una desena part de la càrrega màxima aplicada. Així, per al cas dels assajos a força màxima aplicada de 100 kN la seqüència és de 0 a 100 kN amb increments de 10 kN. Si la força màxima a aplicar és de 50 kN, la seqüència és de 0 a 50 kN amb increments de 5 kN. L'única excepció es dona en els assajos de càrrega central ($F_{c,x}$ i $F_{c,xz}$), on la diferència entre forces successives és de 10 kN i s'arriba a una força màxima de 80 kN.

Per cadascun dels valors de força definits en l'escalonament, tant en les fases creixents com en les decreixents, es manté la consigna de força aplicada durant un mínim de 30 s. Paral·lelament, es registren els senyals dels bolons de mesura en aquest interval, es calculen les mitjanes de cada variable, i aquests són els valors que s'utilitzen en els càlculs de validació.

6.3. Requeriments dels assajos experimentals

Per a la realització d'una correcta validació del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals, l'equipament utilitzat ha de complir un conjunt de requeriments. Aquests requeriments es poden establir a partir dels que es descriuen a la norma UNE-EN ISO-376 "Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial" [94], que fa referència a les condicions i el procediment de calibratge d'instruments de mesura de forces per a màquines d'assaig uniaxial.

Aquesta norma descriu, entre altres aspectes, les característiques que han de complir els equips utilitzats per als assajos de calibratge d'equips de mesura d'esforços. La primera condició és que l'estructura on es fixa l'equip analitzat sigui suficientment rígida i que no hi hagi deformacions que afectin a la força aplicada a l'instrument de mesura, per evitar components de forces indesitjades i per garantir l'aplicació de la força en la direcció adequada. Una altra condició és que el sistema de mesura de la força aplicada de referència (element patró), sigui considerablement més precís que l'element que es valida. Per últim, el sistema ha de generar forces amb l'estabilitat i la repetibilitat necessària per a realitzar els assajos experimentals.

6.4. Equips utilitzats en els assajos experimentals

Per al procés d'assaig i validació experimental del dinamòmetre tripuntal s'ha utilitzat una bancada per a assajos estructurals. Conjuntament amb aquesta bancada s'utilitzen cilindres hidràulics i la instrumentació necessària per a la aplicació de les forces i l'adquisició de les dades obtingudes en l'assaig. A continuació es descriuen aquests equips.

Bancada i utilitatges per a assajos estructurals

La bancada per a assajos estructurals consisteix en una base de 6 m x 4 m formada per unes bigues d'acer i una massa de formigó. Mitjançant un conjunt d'utilitatges, formats per bigues i pilars de diferents formes i longituds, es poden formar diferents configuracions de muntatge, com per exemple pòrtics (Figura 6.5).

Per a l'aplicació de les forces es disposa de diferents cilindres hidràulics de múltiples dimensions i característiques. Per a les unions dels pilars amb la base de la bancada, per al muntatge dels pòrtics o per a la unió dels cilindres hidràulics a l'estructura, s'utilitzen diferents elements d'ancoratge i fixació. Molts d'aquests elements d'ancoratge permeten ajustar la posició requerida pels diferents elements, com per exemple els tirants de subjecció que permeten la seva regulació en longitud que donen versatilitat a tot el muntatge.



Figura 6.5: Bancada per a assajos estructurals

Tant la bancada com els elements d'ancoratge han estat dissenyats per suportar una càrrega de 250 kN aplicada en qualsevol direcció i, en el cas dels pilars i les bigues, per suportar càrregues de 250 kN aplicades al seu punt mig. Donats els intervals de mesura previstos per al dinamòmetre i a la limitació en la resistència estructural del mateix, les forces aplicades no seran superiors als 100 kN. Aquesta diferència es considera suficient per justificar que no hi haurà deformacions excessives en el conjunt estructural de la bancada que puguin afectar al correcte desenvolupament dels assajos experimentals.

Cilindres hidràulics i circuit hidràulic d'accionament

Per a l'aplicació de les forces es disposa de dos cilindres hidràulics, i s'utilitza l'un o l'altre en funció de la força màxima a aplicar. Es disposa d'un cilindre de diàmetre d'èmbol 125 mm i 90 mm de tija per a l'aplicació de forces de fins a 100 kN, i d'un cilindre de diàmetre d'èmbol de 80 mm i 56 mm de tija per a l'aplicació de forces de fins a 50 kN. Els dos tenen una cursa de 500 mm i una pressió nominal de treball de 250 bar. Per a l'accionament dels cilindres s'utilitza un grup hidràulic amb bomba de cabal fix.

Per al control en l'avanç i el retrocés dels cilindres s'ha utilitzat un bloc de vàlvules controlat manualment mitjançant palanca i amb retorn a posició central amb molla. La vàlvula del bloc utilitzada és una vàlvula 5/3 (5 vies i 3 posicions) de centres tancats. El bloc disposa d'una vàlvula limitadora de pressió regulable fins a 250 bar que s'ajusta lleugerament per sobre de la pressió màxima de l'assaig. Tant a l'entrada de pressió del bloc com en les dues sortides corresponents a les dues línies de pressió del cilindre s'hi han instal·lat sensors de pressió per al control d'aquesta durant l'assaig. Els valors de pressió es visualitzen en un equip portàtil on s'hi connecten els sensors. Finalment, a la línia de pressió de cada cambra del cilindre s'ha instal·lat un regulador de pressió que actua com a limitador de la pressió del circuit. La vàlvula descarrega al tanc del grup hidràulic, i així es manté la pressió desitjada a la línia i a la cambra del cilindre corresponent. El regulador de pressió s'ajusta manualment mitjançant un volant durant l'assaig, i permet regular la pressió del circuit, tant en increments com en disminucions de la pressió. A la Figura 6.6 es mostra el muntatge del circuit hidràulic d'accionament desenvolupat.

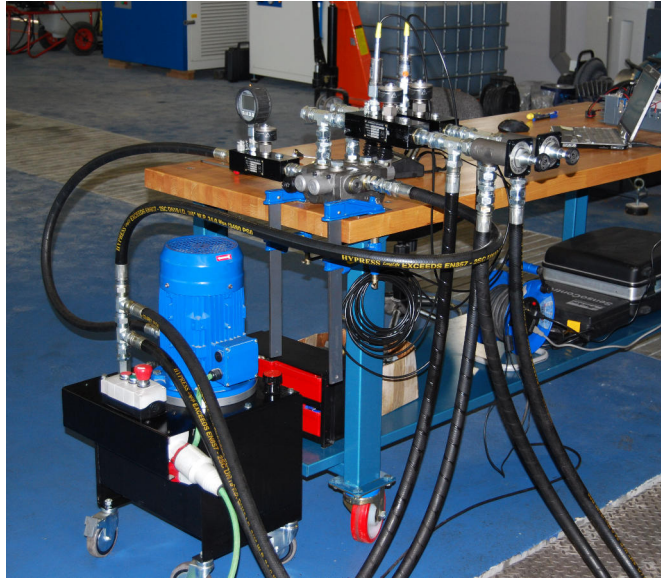


Figura 6.6: Circuit d'accionament del cilindre hidràulic per a la validació del dinamòmetre tripuntal

El sistema de regulació de la pressió mitjançant un ajust manual no permet assegurar una pressió (i per tant una força aplicada) suficientment repetitiva en assajos successius, com s'ha comprovat en la posada a punt dels elements hidràulics. Aquest aspecte es té en consideració en el tractament de les dades obtingudes en els assajos (Apartat 6.6). Tot i això, el sistema de regulació sí que és estable, i no es detecten oscil·lacions significatives de la pressió. Aquestes variacions són inferiors a una dècima de bar, el que implica variacions en la força que realitza el cilindre inferiors a 0,01 kN. Per tant es considera que el sistema d'aplicació de la força és adequat per aquests assajos.

Cèl·lules de càrrega utilitzades per a la mesura de la força aplicada

Als extrems de les tiges dels cilindres hidràulics s'hi instal·len cèl·lules de càrrega per a la mesura de la força realitzada pel cilindre. Aquestes cèl·lules de càrrega són en forma de plat, de la marca Interface[®], i mesuren tant a tracció com a compressió (Figura 6.7 i Figura 6.8).



Figura 6.7: Cèl·lula de càrrega de 250 kN utilitzada per a la mesura de la força aplicada amb el cilindre hidràulic



Figura 6.8: Cèl·lula de càrrega de 50 kN utilitzada per a la mesura de la força aplicada amb el cilindre hidràulic

Per als assajos experimentals s'han utilitzat dos models diferents de cèl·lula de càrrega depenent de la força màxima per a cada assaig. En concret s'ha utilitzat una cèl·lula de càrrega de força nominal de 250 kN i una altra de força nominal 50 kN. Les característiques bàsiques es mostren a la Taula 6.4. A la Taula 6.5 es mostren les dades del full de calibratge proporcionat pel fabricant de les dues cèl·lules de càrrega.

Taula 6.4: Característiques de les cèl·lules de càrrega per als cilindres hidràulics

Model	1210ACK	1220ACK
Càrrega nominal	50 kN	250 kN
Sensibilitat (mV/V)	4,0	4,0
Excitació màxima (V)	20	20
Resistència del pont (Ω)	350	350
Error màxim	$\pm 0,04\%$ FSO	$\pm 0,04\%$ FSO
Desviació del senyal a càrrega nul·la	$\pm 0,1\%$ FSO	$\pm 0,1\%$ FSO
Dimensions	Diàmetre: 104,8 Altura: 34,9	Diàmetre: 153,9 Altura: 44,5

Taula 6.5: Dades del full de calibratge de les cèl·lules de càrrega per als cilindres hidràulics

		Sensibilitat (mV/V)	Error màx.
1210 ACK	Tracció	4,38983	$\pm 0,018\%$ FS
50 kN	Compressió	-4,38958	$\pm 0,013\%$ FS
1220 ACK	Tracció	4,24341	$\pm 0,037\%$ FS
250 kN	Compressió	-4,23835	$\pm 0,018\%$ FS

Aquestes cèl·lules de càrrega tenen una alta precisió i això fa que siguin adequades per ser utilitzades com a referència en la mesura de la força aplicada en els assajos de validació. A partir de les característiques proporcionades pel fabricant es comprova que en la cèl·lula de càrrega de 50 kN l'error màxim serà de 0,02 kN (admetent l'error de 0,04% FSO) i per a la de 250 kN l'error màxim serà de 0,1 kN. Per als bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal, que tenen un error màxim del 0,5% FSO, es poden tenir errors de fins a 0,25 kN per als bolons de mesura de 50 kN i de fins a 0,5 kN per als bolons de 100 kN. A partir d'aquests valors es considera que les cèl·lules de càrrega per a la mesura de la força aplicada amb el cilindre són adequades per validar el funcionament del dinamòmetre tripuntal.

Sistema d'adquisició de dades

Per a l'enregistrament de les dades en els assajos de validació s'utilitza l'equip d'adquisició de dades cRIO 9022 de National Instruments® juntament amb dos mòduls d'adquisició NI 9237 per a sensors basats en pont de mesura. Aquest equip és el mateix que s'utilitza en els assajos en camp i les seves característiques tècniques es descriuen a l'Apartat 12.2. A la Figura 6.9 es mostra tot l'equipament utilitzat: una font d'alimentació, l'equip d'adquisició esmentat i un ordinador portàtil, també utilitzat en els assajos en camp, per controlar el programa d'adquisició i per visualitzar les dades durant l'enregistrament.

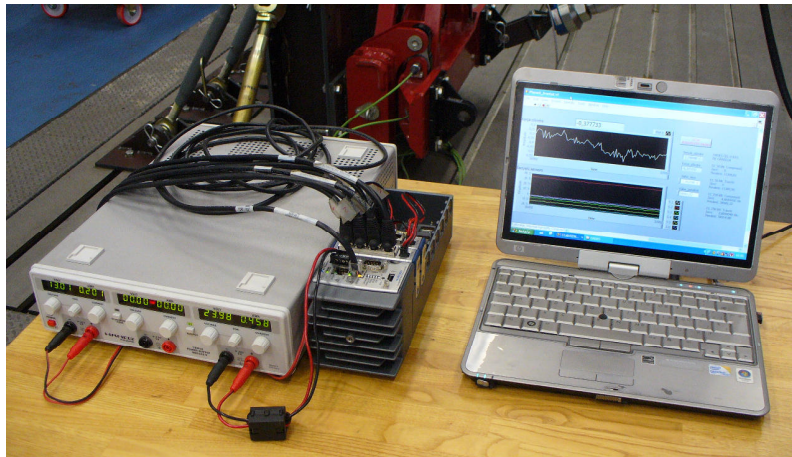


Figura 6.9: Equipament per a l'enregistrament de les dades en els assajos experimentals

Els 6 bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal es connecten a l'equip d'adquisició de dades, i el mateix es fa amb la cèl·lula de càrrega del cilindre. L'equip d'adquisició de dades es connecta a l'ordinador per visualitzar els valors de força aplicats en tot moment i per a l'enregistrament de totes les dades.

Per al control dels assajos amb el dinamòmetre tripuntal s'ha realitzat un programa específic mitjançant LabVIEW[®] (la interfície amb l'usuari es mostra a la Figura 6.10). El programa, a part de gestionar l'enregistrament, calcula la força aplicada pel cilindre en tot moment mostrant el valor per pantalla per a que durant el procés de validació experimental es pugui ajustar correctament la pressió al circuit i obtenir la força desitjada.

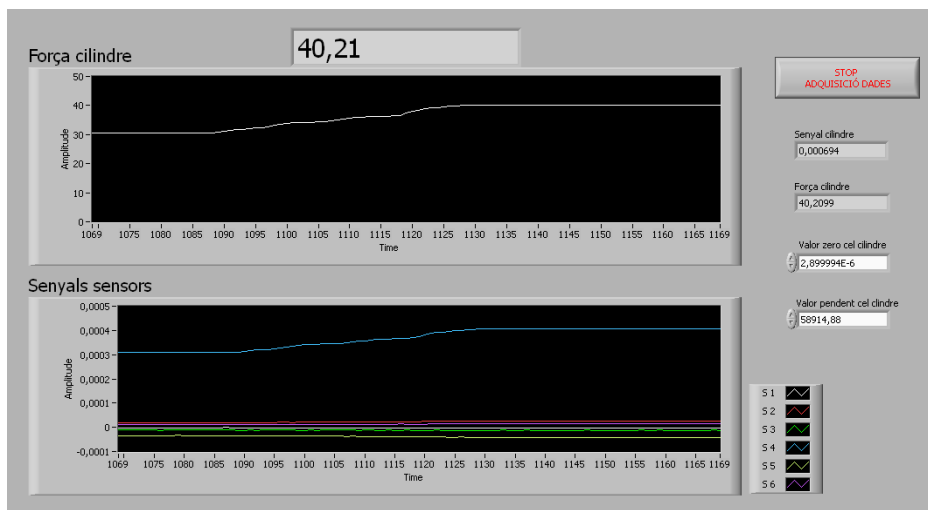


Figura 6.10: Imatge del panell frontal del programa per al control i adquisició de dades per als assajos de validació del dinamòmetre tripuntal

6.5. Muntatges per a la realització dels assajos experimentals

Per a la realització dels assajos amb el dinamòmetre, aquest es fixa a la bancada en la mateixa disposició amb la que s'instal·la a l'enganxall de tres punts del tractor, per tal de comprovar el seu funcionament en les condicions més properes a les que hi haurà en els assajos en camp.

Per al muntatge s'utilitzen tres pilars, degudament fixats a la base d'assaig, i a aquests s'hi acoblen els ancoratges per fixar el dinamòmetre tripuntal per la part del tractor. Llavors la força del cilindre s'aplica sobre els ancoratges de la part de l'ormeig. Per aconseguir aquesta disposició, s'han dissenyat els ancoratges per a la fixació del dinamòmetre tripuntal als pilars i també l'element d'acoblament de la cèl·lula de càrrega del cilindre amb els ancoratges del dinamòmetre destinats a l'ormeig.

Per tal d'assegurar la resistència de la bancada i augmentar la rigidesa del conjunt, s'ha muntat un pòrtic que uneix el pilar on es fixa la base del cilindre amb el corresponent pilar on està fixat el dinamòmetre tripuntal. En els assajos amb el cilindre en disposició horitzontal també es subjecta aquest mitjançant una eslinga vertical de tal manera que el seu pes no afecti a la reacció vertical en l'articulació de l'extrem de la tija amb el dinamòmetre tripuntal.

A continuació es descriuen les configuracions de muntatge del cilindre per a la realització dels assajos. Per a cada configuració es realitzen dos assajos, aplicant primer les forces en un sentit (corresponent al cilindre treballant a tracció) i després en l'altre (amb el cilindre a compressió).

Força longitudinal en els ancoratges inferiors ($F_{br,x}$, $F_{bl,x}$): Per a l'aplicació de la força longitudinal en els punts d'ancoratge inferior dret i esquerre del dinamòmetre s'ha realitzat un muntatge amb el cilindre gran on la força màxima a aplicar és de 100 kN. Els ancoratges ajustables del dinamòmetre per a l'enganxall de tres punts de la part de l'ormeig s'han fixat en la posició tal que queden alineats amb els ancoratges de la part del tractor del dinamòmetre, ja que aquesta disposició permet muntar el pòrtic adequadament per augmentar la rigidesa del tot el conjunt (Figura 6.11 i Figura 6.12).



Figura 6.11: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge inferior dret

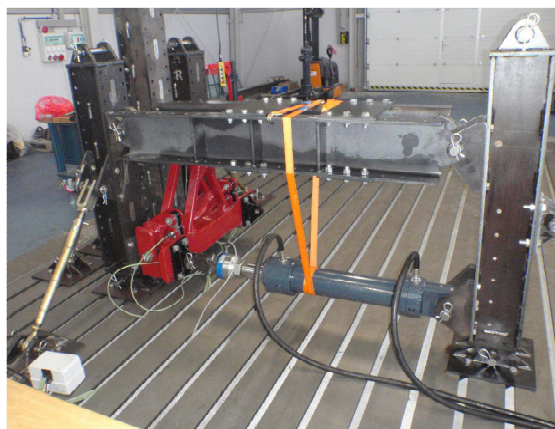


Figura 6.12: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge inferior esquerre

Força longitudinal en l'ancoratge superior ($F_{u,x}$): Per al cas de la força longitudinal al punt d'unió superior del dinamòmetre s'utilitza la mateixa disposició que en el cas anterior. En aquesta configuració la força màxima aplicada és també de 100 kN. L'ancoratge superior es situa en la posició més pròxima d'alineament amb el boló de mesura del dinamòmetre i que permet el muntatge del cilindre a la bancada (Figura 6.13).

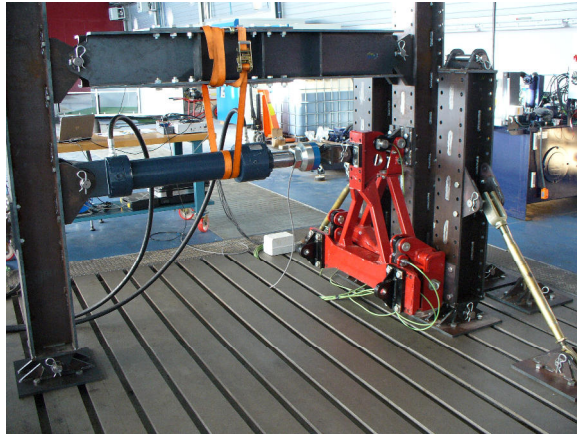


Figura 6.13: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge superior

Força vertical en els ancoratges inferiors ($F_{br,z}$, $F_{bl,z}$): Per a l'aplicació de la força vertical s'utilitza un pòrtic amb doble biga que permet disposar-hi el cilindre entremig. S'ha utilitzat el cilindre petit ja que la força màxima a aplicar és de 50 kN. La disposició dels ancoratges ajustables és igual que en els assajos de força longitudinal i la posició del cilindre s'ajusta mitjançant una platina de fixació amb colissos (Figura 6.14 i Figura 6.15).

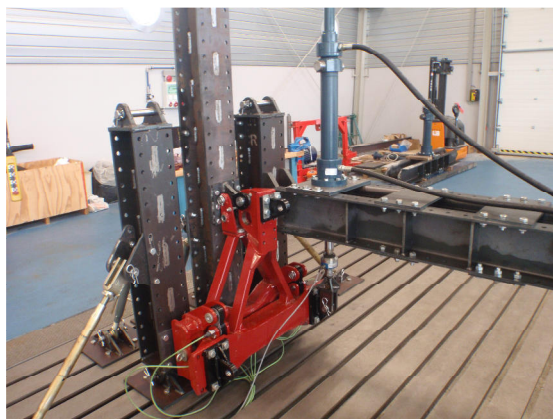


Figura 6.14: Assaig de força vertical en l'ancoratge inferior dret

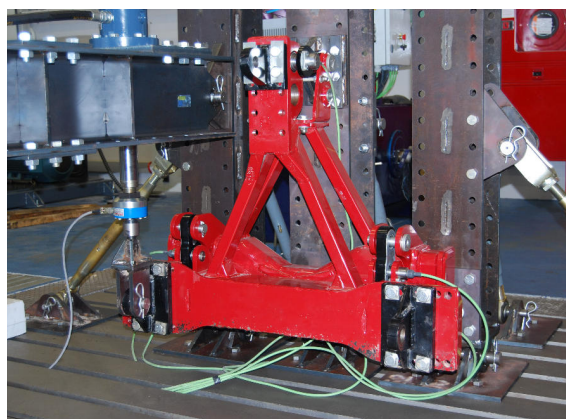


Figura 6.15: Assaig de força vertical en l'ancoratge inferior esquerre

Força vertical en l'ancoratge superior ($F_{u,z}$): Per aquest assaig s'utilitza una disposició similar a l'assaig amb força vertical en els ancoratges inferiors. S'utilitza el cilindre petit per aplicar la força. Tot i que a priori no ha de tenir afectació en els resultats, en el cas de l'assaig a compressió i a tracció s'ha disposat l'ancoratge superior de tal forma que el colís de muntatge d'aquest arribi a una de les posicions extremes tenint en compte el sentit de la força aplicada. Així s'evita que durant l'assaig hi hagi un possible lliscament de l'ancoratge al aplicar-hi la força (Figura 6.16).

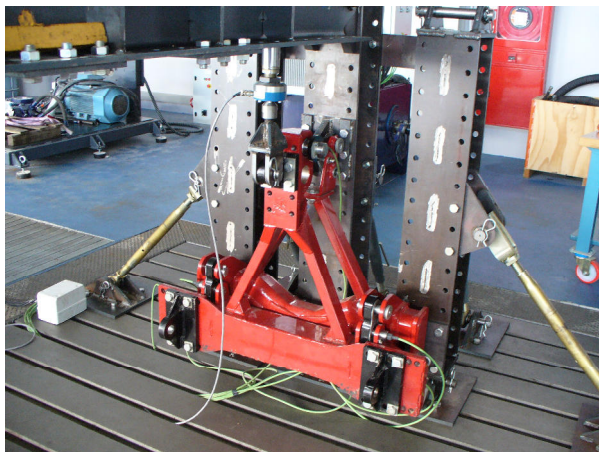


Figura 6.16: Assaig de força vertical en l'ancoratge superior

Força transversal en els ancoratges inferiors ($F_{br,y}$, $F_{bl,y}$): En aquesta configuració es disposa el cilindre petit en la direcció transversal per aplicar forces de fins a 50 kN. Es situa un pilar amb una base de fixació ajustable a la bancada per tal d'alinear el cilindre amb el forat dels ancoratges inferiors del dinamòmetre tripuntal. Amb l'utilatge dissenyat es pot realitzar tant l'assaig a tracció com a compressió, muntant adequadament la peça utilitzada en la unió de la cèl·lula de càrrega del cilindre amb l'ancoratge del tripuntal (Figura 6.17 i Figura 6.18).

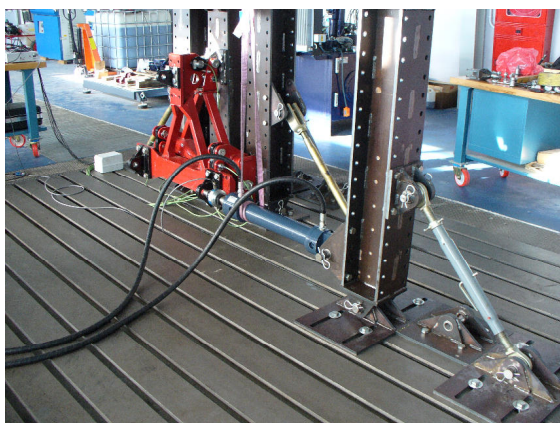


Figura 6.17: Assaig de força transversal en l'ancoratge inferior dret

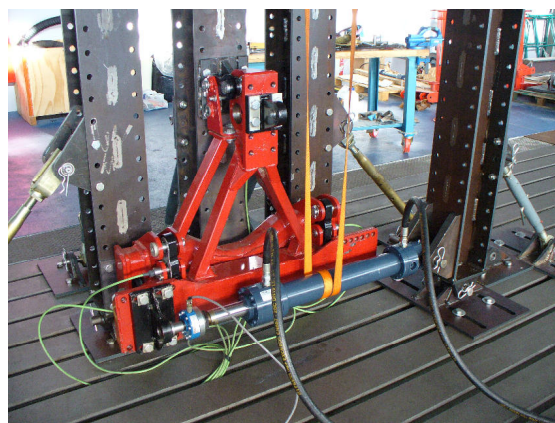


Figura 6.18: Assaig de força transversal en l'ancoratge inferior esquerre

Força inclinada en els ancoratges inferiors ($F_{br,xz}$, $F_{bl,xz}$): Per a l'aplicació de la força inclinada en els ancoratges inferiors es situa el cilindre muntat de tal manera que formi un angle de $26,6^\circ$ respecte la horitzontal. Aquesta és la disposició més pròxima que permeten els utilatges de la bancada per tal de disposar el cilindre de tal forma que, al aplicar una força, les components longitudinal i vertical d'aquesta corresponen al mateix percentatge de les components màximes mesurables segons el disseny del dinamòmetre. Així, si s'aplica una força màxima de 100 kN a tracció amb el cilindre s'obté una component longitudinal de 89,4 kN en sentit positiu i una component vertical de 44,7 kN en sentit negatiu. Igual que en els assajos de força longitudinal, en aquestes configuracions s'utilitza el cilindre gran i la cèl·lula de càrrega de 250 kN (Figura 6.19 i Figura 6.20).

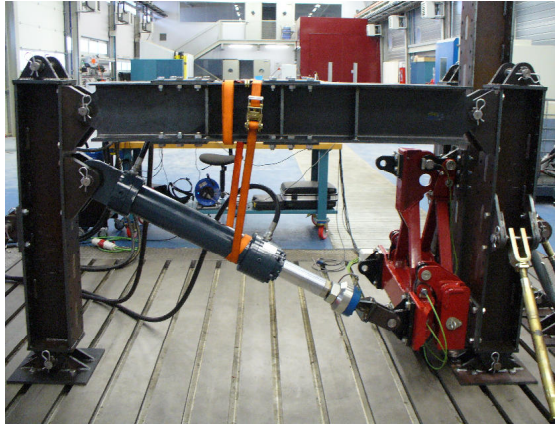


Figura 6.19: Assaig de força inclinada en l'ancoratge inferior dret

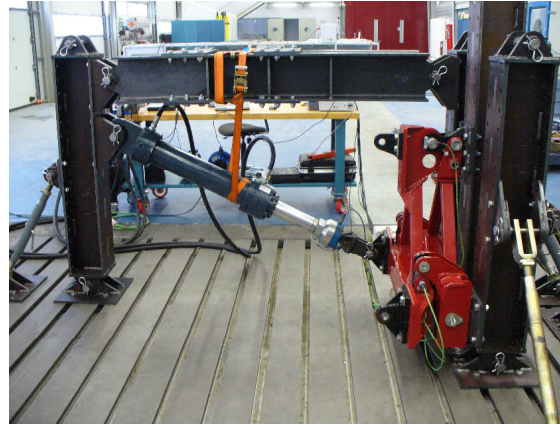


Figura 6.20: Assaig de força inclinada en l'ancoratge inferior esquerre

Força inclinada en ancoratge superior ($F_{u,xz}$): Per a l'aplicació de la força inclinada en l'ancoratge superior es situa el cilindre gran muntat de tal manera que formi un angle de $26,6^\circ$ respecte la horitzontal. En aquesta configuració, si s'aplica una força màxima a tracció de 100 kN amb el cilindre s'obté una component longitudinal de 89,4 kN positiva i una component vertical de 44,7 kN també positiva. Igual que en l'assaig de càrrega vertical sobre l'ancoratge superior, aquest ancoratge s'ha ajustat de tal forma que es trobi en una posició extrema del colís de muntatge, de forma que s'eviti el lliscament d'aquest durant l'assaig (Figura 6.21).

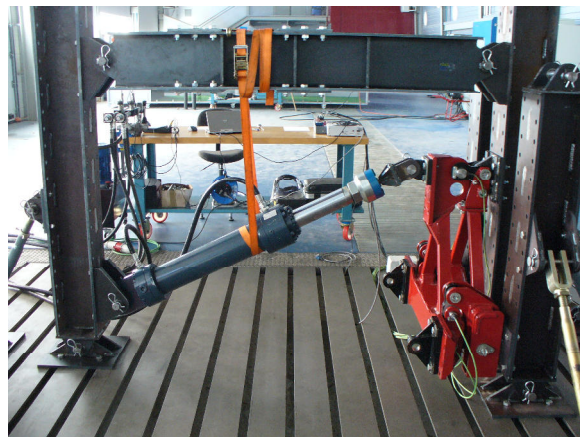


Figura 6.21: Assaig de força inclinada en l'ancoratge superior

Força central longitudinal ($F_{c,x}$): Per a la realització d'aquest assaig s'afegeix al dinamòmetre una barra transversal utilitzada en aplicacions agrícoles i que es fixa als dos ancoratges inferiors de l'enganxall de tres punts. Al punt central de la barra s'hi acobla el cilindre hidràulic gran disposat en la direcció longitudinal. La força màxima aplicada és de 80 kN tant a tracció com a compressió. No s'arriba als 100 kN a causa de les limitacions de resistència estructural de la barra transversal. Els ancoratges inferiors del dinamòmetre s'han ajustat a la dimensió que permet el correcte muntatge de la barra transversal (Figura 6.22).

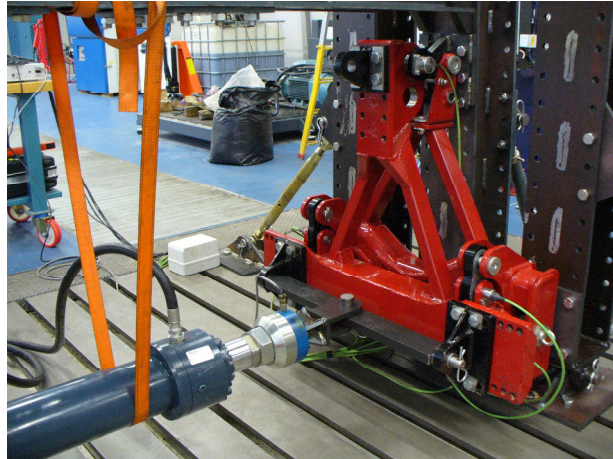


Figura 6.22: Assaig de força central longitudinal

Força central inclinada ($F_{c,xz}$): Per aquest assaig s'utilitza una disposició del cilindre gran equivalent a la utilitzada en els assajos de força inclinada en els ancoratges inferiors, però en aquest cas s'utilitza la barra transversal en el dinamòmetre (Figura 6.23).

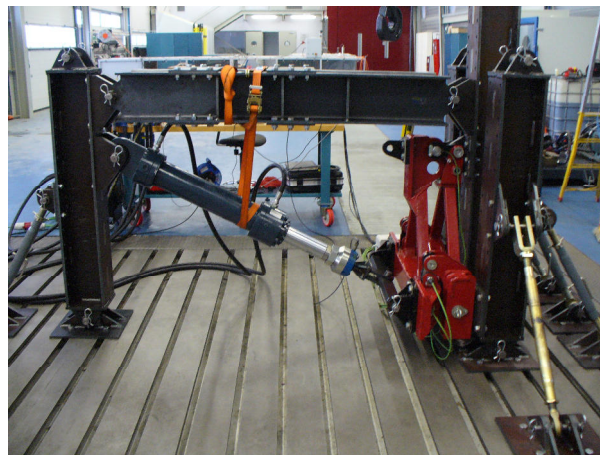


Figura 6.23: Assaig de força central diagonal

6.6. Tractament de les dades dels assajos experimentals

Un cop adquirides les dades dels senyals dels bolons de mesura del dinamòmetre i de la cèl·lula de càrrega del cilindre hidràulic en els assajos experimentals, cal tractar aquestes dades per a la validació del dinamòmetre. A la Figura 6.24 es mostra el procediment per a l'obtenció de tota la informació necessària per a la validació.

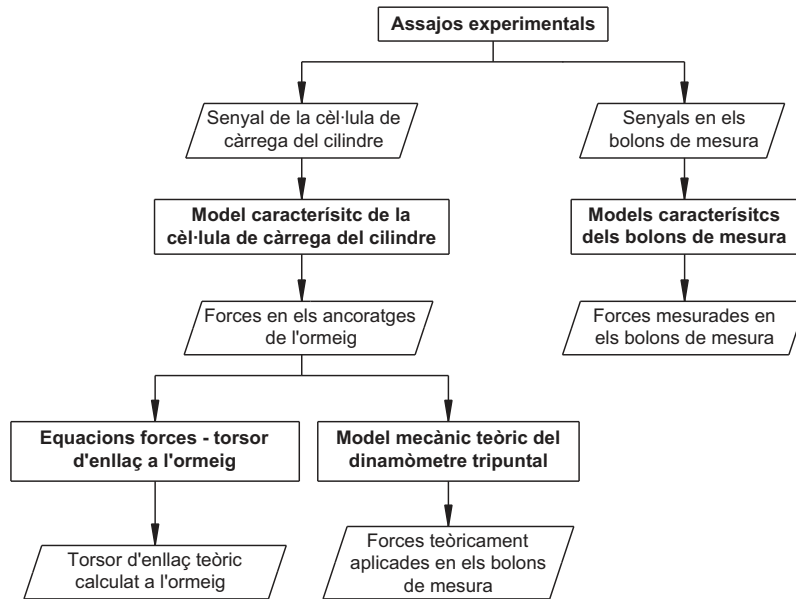


Figura 6.24: Procediment per al tractament de dades dels assajos experimentals

6.6.1. Determinació dels valors de referència dels senyals en els assaigs

Durant els cicles d'aplicació de forces s'han enregistrat contínuament cada 0,1 s els senyals dels 6 bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal i de la cèl·lula de càrrega del cilindre hidràulic. Per obtenir els valors de referència en els punts d'escalonament del cicles, s'ha calculat la mitjana dels valors dels senyals per a cada escalonament de 30 s de durada (la mitjana de 300 registres de senyal per a cada cèl·lula de càrrega).

Cada valor mitjà es pren com la mesura de senyal que s'utilitza per als càlculs posteriors. Cal tenir present també que, en el cas de la força aplicada, atès que el sistema de regulació de la pressió del circuit hidràulic no permet un ajust suficientment acurat d'aquesta, el valor aplicat pot diferir del teòricament desitjat. Per això, per a cada valor de referència, es llegeix el senyal de la cèl·lula de càrrega del cilindre per tal de tenir en compte la força real aplicada.

Amb les dades adquirides es comprova que la oscil·lació del senyal en les cèl·lules de càrrega del cilindre no supera el 0,2% del fons d'escala, per a cada un dels escalonaments en la seqüència de validació. Aquesta variació inclou l'error de la pròpia cèl·lula de càrrega, les variacions en la pressió del circuit hidràulic, l'error provocat per l'equip d'adquisició i el propi soroll ambiental. Per als bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal, l'oscil·lació observada en el senyal no supera el 0,3% del fons d'escala. Aquests valors de variació són petits en comparació a altres fonts d'error que s'analitzen més endavant i per tant no es tenen en compte a l'hora d'analitzar els errors en les mesures del dinamòmetre.

6.6.2. Càlcul dels valors de forces i moments teòricament aplicats

A partir dels valors de referència en el senyal de les cèl·lules de càrrega del cilindre, determinats a l'apartat anterior, es determina l'estat de càrrega del dinamòmetre en cada punt del cicle d'assaig. A continuació s'exposa el conjunt de forces i moments que es poden determinar en el dinamòmetre a partir de la informació d'aquestes cèl·lules de càrrega.

Càlcul de les forces en els ancoratges de l'ormeig

Com s'ha exposat en la definició dels cicles d'assaig, abans d'iniciar una seqüència d'assaig es determina el valor del senyal a càrrega nul·la de la cèl·lula de càrrega instal·lada al cilindre. Aquest valor s'enregistra sense muntar el boló que uneix l'ancoratge del dinamòmetre tripuntal amb l'utilatge d'acoblament del cilindre. Així es garanteix que no hi ha cap tipus de precàrrega entre els dos components. En el càlcul de la força aplicada es fa una distinció entre la sensibilitat a compressió i la sensibilitat a tracció tal i com s'especifica en el full de calibratge del fabricant de la cèl·lula de càrrega del cilindre (Taula 6.5). Aquests valors defineixen les rectes de la cèl·lula de càrrega que permeten calcular la força aplicada a l'ancoratge del dinamòmetre en funció del senyal d'aquesta.

Càlcul de les forces teòricament aplicades en els bolons a partir del model mecànic teòric del dinamòmetre

Un cop es coneix el valor de força aplicada a l'ancoratge del dinamòmetre, a més del punt d'aplicació i de la direcció de la força, el següent pas consisteix en determinar les forces als 6 bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal. Per aquest càlcul s'utilitza el model desenvolupat del dinamòmetre (Apartat 4.2), on a partir de les forces a la part de l'ormeig es calculen les forces als 6 bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal.

Càlcul del torsor d'enllaç entre el dinamòmetre i l'ormeig

A partir de les mateixes dades que en el punt anterior es determina també el torsor d'enllaç equivalent aplicat a la part de l'ormeig del dinamòmetre. Amb aquest càlcul s'obtenen les 3 components de força i les 3 components de moment en l'enllaç del dinamòmetre amb l'ormeig reduïts al punt central de la línia formada pels ancoratges inferiors.

6.7. Estudi de l'estabilitat de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre

En aquest apartat es valoren un conjunt d'aspectes de les cèl·lules de càrrega tipus boló del dinamòmetre que són necessaris per al correcte funcionament de l'equip de mesura. S'estudia si les cèl·lules de càrrega tenen un comportament estable, per tal de valorar si els bolons de mesura del dinamòmetre responen amb el mateix senyal per una mateixa força donada, independentment de l'historial previ de càrregues. La precisió en la mesura (la proximitat de la mesura al valor real) s'analitza més endavant a la validació del model teòric del dinamòmetre (Apartat 6.8).

Tot i que el fabricant ja especifica quines són les desviacions màximes en la mesura que tenen les cèl·lules de càrrega en forma de boló, aquestes estan muntades en l'estructura del dinamòmetre, i això pot afectar al correcte funcionament d'aquestes. Per això és d'interès realitzar una anàlisi dels tipus d'errors en els bolons de mesura muntats en l'estructura del dinamòmetre.

Per a aquesta anàlisi s'estudien, a partir de les dades dels assajos experimentals realitzats amb el dinamòmetre, diversos paràmetres que quantifiquen el correcte funcionament dels bolons de mesura. En concret, per a cada una de les cèl·lules de càrrega tipus boló instal·lades en el dinamòmetre tripuntal s'estudia el seu comportament des del punt de vista de l'error a càrrega nul·la, la linealitat, la repetibilitat, la reversibilitat, la sensibilitat i la fluència.

Molts autors, per a la valoració de l'error total en la mesura d'un sensor, realitzen un estudi de la incertesa combinant els errors particulars de linealitat, repetibilitat, etc. [95]. També el procediment ME-002 del CEM [93] i la norma UNE-EN ISO-376 [94] utilitzen aquests mètodes per a l'estimació de la qualitat de la mesura d'una cèl·lula de càrrega. Cal tenir present però, que aquests càlculs d'incertesa són procediments on, segons l'estudi realitzat, es tenen en compte més o menys factors, i per tant s'obtenen resultats més o menys representatius de la realitat. Cal destacar també que en molts casos no es pot distingir clarament la tipologia exacta de l'error. Per exemple, al finalitzar un assaig de reversibilitat, l'error pot ser tant atribuïble a l'error d'histèresis com a l'error del senyal a càrrega nul·la.

6.7.1. Determinació dels errors associats a cada boló de mesura

Per a aquest estudi s'analitza el senyal de resposta de cada cèl·lula de càrrega del dinamòmetre al aplicar-hi una força coneguda. Per a l'estudi dels errors en cada boló de mesura s'utilitzen les dades corresponents als assajos on aquests reben les càrregues més grans, tant a tracció com a compressió, definits a la Taula 6.3.

Per a l'estudi dels errors es calcula la recta de regressió general, a partir de totes les dades obtingudes en l'assaig experimental corresponent (dades dels cicles 1, 2, 3 i 4, tant per als assajos de càrrega positiva com negativa), i una recta de regressió lineal per cadascun dels cicles. També es determinen per a cada un dels 8 cicles els splines cúbics interpoladors que millor s'ajusten a les dades de cada cicle d'assaig. El càlcul de les rectes de regressió, dels splines i el càlcul dels diferents errors es realitza mitjançant un programa desenvolupat en Matlab[®].

A continuació es descriuen els diferents errors que poden afectar a la mesura [95]. A la Figura 6.25 es mostren els errors absoluts màxims E_{max} analitzats entre els diferents cicles (només es representen pels assajos en càrrega positiva, i són equivalents per als casos en càrrega negativa).

$$e_R = \frac{E_{R,\max}}{FSO} = \frac{|S_{c1} - S_{c2}|_{\max}}{FSO} \quad 6.3$$

Error de reversibilitat o d'histèresis (e_H): L'error d'histèresis es determina a partir de la màxima diferència dels valors de senyal entre el cicle de força creixent i el corresponent cicle de força decreixent (S_{c3} i S_{c4}), a partir dels dos splines determinats amb dades dels cicles 3 i 4 de cada assaig (Equació 6.4).

$$e_H = \frac{E_{H,\max}}{FSO} = \frac{|S_{c3} - S_{c4}|_{\max}}{FSO} \quad 6.4$$

Error de sensibilitat (e_K): L'error de sensibilitat es defineix com la diferència entre l'estimació del valor en fons d'escala d'un cicle concret respecte a l'estimació del valor de referència (Equació 6.5). Per a aquest càlcul es determina per a cada un dels 8 cicles la sensibilitat a partir de la recta de regressió del cicle analitzat (K_c). Com a referència es pren la sensibilitat de la cèl·lula de càrrega calculada a partir de la recta de regressió de totes les dades de l'assaig tant a tracció com a compressió (K_{ref}).

$$e_K = \frac{E_K}{FSO} = \frac{K_c \cdot F_{\max} - K_{ref} \cdot F_{\max}}{FSO} \quad 6.5$$

Error de fluència (e_F): L'error de fluència es defineix com la diferència del senyal entre els 30 s i els 300 s després de deixar d'aplicar la força màxima a la cèl·lula de càrrega (Equació 6.6). Aquest error s'analitza tant per a força en el boló en sentit positiu com en sentit negatiu.

$$e_F = \frac{E_F}{FSO} = \frac{S_{300s} - S_{30s}}{FSO} \quad 6.6$$

6.7.2. Resultats de l'estudi dels errors en els bolons de mesura

A la Taula 6.6 es presenta, per a cada cèl·lula de càrrega del dinamòmetre, l'error relatiu màxim per a cada tipus d'error analitzat, tenint en compte tant els assajos a tracció com a compressió.

Taula 6.6: Error relatiu màxim per a cada factor analitzat per als bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal

Boló de mesura	e_Z	e_L	e_R	e_H	e_K	e_F
1	0,727%	0,342%	0,109%	0,498%	1,734%	0,024%
2	1,693%	2,628%	0,251%	1,907%	3,334%	0,047%
3	1,613%	1,747%	0,657%	1,095%	4,530%	0,108%
4	0,147%	1,695%	0,224%	1,107%	1,390%	0,036%
5	0,374%	1,100%	0,139%	0,914%	2,440%	0,009%
6	0,058%	5,606%	0,371%	5,528%	4,834%	0,042%

En general es pot afirmar que els errors de zero entre l'inici i el final dels cicles de càrregues són reduïts. També es pot concloure que els bolons de mesura tenen un comportament lineal i una bona repetibilitat. En general també s'observa que l'efecte d'histèresis és reduït i que no s'aprecia fluència en els bolons de mesura. També es comprova que els bolons de mesura es comporten adequadament si es comparen aquests resultats amb els d'altres dinamòmetres exposats en l'estat de l'art.

El cas més crític correspon al boló de mesura 6 per a la mesura de la component transversal de força. En aquest, els errors de linealitat, histèresis i sensibilitat són bastant importants comparats amb la resta del bolons de mesura. Més endavant, a l'Apartat 6.8 es detecta un problema en el comportament d'aquest boló de mesura, atribuïble a les toleràncies de muntatge i les friccions internes entre els components dels dinamòmetre.

Es pot observar també que els errors de sensibilitat són importants. Aquests errors són conseqüència d'un comportament diferenciat entre les càrregues a compressió i les càrregues a tracció, tal com es veurà també a l'Apartat 6.8, i que són atribuïbles als desajustos en el muntatge que provoquen repartiments de força diferents a compressió i a tracció.

6.8. Validació del model teòric del dinamòmetre tripuntal

El dinamòmetre tripuntal s'ha desenvolupat amb l'objectiu de mesurar cada una de les 3 components de força i de les 3 components de moment del torsor d'enllaç amb l'ormeig. En aquest apartat s'analitza quant properes són les mesures d'aquestes components als valors aplicats en els diferents assajos experimentals, i s'identifiquen i es quantifiquen els errors corresponents.

A la Figura 6.26 es mostra el procediment seguit per a la validació del model teòric que permet determinar el torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals mesurats. A partir de les dades obtingudes en els diversos assajos experimentals, s'utilitzen els valors de senyal de cada boló per determinar el torsor d'enllaç mesurat a l'ormeig i comparar-lo amb el torsor d'enllaç aplicat en cada assaig.

Per a la determinació de les equacions per a cada component de força o moment del torsor d'enllaç a l'ormeig, primerament cal determinar les forces mesurades per cada boló de mesura. Per aquest pas s'utilitzen les dades facilitades en els fulls de calibratge realitzats pel fabricant d'aquests bolons. Les rectes característiques dels bolons de mesura (les equacions que relacionen els senyals d'aquests amb la força mesurada) es mostren a la Taula 6.7.

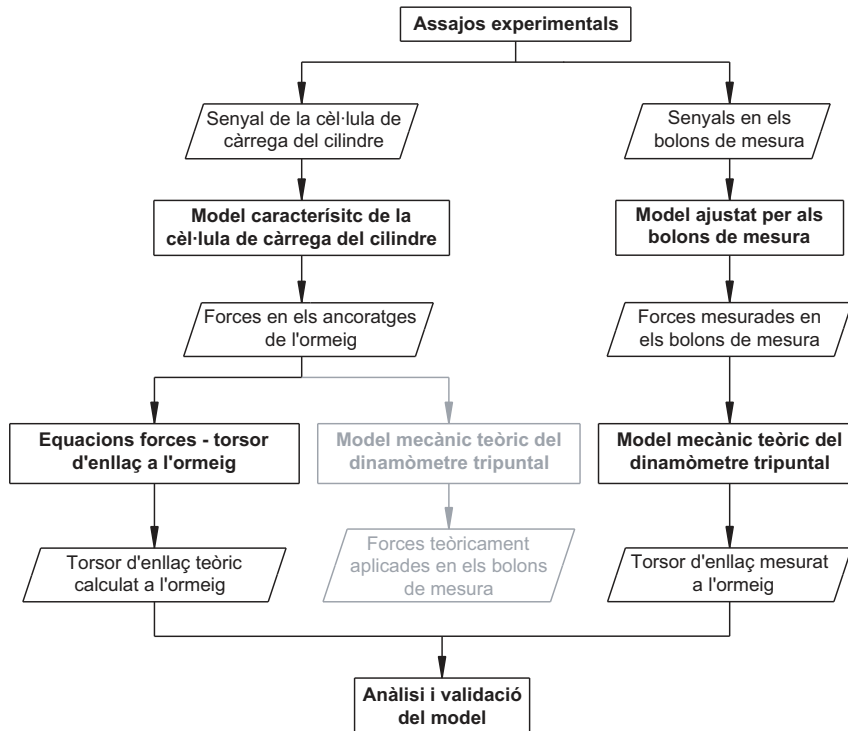


Figura 6.26: Procediment per a la validació del model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

Taula 6.7: Rectes característiques de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre segons les dades del full de calibratge del fabricant (forces en kN i senyals en V/V)

$F_{1,m} = -100150 \cdot S_1 - 0,020$	$F_{4,m} = 100190 \cdot S_4 + 0,130$
$F_{2,m} = 49990 \cdot S_2 - 0,050$	$F_{5,m} = 99780 \cdot S_5 + 0,359$
$F_{3,m} = 49975 \cdot S_3 - 0,015$	$F_{6,m} = 50015 \cdot S_6 + 0,055$

Per obtenir el torsor d'enllaç mesurat a l'ormeig, s'utilitzen les equacions descrites en el capítol de modelització del dinamòmetre tripuntal (Capítol 4). Les rectes característiques dels bolons de mesura subministrades pel fabricant es substitueixen a les equacions del torsor d'enllaç entre marcs del dinamòmetre (Taula 4.5) i aquestes a les del càlcul per al torsor d'enllaç a l'ormeig (Taula 4.8). Així s'obté el model que relaciona directament els senyals dels bolons de mesura amb les components de força i moment a l'ormeig (Taula 6.8). En el desenvolupament es considera el cas on el dinamòmetre treballa horitzontalment, on el pes actua només en la direcció z de la referència del dinamòmetre.

Taula 6.8: Model teòric per al càlcul de les components del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals dels bolons de mesura (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_{x,i} &= -100150 \cdot S_1 + 100190 \cdot S_4 + 99780 \cdot S_5 + 0,469 \\
 F_{y,i} &= 50015 \cdot S_6 + 0,055 \\
 F_{z,i} &= 49990 \cdot S_2 + 49975 \cdot S_3 - 1,204 \\
 M_{x,i} &= -16846,630 \cdot S_2 + 16841,575 \cdot S_3 + 3188,456 \cdot S_6 + 0,005 \\
 M_{y,i} &= -74361,375 \cdot S_1 - 8648,270 \cdot S_2 - 8645,675 \cdot S_3 + 0,162 \\
 M_{z,i} &= 35216,785 \cdot S_4 - 35072,670 \cdot S_5 + 14079,222 \cdot S_6 - 0,065
 \end{aligned}$$

Per a la comparativa entre el torsor d'enllaç aplicat en els assajos experimentals i el torsor determinat a partir de les mesures dels bolons i el model mecànic teòric, es representen els residuals corresponents a cada una de les components i per a totes les mostres n obtingudes en els assajos experimentals, i que es calculen a partir de la diferència entre les forces o moments aplicats ($F_{a,i}$) i les forces o moments mesurats amb el model teòric ($F_{m,i}$) (Equació 6.7).

$$E_{F,i} = F_{a,i} - F_{m,i} \quad (i=1 \dots n) \quad 6.7$$

Les dades utilitzades en la comparació són les obtingudes en tots els assajos experimentals, corresponents als 1r, 2n 3r i 4t cicle de cada assaig, tant en els assajos a força positiva com negativa. A la Figura 6.27 es mostren els residuals per a cadascuna de les components del torsor d'enllaç, i es representa en diferents colors o formes dels punts cada configuració de la força d'assaig (de $F_{bl,x}$ a $F_{u,z}$).

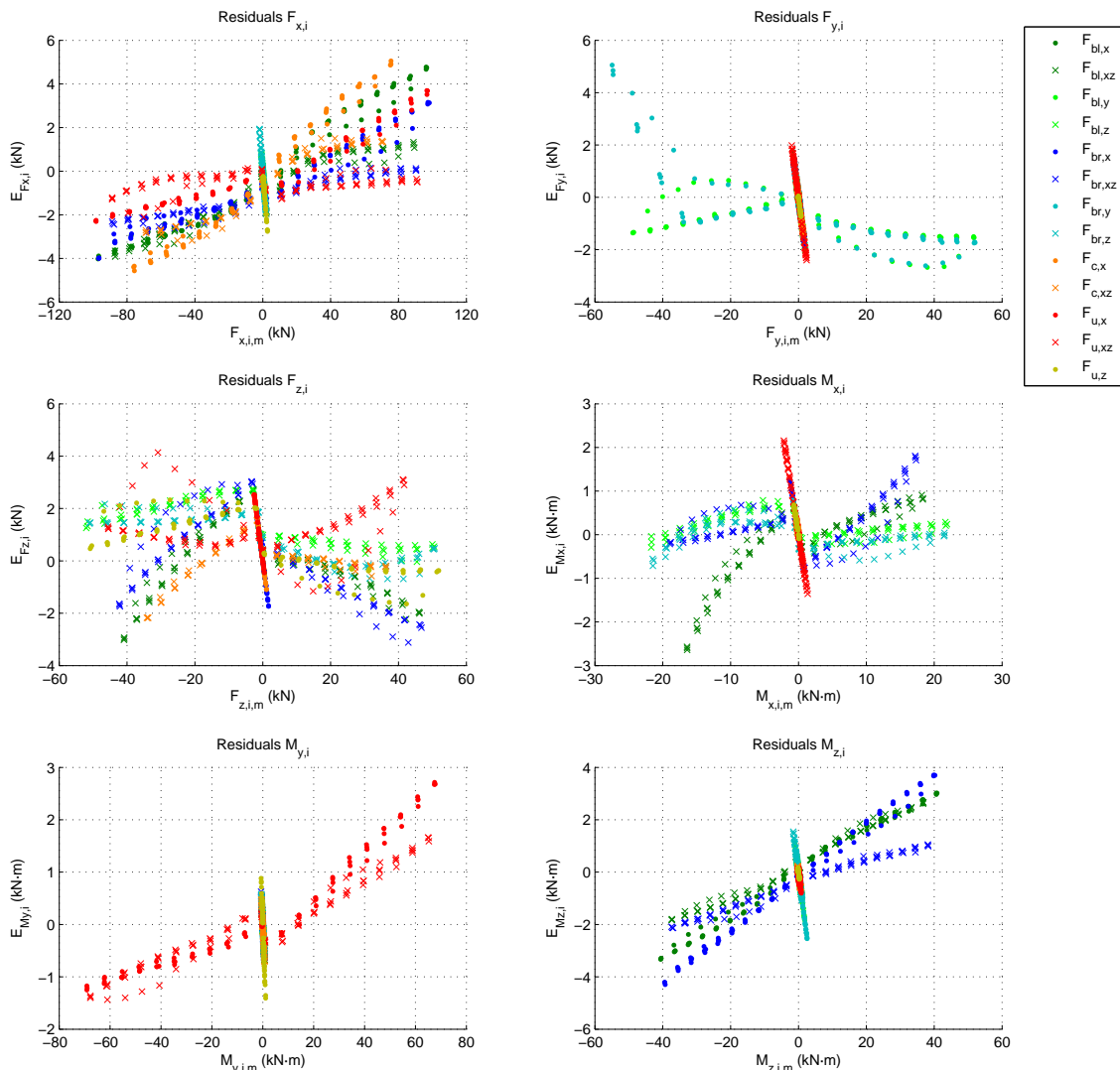


Figura 6.27: Resultats dels residuals per al model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

En general s'observa que els errors en el càlcul del torsor d'enllaç arriben en alguns casos al 10% del fons escala de cada component. Els errors més grans es troben generalment en els punts on es mesura el valor màxim de la component. En aquests

casos, on la component mesurada adquireix una magnitud important, (per exemple, en els assajos de força longitudinal i diagonal en la component $F_{x,i}$), s'observa que els residuals segueixen tendències, on l'error en la mesura s'incrementa en augmentar la magnitud de la força aplicada, i per tant s'identifica una sensibilitat menor a l'esperada.

També en tots els gràfics, per a valors mesurats pròxims a zero, queden representats residuals en forma de recta, corresponents als assajos on teòricament la component mesurada hauria de ser zero (per exemple, els assajos de força transversal i vertical en la component $F_{x,i}$). Aquests errors es deuen a la sensibilitat creuada que experimenten els bolons de mesura utilitzats en el càlcul d'aquesta component, doncs mostren uns determinats senyals quan aquests haurien de ser zero.

Per a la component longitudinal de força $F_{x,i}$ s'observen errors en la mesura que arriben als 5 kN. A més es comprova que els residuals segueixen una tendència en forma de recta diferent per a cada assaig, però sempre en una distribució que indica una disminució de la sensibilitat, amb una mesura de la component longitudinal menor a la realment aplicada. Per al cas de la component transversal $F_{y,i}$, on només s'utilitza el boló de mesura 6 per al càlcul d'aquesta, s'observa un comportament poc lineal, sobretot per a l'assaig a càrrega $F_{br,y}$ negativa, amb errors que arriben als 5 kN. Per a la component vertical $F_{z,i}$ s'observa que entre els assajos a força vertical positiva i negativa hi ha diferències importants en les tendències dels residuals, aspecte que evidencia un comportament diferenciat en els dos sentits.

En relació a les components del moment, per a $M_{x,i}$ s'observa un distribució dels residuals força dispersa, on en algun cas, com per exemple en l'assaig $F_{u,xz}$ apareix una sensibilitat creuada important. Per als casos $M_{y,i}$ i $M_{z,i}$, donada la distribució dels residuals, s'observa que les mesures d'aquestes són inferiors a les esperades.

En general, els errors en les mesures són considerables, i superiors al que s'esperava tenint en compte el disseny conceptual del dinamòmetre. A part de possibles desviacions en la magnitud i direcció de la força aplicada als ancoratges del dinamòmetre tripuntal mitjançant els cilindres hidràulics, i que es consideren poc importants, s'identifiquen diverses possibles causes d'aquestes desviacions:

- Un possible desajust en el comportament dels propis bolons de mesura.
- Els paràmetres reals i efectius del model mecànic del dinamòmetre, que relacionen les forces en els ancoratges de l'ormeig amb les forces en els bolons de mesura, poden ser diferents als teòricament considerats a partir de les cotes de disseny i de muntatge del conjunt.
- Les toleràncies en el muntatge, el fregament en els enllaços mòbils del dinamòmetre i les deformacions dels diferents components sotmesos a càrrega poden afectar a l'equilibri de forces entre els marcs del dinamòmetre, i provoquen repartiments diferents de les càrregues entre els diversos bolons respecte al cas ideal i comportaments desiguals d'aquests segons el sentit de la força teòrica a la que estan sotmesos.

6.9. Validació del comportament dels bolons de mesura en el dinamòmetre

Per analitzar millor les desviacions observades en la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig, és convenient també analitzar les desviacions en cada un dels bolons de mesura del dinamòmetre.

A partir de les dades obtingudes en els diversos assajos experimentals, s'utilitzen els valors de senyal de cada boló de mesura i la força teòricament aplicada en cadascun d'ells, determinada a partir de la força aplicada en l'assaig i del model mecànic teòric del dinamòmetre, per tal de validar-ne el correcte funcionament. A la Figura 6.28 es mostra el procediment seguit per a realitzar aquesta validació.

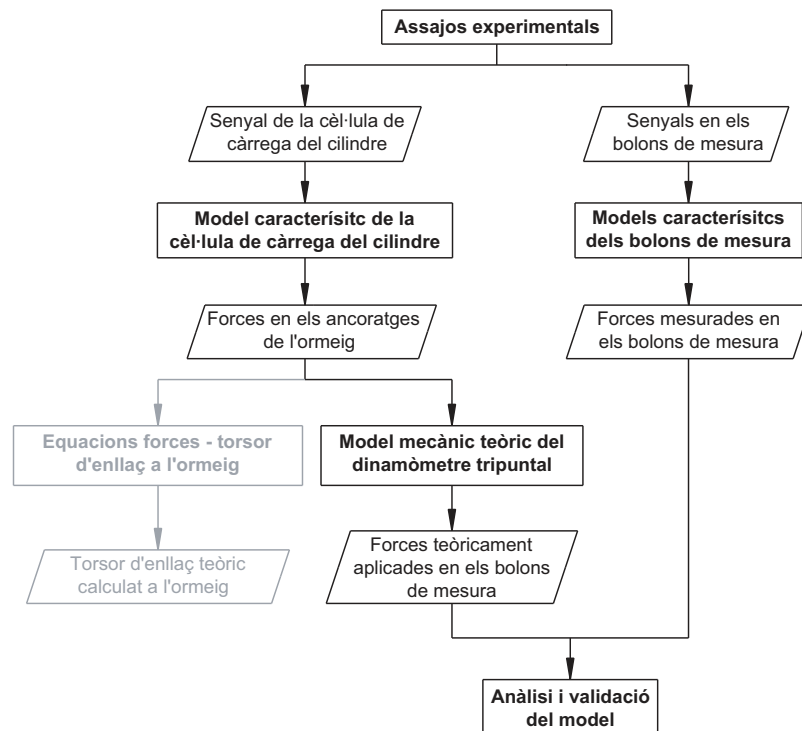


Figura 6.28: Procediment per a la validació del model teòric per al dinamòmetre tripuntal

Per a la comparativa entre les forces teòricament aplicades i les forces mesurades es calculen els residuals corresponents a cada boló de mesura a partir de la diferència entre les forces aplicades, calculades amb el model mecànic teòric, i les mesurades en cada boló, mitjançant les rectes característiques dels fulls de calibratge, de forma equivalent a la comparativa de les components del torsor d'enllaç a l'ormeig (Equació 6.7).

A la Figura 6.29 es mostren els residuals per a cadascuna de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre tripuntal. De la mateixa manera que a la Figura 6.27, aquests residuals es representen en diferents colors o formes del punt corresponents a cada configuració de la força d'assaig (de $F_{bl,x}$ a $F_{u,z}$), corresponents als 1r, 2n 3r i 4t cicle de cada assaig, tant en els assajos a força positiva com negativa.

En els resultats, s'observen desviacions que arriben al 10% del fons d'escala del boló de mesura. Aquest aspecte és un indicatiu de que, o el comportament del boló de mesura real dista considerablement de l'especificat segons el fabricant, o que el repartiment de les

forces en cada boló de mesura al aplicar càrregues al dinamòmetre no corresponen al teòricament esperat.

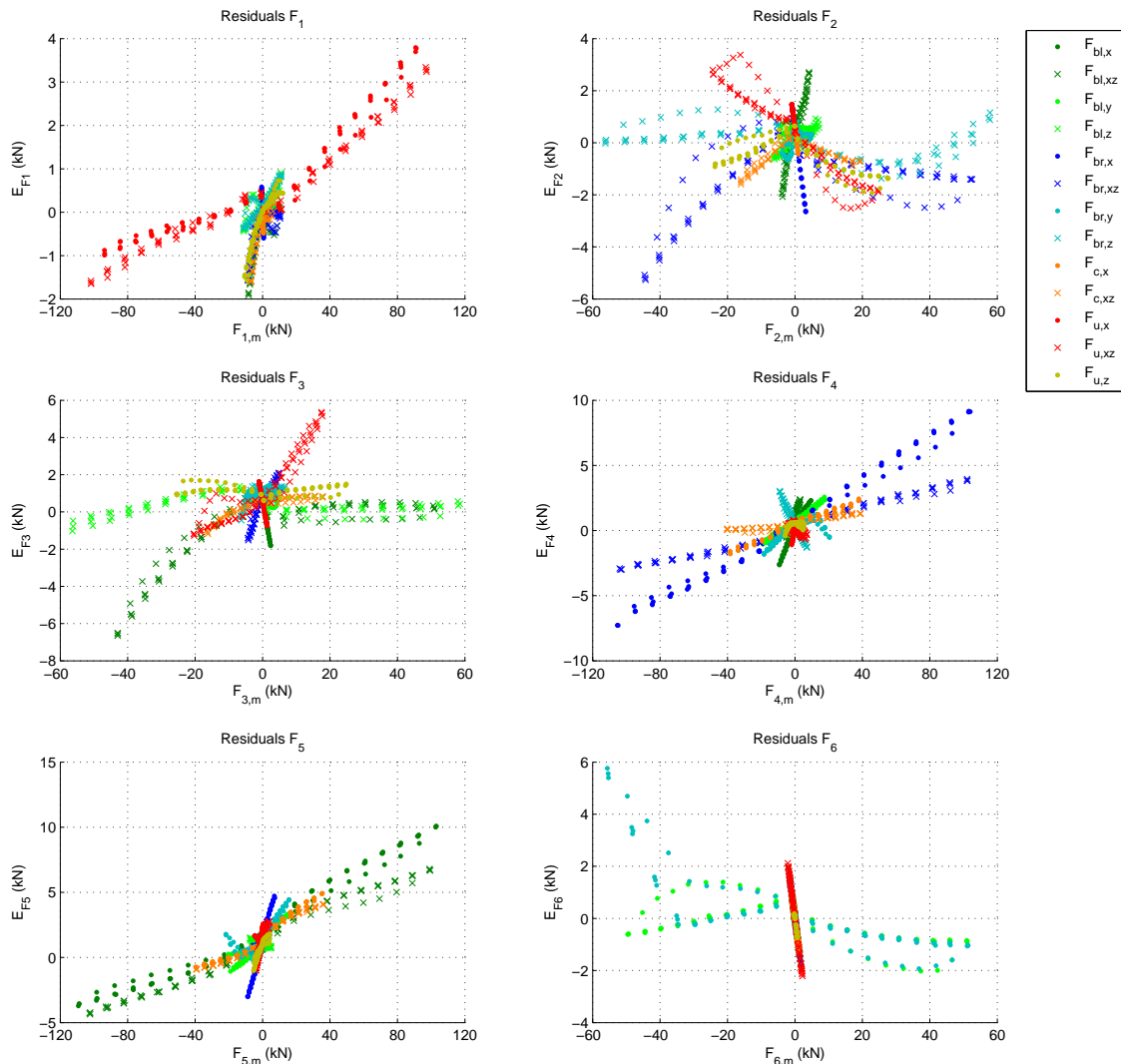


Figura 6.29: Resultats dels residuals per al model de càlcul de les forces als bolons de mesura a partir de les dades del full de calibratge

Per a la cèl·lula de càrrega 1, corresponent a la situada en el punt superior i que mesura en la direcció longitudinal, apareixen desviacions quan se li aplica una càrrega important en la direcció de mesura, situacions que es donen en els assajos $F_{u,x}$ i $F_{u,xz}$. Donada la forma dels residuals es pot afirmar que la sensibilitat és més reduïda que l'especificada, amb valors de força mesurada, en valor absolut, menors als esperats. La tendència dels residuals en aquests assajos mostra que en càrrega negativa es té un pendent menys pronunciat que en càrrega positiva. Això posa de manifest que el comportament del sensor no és igual a tracció que a compressió.

Les cèl·lules de càrrega 2 i 3, corresponents als sensors a dreta i esquerra que mesuren càrrega vertical, sí que tenen un error reduït en els assajos $F_{br,z}$ i $F_{bl,z}$ respectivament, corresponents a la força principal que han de mesurar. Però quan es combina amb aquestes la força longitudinal (assajos $F_{br,xz}$ i $F_{bl,xz}$) aquests experimenten errors importants, i posen de manifest que apareixen errors provocats per sensibilitat creuada.

Aquest efecte, però, només és apreciable per a forces negatives en els bolons de mesura, el que evidencia un comportament diferenciat en un i altre sentit d'aplicació de la força.

Els bolons de mesura 4 i 5, que mesuren les forces longitudinals a dreta i esquerra ($F_{br,x}$ i $F_{bl,x}$ respectivament), tenen un senyal inferior a l'esperat, igual que en el boló de mesura 1, i per tant mesuren menys força que l'aplicada teòricament, ja que els residuals de l'assaig corresponent formen una recta creixent. Per als casos de força combinada als ancoratges inferiors, aquests bolons de mesura també experimenten desviacions dels valors mesurats respecte els aplicats, i que evidencien una sensibilitat creuada en aquests bolons.

El boló de mesura 6 en general té un bon comportament a la carrega transversal excepte per al cas de la càrrega en $F_{br,y}$ negativa, on a partir de -30 kN hi ha un canvi en la tendència dels residuals. Aquest efecte pot estar provocat per un reajust en les articulacions de les bieles i que provoca un canvi del comportament del sensor segons la força aplicada. També es pot comprovar amb els residuals que, comparat amb la resta de cèl·lules de càrrega, aquesta té una major histèresis i menys linealitat, com ja s'ha comprovat en l'estudi del comportament de cada boló de mesura (Taula 6.6).

De la mateixa manera que en el cas de les components del torsor d'enllaç, en els valors de força pròxims a zero, hi queden els residuals distribuïts en forma de recta, cosa que indica sensibilitat creuada en el boló analitzat. Aquest aspecte es visualitza en els bolons de força vertical (bolons 2 i 3) on aquests es veuen afectats per la força longitudinal aplicada a l'ancoratge més pròxim o la força vertical aplicada al boló complementari (el boló 2 es veu afectat per les càrregues $F_{br,x}$ i $F_{bl,z}$). Els bolons de mesura longitudinals a la part inferior de dinamòmetre (bolons 4 i 5) experimenten el mateix efecte, i s'observa sensibilitat creuada per al cas de força vertical pròxima al boló (el boló 4 es veu afectat per les càrregues en la direcció $F_{br,z}$).

En general es pot afirmar que en el comportament dels bolons de mesura del dinamòmetre hi ha desviacions importants entre la força teòricament aplicada i la mesurada, amb errors que en determinats casos arriben gairebé al 10% del valor nominal del boló de mesura i que segueixen certs patrons que depenen del cas. Això posa de manifest que el muntatge del dinamòmetre afecta a la distribució de les forces i per tant a les mesures realitzades pels diferents bolons de mesura, ja que errors tan grans no poden ser atribuïts únicament al propi boló de mesura.

7. MODELS D'AJUST EXPERIMENTAL PER A LA MESURA AMB EL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL

Un cop analitzat el model teòric per a la mesura del torsor d'enllaç amb l'ormeig, donades les desviacions observades, es considera convenient proposar nous models que ajustin millor el comportament del dinamòmetre a partir de les dades obtingudes en els assajos experimentals. En aquest apartat es desenvolupen diversos models, uns basats en l'ajust dels bolons de mesura, i altres on es busca un ajust global del comportament del dinamòmetre, tenint en compte els bolons de mesura i tot el model mecànic dels elements que l'integren.

7.1. Descripció dels models d'ajust experimental per al dinamòmetre tripuntal

Ajust experimental dels models dels bolons de mesura

En el model teòric desenvolupat en el capítol anterior s'admet que els bolons de mesura estan adequadament calibrats abans de muntar-los en el dinamòmetre, i que el sistema mecànic es comporta de forma ideal. A partir de l'anàlisi dels residuals en la validació experimental, s'intueix que això pot no ser així, doncs s'observen desviacions entre els valors de força teòricament aplicats a cada boló de mesura i el valor de força mesurat amb les dades del full de calibratge de cada boló, i per tant es considera convenient definir un nou model per als bolons de mesura.

Per ajustar el comportament del boló, la millor opció seria desmuntar els bolons del dinamòmetre per realitzar un calibratge de forma individualitzada, ja sigui en un laboratori homologat o amb el mateix equipament utilitzat per als assajos amb el dinamòmetre tripuntal, i comprovar-ne el correcte funcionament. Això no ha estat possible en el desenvolupament d'aquesta tesi, i en el seu lloc el que s'ha fet és un ajust dels models matemàtics dels bolons a partir de les dades experimentals disponibles. Cal destacar que aquesta metodologia és àmpliament utilitzada en el calibratge i validació d'altres dinamòmetres per a enganxalls tripuntals (Apartat 2.2).

El procediment per a la determinació d'aquests models es mostra a la Figura 7.1, on a partir dels senyals mesurats per cada boló de mesura i de la força que s'hi aplica, es determinen els paràmetres del model pel mètode dels mínims quadrats.

En base a aquests models ajustats dels bolons de mesura es proposa el següent model per a la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig amb el dinamòmetre:

- Model per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig mitjançant les equacions del model mecànic teòric del dinamòmetre i els models ajustats dels bolons de mesura (model 1).

Per tant, en aquest model 1 s'utilitzen les equacions teòriques que relacionen les forces entre els bolons de mesura i les components del torsor d'enllaç a l'ormeig (exposades a l'Apartat 6.8), però en aquest cas s'utilitzen els models dels bolons ajustats

experimentalment en comptes de les dades dels fulls de calibratge del fabricant d'aquests.

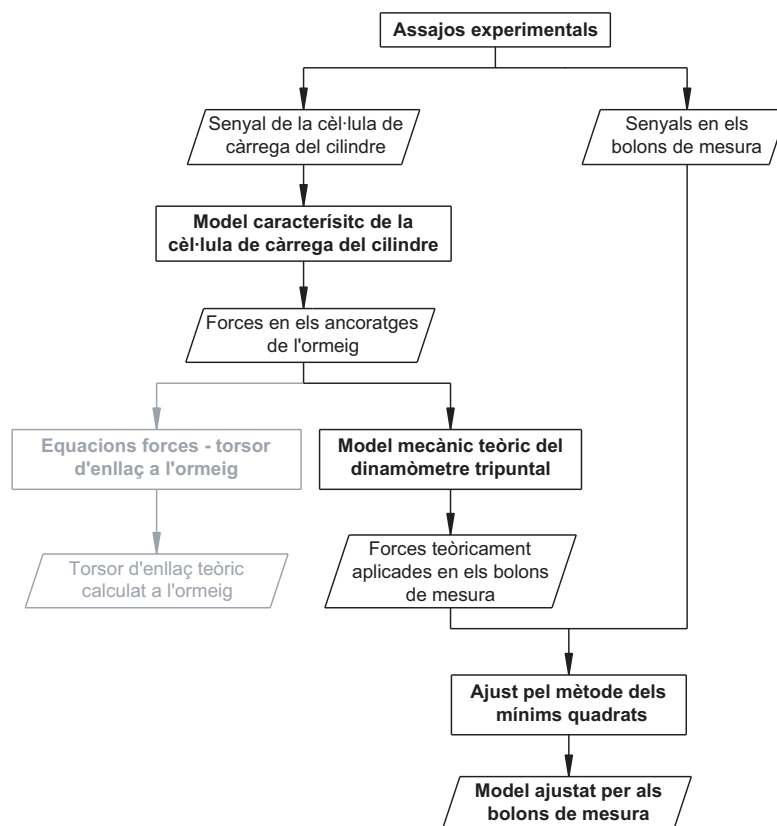


Figura 7.1: Procediment per al càlcul dels models d'ajust experimental dels bolons de mesura del dinamòmetre

Ajust del model de tot el conjunt del dinamòmetre

Una altra alternativa consisteix en realitzar un ajust del model del dinamòmetre en conjunt, de forma que es relacionin directament els senyals mesurats en els bolons de mesura del dinamòmetre amb el torsor d'enllaç a l'ormeig.

Aquest model global inclou els models de dos sistemes que es suposa que tenen un comportament lineal. El primer sistema és el conjunt de 6 bolons de mesura, en el que cada senyal és proporcional a la força a la que està sotmès el boló corresponent. El segon sistema és el conjunt mecànic del dinamòmetre, en el que, si es considera que està en equilibri, les forces en els bolons es relacionen linealment amb les forces en els 3 ancoratges per acoblar l'ormeig amb el dinamòmetre. Per tant, de les hipòtesis considerades, es dedueix que les components de força i moment en l'enllaç entre el dinamòmetre i l'ormeig vénen determinades per una aplicació lineal en funció dels senyals als bolons, i aquest model lineal és el que es pretén definir mitjançant l'ajust amb dades experimentals.

El procediment per a la determinació d'aquest tipus de model està representat a la Figura 7.2, on a partir del torsor d'enllaç aplicat en l'assaig i els senyals mesurats en el dinamòmetre, es determinen els paràmetres del model mitjançant el procediment d'ajust per mínims quadrats.

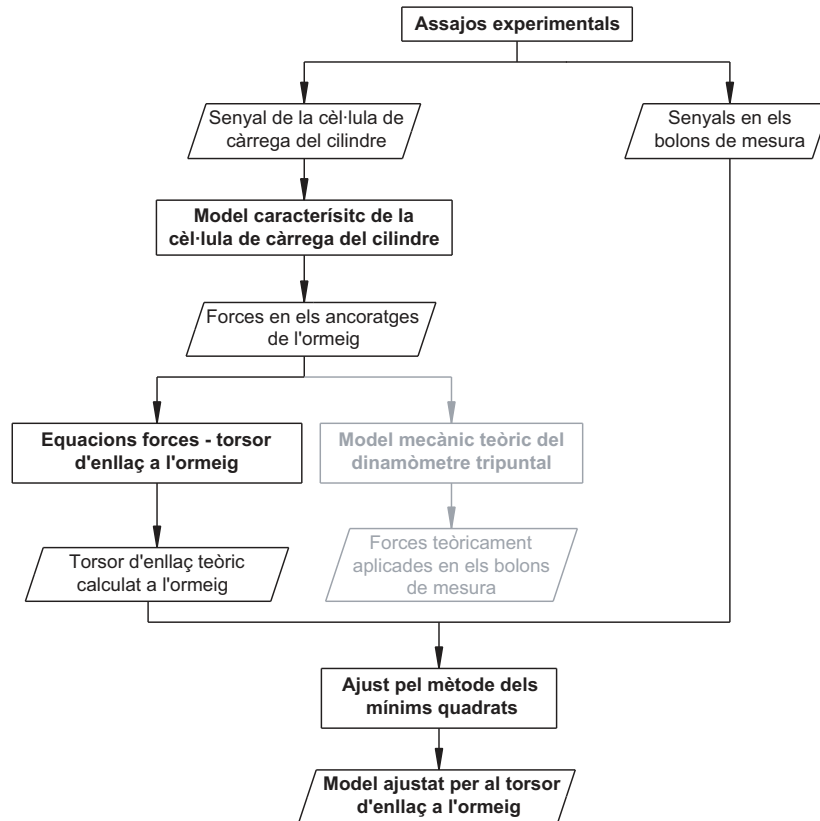


Figura 7.2: Procediment per al càlcul dels models d'ajust experimental del dinamòmetre per a la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig

Mitjançant aquest procediment es proposen dos tipus de models diferents:

- Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals dels bolons que intervenen teòricament en cada mesura (model 2).
- Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir de tots els senyals dels bolons de mesura (model 3).

En el model 2, per a la determinació de les components de força i moment a l'ormeig s'utilitzen aquells senyals dels bolons de mesura que estan directament vinculats a la mesura que es pretén realitzar. Així, per exemple, per a la mesura de la força longitudinal, s'utilitzaran només els senyals dels bolons que mesuren en aquesta direcció. Aquest model es pot interpretar com un ajust totalment experimental dels coeficients que en resulten del model teòric descrit a l'Apartat 6.8.

En el cas del model 3, per al càlcul de cada component de força o moment a l'ormeig s'utilitzen tots els senyals mesurats amb el dinamòmetre. Amb aquest model d'ajust experimental es busca corregir els efectes de la sensibilitat creuada entre els diferents bolons de mesura.

7.2. Procediment per a la determinació dels models d'ajust experimental

Per tal de determinar els models exposats a l'apartat anterior, es proposa el mètode d'aproximació per mínims quadrats per al càlcul dels paràmetres dels models d'estimació de les forces als bolons de mesura o del torsor d'enllaç a l'ormeig. En aquest apartat s'exposa tant el procediment general utilitzat com els estadístics calculats per a quantificar la bondat de cada model [96]. Donada l'elevada linealitat en el comportament dels bolons de mesura, els models de regressió proposats són sempre lineals. Aquest desenvolupament és vàlid tant per als casos de regressió lineal simple com pels als casos de regressió lineal múltiple, ja que l'únic que canvia és el nombre de coeficients a determinar en el model.

7.2.1. Determinació dels coeficients en els models d'ajust experimental

Per a la determinació del model per al càlcul de la força mesurada pel mètode dels mínims quadrats, es parteix de les dades corresponents a n experiments de càrrega aplicada, i per a cadascun d'ells es mesuren p senyals de l'equip assajat (per exemple, els $p = 6$ bolons de mesura). Es considera que hi ha una relació lineal entre els p senyals mesurats i la força aplicada. Així el valor de força aplicada $F_{a,i}$ en l'experiment s'expressa segons l'Equació 7.1.

$$F_{a,i} = a_0 + a_1 \cdot S_{1,i} + \dots + a_p \cdot S_{p,i} + E_{F,i} \quad (i = 1 \dots n) \quad 7.1$$

El valor de $F_{a,i}$ de cada experiment s'expressa en funció dels senyals ($S_{1,i} \dots S_{p,i}$) amb un conjunt de coeficients $a_0, a_1 \dots a_p$, més un terme d'error respecte a la força aplicada $E_{F,i}$. El mètode dels mínims quadrats permet determinar els valors d'aquests coeficients de tal forma que es minimitza l'error i s'obtenen els coeficients que millor s'aproximen als valors de $F_{a,i}$, i que permeten determinar amb el model els valors mesurats $F_{m,i}$ (Equació 7.2).

$$F_{m,i} = a_0 + a_1 \cdot S_{1,i} + \dots + a_p \cdot S_{p,i} \quad (i = 1 \dots n) \quad 7.2$$

El conjunt d'equacions de tots els experiments es pot expressar en forma matricial mitjançant l'Equació 7.3.

$$\mathbf{F}_a \approx \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}_R \Rightarrow \begin{bmatrix} F_{a,1} \\ \vdots \\ F_{a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & S_{1,1} & \dots & S_{p,1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & S_{1,n} & \dots & S_{p,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \quad 7.3$$

Per al càlcul dels coeficients mitjançant el mètode dels mínims quadrats es multiplica l'equació matricial anterior per la matriu transposada de \mathbf{S} , i s'aïlla el terme \mathbf{a}_R (Equació 7.4), i obtenir així els coeficients $a_0, a_1 \dots a_p$.

$$\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}_R = \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{F}_a \Rightarrow \mathbf{a}_R = (\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S})^{-1} \cdot \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{F}_a \quad 7.4$$

7.2.2. Estadístics per quantificar la bondat del model d'ajust experimental

Per a quantificar la bondat del model d'ajust es calculen un conjunt d'estadístics. Per al càlcul d'aquests, és necessari primerament determinar la matriu \mathbf{H} , que és la matriu de projecció que transforma els valors de força coneguts \mathbf{F}_a en els valors estimats per la regressió \mathbf{F}_m (Equació 7.5).

$$\mathbf{H} = \mathbf{S} \cdot (\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S})^{-1} \cdot \mathbf{S}^T \quad 7.5$$

També és d'especial importància determinar la variància de l'error $E_{F,i}$ en l'estimació (σ^2) que es calcula segons l'Equació 7.6, on n correspon al número de mostres, q al número de coeficients a ajustar en el model (on en aquest cas equival a $p+1$) i \mathbf{I} és la matriu identitat.

$$\sigma^2 = \frac{\mathbf{F}_a^T \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{H}) \cdot \mathbf{F}_a}{n - q} \quad 7.6$$

La matriu \mathbf{C} de variàncies i covariàncies dels coeficients determinats en la regressió es calcula segons l'Equació 7.7.

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \cdot (\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S})^{-1} \quad 7.7$$

Un dels estadístics per valorar la qualitat de la regressió és l'interval de confiança de cada coeficient del model de regressió i es determina mitjançant l'Equació 7.8. En aquesta equació, $t_{\alpha/2, n-q}$ és el valor de la funció de probabilitat de la distribució de Student de $n-q$ graus de llibertat amb un interval de confiança de $1-\alpha$ i C_{jj} és el terme de la matriu de covariàncies \mathbf{C} corresponent a la variància del coeficient analitzat.

$$IC_{a,j} = t_{\alpha/2, n-q} \sqrt{C_{jj}} \quad 7.8$$

Els intervals de confiança en les mesures realitzades amb el model es calculen mitjançant l'Equació 7.9.

$$IC_{F_{m,i}} = t_{\alpha/2, n-q} \sqrt{\sigma^2 \cdot \left(1 + \mathbf{S}_i^T \cdot (\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S})^{-1} \cdot \mathbf{S}_i\right)} \quad 7.9$$

L'interval de confiança en les mesures realitzades amb el model es calcula per a cada una de les mostres utilitzades en la regressió, on \mathbf{S}_i correspon al vector de senyals per a la mesura analitzada. En els resultats que es presenten en aquesta tesi es mostra el valor màxim d'aquests i és el que es pren de referència per a l'anàlisi de la qualitat de la regressió i l'estimació de les variables mesurades. En totes les anàlisis d'estadístics el terme $t_{\alpha/2, n-q}$ pren el valor de 1,96 corresponent a un interval de confiança $1-\alpha$ del 95% i n grans.

Per últim, el coeficient de determinació múltiple R^2 és una mesura de la correlació en el model de regressió (Equació 7.10). En aquesta equació \mathbf{J} és una matriu de uns. El coeficient pot tenir valors de 0 a 1, on valors pròxims a 1 indiquen un ajust correcte del

model. Per als casos de regressió lineal simple el coeficient de determinació s'avalua de la mateixa manera. En aquest cas, l'arrel quadrada d'aquest estadístic correspon al coeficient de correlació de la recta de regressió.

$$R^2 = \frac{\mathbf{F}_a^T \cdot \left(\mathbf{H} - \left(\frac{1}{n} \right) \cdot \mathbf{J} \right) \cdot \mathbf{F}_a}{\mathbf{F}_a^T \cdot \left(\mathbf{I} - \left(\frac{1}{n} \right) \cdot \mathbf{J} \right) \cdot \mathbf{F}_a} \quad 7.10$$

7.3. Desenvolupament i validació dels models d'ajust experimental

En els següents apartats s'exposen els models d'ajust desenvolupats, amb les expressions i els coeficients d'aquestes obtinguts a partir de l'aproximació per mínims quadrats, juntament amb l'anàlisi dels residuals en les mesures per validar-ne la precisió en l'estimació del torsor d'enllaç.

7.3.1. Model 1: Model per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig mitjançant les equacions del model mecànic teòric del dinamòmetre i els models ajustats dels bolons de mesura

Per a obtenir aquest model per a la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig, el primer pas és determinar els models d'ajust per als bolons de mesura. Donada l'elevada linealitat observada, els models per als bolons de mesura es continuen considerant lineals, sense que apareguin errors importants en tot l'interval de mesura. En la validació dels bolons de mesura segons les dades del full de calibratge (Apartat 6.9) es detecten desviacions en els senyals sense càrrega dels bolons de mesura per a cada assaig, i es proposa un model que consisteix en adquirir el senyal a l'inici de l'assaig i utilitzar-lo com a referència de senyal a càrrega nul·la. Aquest procediment també permet corregir les desviacions del senyal a càrrega nul·la al llarg de períodes de temps prolongats, i de fet aquest és un mètode d'ajust habitual en l'ús de sistemes de mesura de forces. Les equacions que en resulten per a aquest model es mostren a la Taula 7.1.

Taula 7.1: Models d'ajust experimental per als bolons de mesura (forces en kN i senyals en V/V)

$F_1 = F_{1,0} + a_{F1} \cdot (S_1 - S_{1,0})$	$F_4 = F_{4,0} + a_{F4} \cdot (S_4 - S_{4,0})$
$F_2 = F_{2,0} + a_{F2} \cdot (S_2 - S_{2,0})$	$F_5 = F_{5,0} + a_{F5} \cdot (S_5 - S_{5,0})$
$F_3 = F_{3,0} + a_{F3} \cdot (S_3 - S_{3,0})$	$F_6 = F_{6,0} + a_{F6} \cdot (S_6 - S_{6,0})$

Amb el dinamòmetre tripuntal disposat en posició habitual de funcionament, amb la mateixa orientació que el tractor, els bolons de mesura reben una lleugera càrrega degut al pes del marc de la part de l'ormeig del dinamòmetre i del moment que provoca aquest, de forma que s'ha de tenir en compte. Aquests valors (de $F_{1,0}$ a $F_{6,0}$ de la Taula 7.1) es determinen segons el model mecànic desenvolupat a l'Apartat 4.2, a partir d'estudiar un estat de càrrega nul·la a l'ormeig. A la Taula 7.2 es mostren aquests valors.

Taula 7.2: Valors de força inicial de cada boló de mesura en els models d'ajust experimental per als bolons de mesura (forces en kN)

$F_{1,0} = 0,0420$	$F_{3,0} = 0,5846$	$F_{5,0} = -0,0210$
$F_{2,0} = 0,5846$	$F_{4,0} = -0,0210$	$F_{6,0} = 0$

En aquests models només cal determinar un sol coeficient, corresponent a la sensibilitat de cada boló de mesura. El mètode de mínims quadrats s'aplica a l'Equació 7.11, corresponent al cas del boló de mesura 1, i el plantejament és equivalent per la resta de bolons.

$$\begin{bmatrix} F_{1,a,1} - F_{1,0} \\ \vdots \\ F_{1,a,n} - F_{1,0} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{1,1} - S_{1,0} \\ \vdots \\ S_{1,n} - S_{1,0} \end{bmatrix} \cdot a_{F1} \quad 7.11$$

Per al càlcul de la recta de regressió d'un boló de mesura, s'utilitzen els valors obtinguts en els assaigs experimentals en els dos sentits de força corresponent a aquella configuració on el boló rep la càrrega més gran, definits a la Taula 6.3. Els valors utilitzats en la regressió per mínims quadrats són els valors dels 1r i 2n cicles creixents i els valors dels 3r i 4t cicles corresponents als assajos a força creixent i decreixent. Per tal de no donar una ponderació més gran als valors a força nul·la s'han descartat els punts de senyal a força nul·la al finalitzar el 1r i el 2n cicle.

Els valors dels coeficients per a cada boló de mesura obtinguts dels càlculs de regressió es mostren a la Taula 7.3, on s'observa que per als bolons 4 i 5 els valors dels coeficients són lleugerament més grans que els especificats en el full de calibratge (Taula 6.7), per compensar l'efecte de la menor de sensibilitat detectada en la validació del model teòric.

Taula 7.3: Coeficients per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
a	-102439	49367	49514	107588	106429	47901

A la Taula 7.4 es mostren els estadístics corresponents, seguint les definicions d'aquests descrits en l'Apartat 7.2.2. Cal tenir present que aquests es calculen per les dades utilitzades en l'obtenció de cada recta de regressió del boló i no per a la totalitat de les dades dels assajos realitzats.

Taula 7.4: Estadístics per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
σ^2	0,484	0,456	0,667	0,202	0,928	1,082
IC_{aj}	274,331	212,147	255,026	156,955	331,597	364,096
$max. IC_{Fm}$	1,388	1,346	1,628	0,896	1,921	2,078
R^2	0,9998	0,9996	0,9994	1,0000	0,9998	0,9987

Es pot comprovar en els estadístics que la cèl·lula de càrrega on hi ha una major desviació és el boló de mesura 6, corresponent al que mesura la component de força transversal. S'observa també uns coeficients de determinació molt pròxims a 1, que posen de manifest una molt alta linealitat.

Per tal d'identificar desviacions en el comportament ideal de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre en altres assajos diferents als utilitzats per a l'obtenció del model de cada boló de mesura, s'ha calculat per a cada una de les configuracions d'assaig els residuals entre els valors de força teòricament aplicats a cada boló a partir de l'assaig experimental i els valors de força mesurats pel boló a partir del model característic del boló obtingut en aquest apartat. Aquests es mostren a la Figura 7.3.

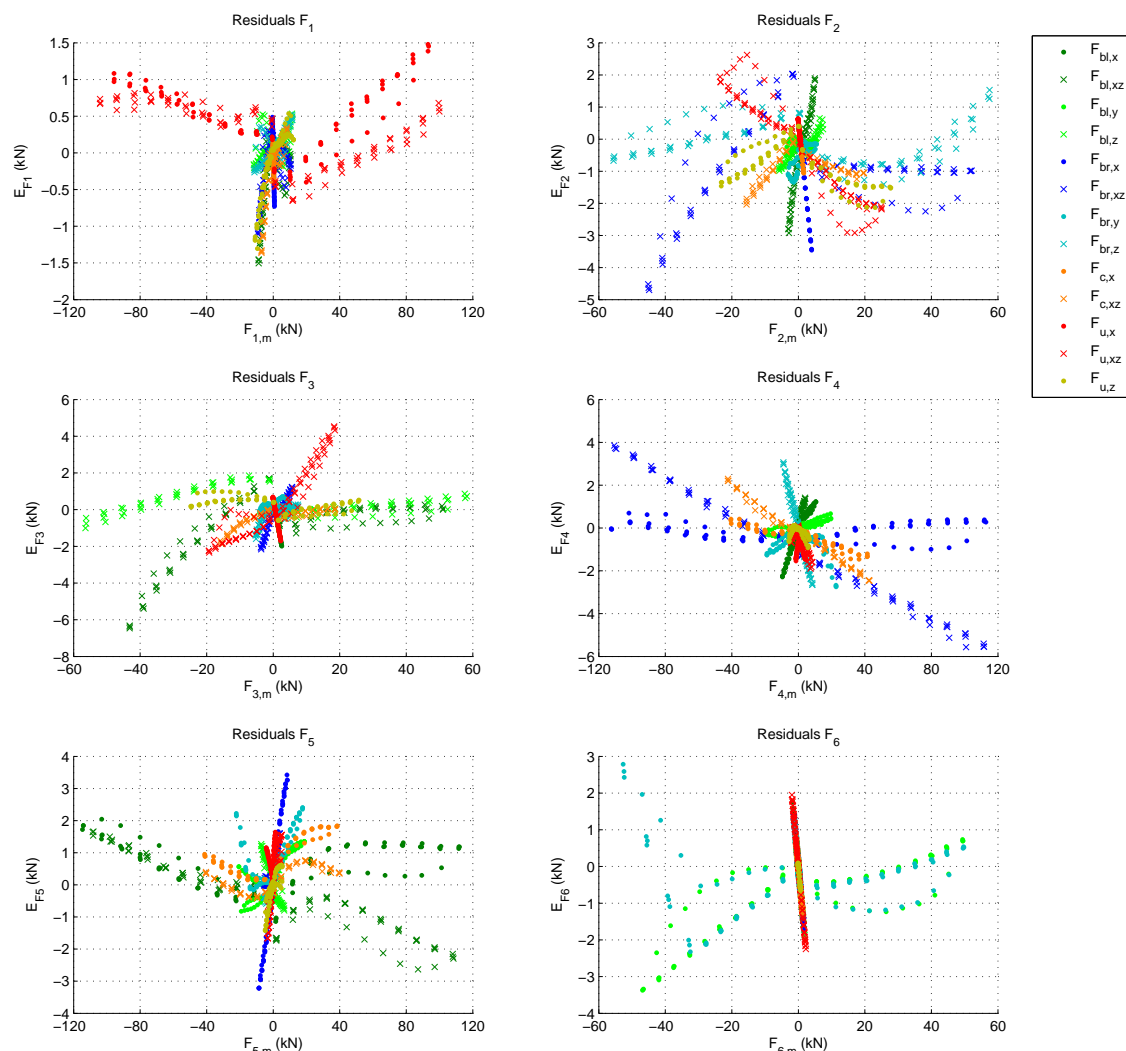


Figura 7.3: Residuals per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura

Si es comparen els residuals obtinguts amb els residuals dels models dels bolons de mesura basats en els fulls de calibratge (Figura 6.29) s'observen alguns canvis significatius.

Per al cas del boló de mesura 1 situat a la part superior del dinamòmetre, es comprova que en els assajos $F_{u,x}$ i $F_{u,xz}$, corresponents als assajos on la força aplicada en aquest boló és important, per a valors de força negatius i valors de força positius els pendents de les tendències dels residuals són de signe contrari. Això posa de manifest que aquest boló, com s'ha comentat en el model basat en els fulls de calibratge, té un comportament diferenciat depenent de si rep càrregues a tracció o a compressió.

Per als bolons 2 i 3 no s'observen canvis importants respecte als model basat en els fulls de calibratge, però sí per als bolons de mesura 4 i 5. En aquests casos, per als assajos

utilitzats en l'ajust de regressió, l'assaig $F_{br,x}$ per al boló 4 i l'assaig $F_{bl,x}$ per al boló 5, el model s'ajusta correctament però amb desviacions significatives per a altres assajos.

Per al boló de mesura 6, que mesura la component transversal de força, igual que en el model basat amb les dades del full de calibratge, s'observen canvis de tendència significatius en els residuals, en concret per a l'assaig $F_{br,y}$ a força negativa, ja identificats anteriorment.

En tots els bolons es pot observar que, igual que en el cas del model basat en els fulls de calibratge del fabricant, els residuals corresponents als assajos on el boló de mesura hauria de mesurar una càrrega molt petita o zero, aquests són importants i de valor creixent al augmentar la força en l'assaig. En aquests casos la força mesurada correspon directament al valor del residual i aquests errors són provocats per l'efecte de la sensibilitat creuada.

Per a la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig, en aquest cas es proposa el model basat en el càlcul d'aquest a partir de les rectes dels bolons de mesura ajustades amb els assajos experimentals. Per a la determinació d'aquest model s'aplica el mateix procediment que per al model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç (Apartat 6.8) però en aquest cas s'utilitzen les rectes característiques dels bolons de mesura ajustades experimentalment. A la Taula 6.8 es mostra el model resultant, on per a la validació d'aquest model s'ha seguit el mateix procediment que per al cas del model teòric (Figura 6.26).

Taula 7.5: Model 1 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_{x,i} &= -102439,53 \cdot (S_1 - S_{1,0}) + 107587,73 \cdot (S_4 - S_{4,0}) + 106429,46 \cdot (S_5 - S_{5,0}) \\
 F_{y,i} &= 47901,48 \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 F_{z,i} &= 49366,82 \cdot (S_2 - S_{2,0}) + 49514,18 \cdot (S_3 - S_{3,0}) \\
 M_{x,i} &= -16636,62 \cdot (S_2 - S_{2,0}) + 16686,28 \cdot (S_3 - S_{3,0}) + 3053,80 \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 M_{y,i} &= -76061,35 \cdot (S_1 - S_{1,0}) - 8540,46 \cdot (S_2 - S_{2,0}) - 8565,95 \cdot (S_3 - S_{3,0}) \\
 M_{z,i} &= 37817,09 \cdot (S_4 - S_{4,0}) - 37409,96 \cdot (S_5 - S_{5,0}) + 13484,27 \cdot (S_6 - S_{6,0})
 \end{aligned}$$

A la Figura 7.4 es presenten els valors dels residuals en l'estimació de les components del torsor d'enllaç entre el dinamòmetre i l'ormeig. Les dades utilitzades en la comparació són els valors de forces i moments aplicats en l'enllaç a l'ormeig en tots els assajos realitzats i els valors mesurats mitjançant el model exposat. Aquestes corresponen a les dades del 1r, 2n 3r i 4t cicle de cada configuració d'assaig, tant a tracció com a compressió.

Si es comparen aquests residuals amb els del model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç (Figura 6.27) s'observa que en general hi ha una millora en l'estimació del torsor d'enllaç. L'única component on empitjora lleugerament l'estimació és en el cas de la component longitudinal de força $F_{x,i}$.

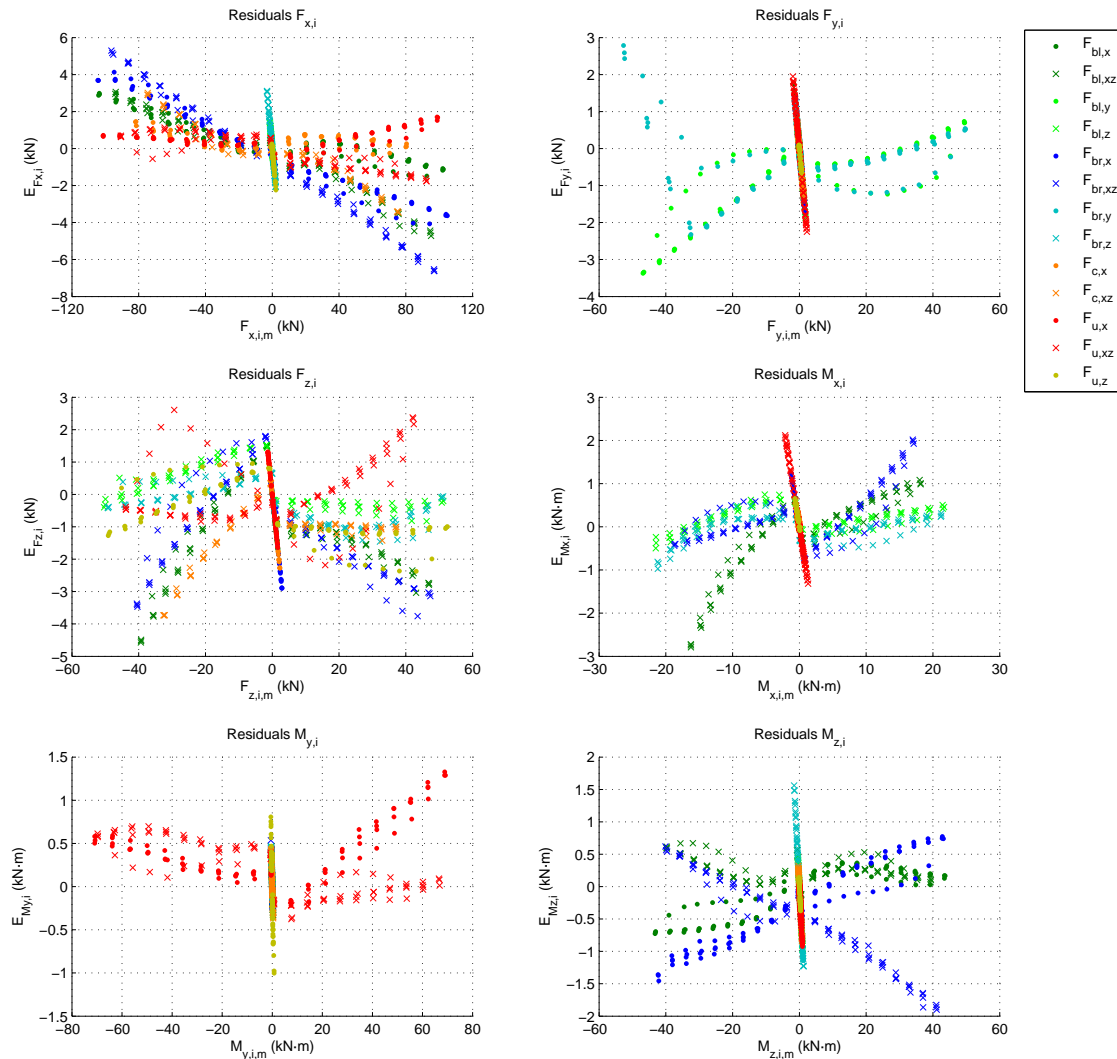


Figura 7.4: Residuals del model 1 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

Per la mesura de la component $F_{x,i}$ s'observen errors que arriben als 6 kN, on els màxims es donen a càrrega màxima en l'assaig de força inclinada en l'ancoratge inferior dret ($F_{br,xz}$), tant a tracció com a compressió. A més es comprova que els residuals segueixen unes tendències en forma de recta diferents per a cada assaig, però a diferència del model teòric, en la majoria d'assajos les tendències dels residuals indiquen que la mesura és més gran que la realment aplicada.

Per a la component transversal $F_{y,i}$ s'observa la mateixa tendència que ja s'ha visualitzat en casos d'estudi anteriors, amb els mateixos errors en l'estimació de la mesura, ja que en aquest cas, com que en $F_{y,i}$ només hi intervé F_6 , el gràfic de residuals té la mateixa forma que el dels residuals d'aquest boló.

Per a la component vertical $F_{z,i}$ es redueixen lleugerament els valors dels residuals, i no s'observen canvis de tendència respecte al model teòric. Per al cas de $M_{x,i}$ tampoc hi ha canvis significatius respecte al cas del model teòric.

Per als casos de $M_{y,i}$ i $M_{z,i}$, on es detectava una menor sensibilitat en la mesura d'aquestes components segons el model teòric, mitjançant els models dels bolons ajustats experimentalment aquest problema s'aconsegueix corregir.

Igual que en tots els altres casos analitzats, en la zona pròxima a zero del valor estimat, apareixen els residuals corresponents a la sensibilitat creuada en molts dels assajos on el dinamòmetre no hauria de mesurar la component de força o moment analitzada. Els errors per aquest efecte poden ser fins i tot més importants que en els casos on la component d'estudi té un valor significatiu. És el cas de la component de balanceig $M_{x,i}$, on a l'assaig $F_{u,xz}$ apareixen errors grans tot i tractar-se d'un assaig que teòricament no provoca moment de balanceig. També és el cas de la component de guinyada $M_{z,i}$, on els errors màxims es donen per a l'assaig de càrrega vertical en l'ancoratge dret ($F_{br,z}$), i superen els errors en els assajos on el moment de guinyada assoleix valors importants.

7.3.2. Model 2: Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals dels bolons que intervenen teòricament en cada mesura

En el desenvolupament del model teòric (Taula 6.8) i del model d'ajust experimental 1 (Taula 6.8), s'acaba obtenint un model amb els corresponents coeficients que relacionen els senyals dels bolons de mesura amb cada una de les components del torsor d'enllaç. Per al model descrit a continuació es proposa ajustar els valors d'aquests coeficients de forma totalment experimental mitjançant una regressió lineal amb múltiples variables.

Per al càlcul d'aquests coeficients per a la determinació de cada component del torsor d'enllaç no són necessaris tots els senyals dels bolons de mesura. D'aquesta manera, en l'equació per a la component longitudinal de força, intervenen les forces mesurades pels bolons 1, 4 i 5, i per tant no s'inclou en l'equació per a l'estimació d'aquesta els senyals dels altres bolons de mesura. El raonament és equivalent per la resta de components del torsor d'enllaç, i les equacions resultants per aquest model es mostren a la Taula 7.6.

Taula 7.6: Model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_{x,i} &= a_{1,Fx} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{4,Fx} \cdot (S_4 - S_{4,0}) + a_{5,Fx} \cdot (S_5 - S_{5,0}) \\
 F_{y,i} &= a_{6,Fy} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 F_{z,i} &= a_{2,Fz} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + a_{3,Fz} \cdot (S_3 - S_{3,0}) \\
 M_{x,i} &= a_{2,Mx} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + a_{3,Mx} \cdot (S_3 - S_{3,0}) + a_{6,Mx} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 M_{y,i} &= a_{1,My} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,My} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + a_{3,My} \cdot (S_3 - S_{3,0}) \\
 M_{z,i} &= a_{4,Mz} \cdot (S_4 - S_{4,0}) + a_{5,Mz} \cdot (S_5 - S_{5,0}) + a_{6,Mz} \cdot (S_6 - S_{6,0})
 \end{aligned}$$

El model on s'aplica el procediment d'ajust per mínims quadrats es planteja, per al cas de la component $F_{x,i}$, a l'Equació 7.12, amb un plantejament equivalent per a la resta de les components del torsor d'enllaç.

$$\begin{bmatrix} F_{x,i,a,1} \\ \vdots \\ F_{x,i,a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{1,1} - S_{1,0} & S_{4,1} - S_{4,0} & S_{5,1} - S_{5,0} \\ & \vdots & \\ S_{1,n} - S_{1,0} & S_{4,n} - S_{4,0} & S_{5,n} - S_{5,0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{1,Fx} \\ a_{4,Fx} \\ a_{5,Fx} \end{bmatrix} \quad \mathbf{7.12}$$

Per al plantejament del model de regressió s'han utilitzat les dades de tots els assajos experimentals realitzats, tant amb càrregues a tracció com a compressió i dels 4 cicles

d'assaig. D'aquesta manera s'utilitzen un total de 1112 mostres, corresponents a totes les dades de les 13 configuracions d'assaig realitzades per determinar els coeficients per a cada component de força i moment d'enllaç a l'ormeig.

Els coeficients obtinguts en els càlculs per mínims quadrats, per a cada component de força i moment en l'enllaç a l'ormeig es mostren a la Taula 7.7. Els resultats dels estadístics per al model de regressió es mostren a la Taula 7.8.

Taula 7.7: Coeficients del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$F_{x,i}$	-101941,46			103026,95	103986,37	
$F_{y,i}$						48442,87
$F_{z,i}$		48794,91	49295,25			
$M_{x,i}$		-16662,55	17512,99			3042,62
$M_{y,i}$	-75827,18	-8185,38	-8230,31			
$M_{z,i}$				37594,19	-37746,20	13376,95

Taula 7.8: Estadístics del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
σ^2	0,696	0,603	1,310	0,230	0,054	0,291
a_1	220,871				67,863	
a_2			239,247	100,583	51,505	
a_3			246,283	103,323	52,396	
IC_{aj}	a_4					126,304
	a_5					126,817
	a_6	194,439				138,600
$max. IC_{Fm}$	1,650	1,537	2,262	0,948	0,459	1,067
R^2	0,9996	0,9955	0,9966	0,9949	0,9998	0,9984

En analitzar els coeficients obtinguts, es comprova que, en general, els seus valors són força similars als coeficients del model exposat en l'apartat anterior. Cal destacar que per al cas de $F_{x,i}$ tots els seus coeficients, en valor absolut, són menors que en el cas d'aquesta component calculada a partir dels models dels bolons de mesura determinats experimentalment, i s'obtenen valors més propers als especificats pel fabricant d'aquests.

Aquest és un fet que indica que, en el calibratge individual de cada boló de mesura, on només es tenen en compte les dades d'un assaig concret i s'ometen les forces en altres bolons de mesura, no es té en consideració que el boló de mesura analitzat es veu afectat per repartiments diferents de la càrrega respecte al cas ideal i per sensibilitats creuades. Per exemple, en el calibratge del boló de mesura 1, aquestes variacions en la distribució de les forces al dinamòmetre impliquen una disminució de la força realment aplicada sobre aquest boló. Això implica, conjuntament amb els corresponents errors per als bolons 4 i 5, errors en l'estimació en $F_{x,i}$ en el model d'ajust experimental 1. Al fer un ajust global de tot el comportament del dinamòmetre, aquests efectes es compensen en bona part i s'obtenen uns coeficients dels bolons més pròxims als esperats.

Per tal de validar els residuals en aquest model es procedeix de forma equivalent als altres casos, mitjançant la diferència entre el torsor d'enllaç aplicat i el mesurat amb el model desenvolupat. A la Figura 7.5 es mostra l'esquema per al procediment de

validació i a la Figura 7.6 es mostren els gràfics de residuals per a cada component del torsor d'enllaç.

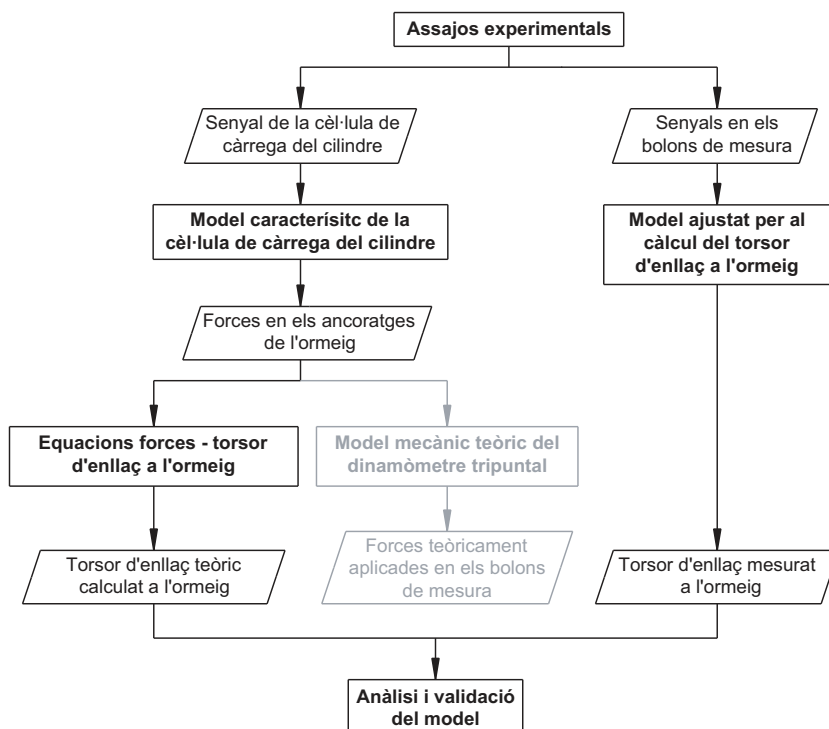


Figura 7.5: Procediment per a la validació del model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig

Amb aquest model s'observen uns residuals (Figura 7.6) on les tendències de cada assaig són diferenciades les unes de les altres, a diferència dels altres models on en alguns casos els residuals de diferents configuracions d'assaig seguien tendències similars. Aquest efecte és indicatiu de que el model prova d'aproximar-se el millor possible a tots els casos estudiats, amb errors similars en totes les configuracions d'assaig considerades. Aquest efecte es manifesta especialment en la component $F_{x,i}$ si es compara amb el model 1. En aquest cas, es visualitza una reducció important en els residuals màxims, amb errors que passen de 6 kN a 3 kN. En canvi, en la resta de components del torsor d'enllaç en l'ormeig no es detecten diferències importants.

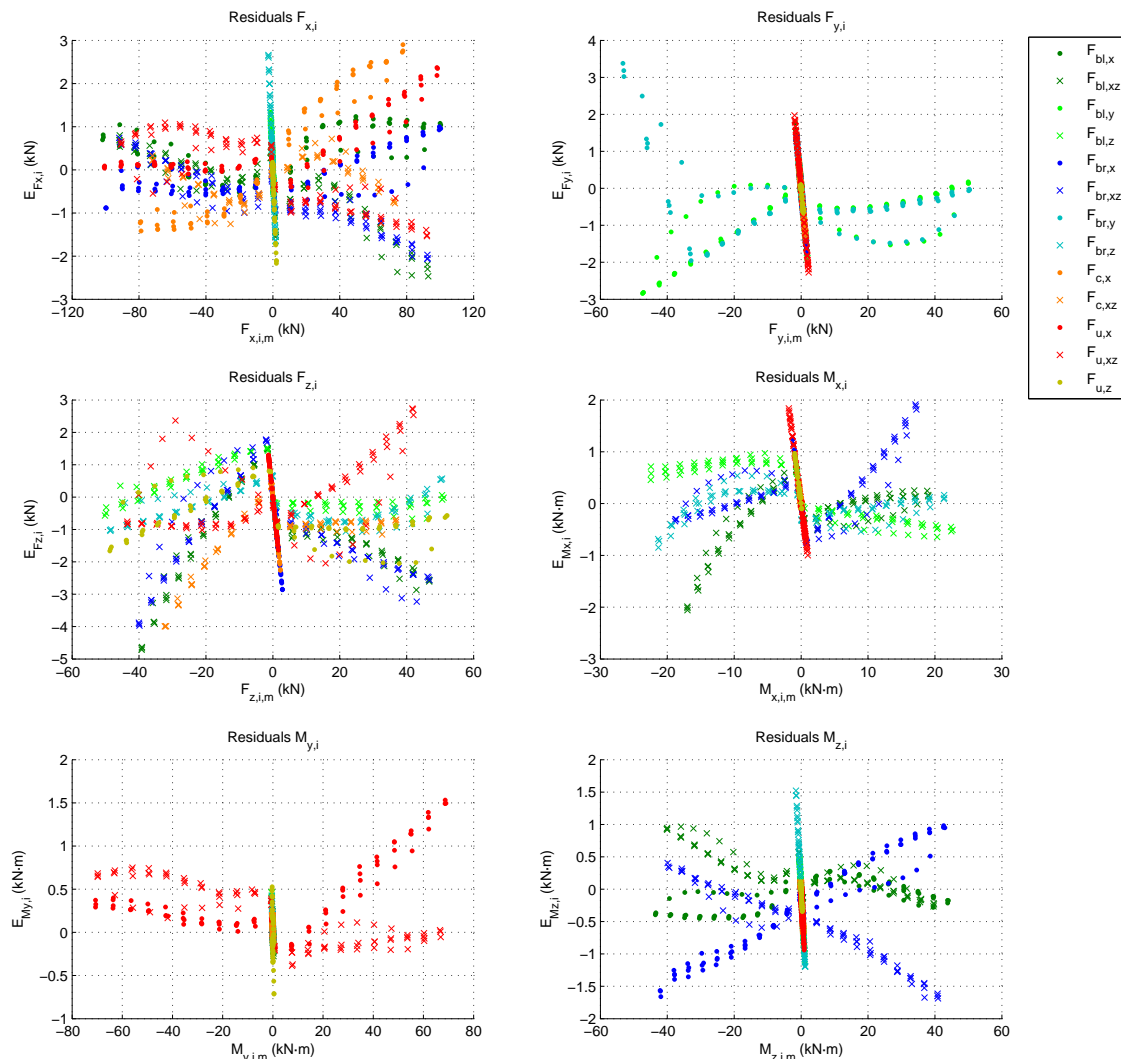


Figura 7.6: Residuals del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

7.3.3. Model 3: Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir de tots els senyals dels bolons de mesura

L'últim model experimental proposat consisteix en realitzar un model on hi intervien tots i cada un dels senyals dels bolons de mesura per al càlcul de cada component del torsor d'enllaç a l'ormeig. A diferència del model 2 on per al càlcul de cada component hi intervien només els senyals que corresponen directament a aquesta, en aquest cas hi intervien tots els senyals mesurats, amb l'objectiu de compensar els possibles efectes de sensibilitat creuada. En tracta doncs d'ampliar el model 2 afegint per a cada component del torsor d'enllaç els senyals d'aquells bolons de mesura que teòricament no intervien en el seu càlcul. Les equacions d'aquest model es mostren a la Taula 7.9.

Taula 7.9: Model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_{x,i} &= a_{1,Fx} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,Fx} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,Fx} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 F_{y,i} &= a_{1,Fy} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,Fy} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,Fy} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 F_{z,i} &= a_{1,Fz} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,Fz} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,Fz} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 M_{x,i} &= a_{1,Mx} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,Mx} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,Mx} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 M_{y,i} &= a_{1,My} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,My} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,My} \cdot (S_6 - S_{6,0}) \\
 M_{z,i} &= a_{1,Mz} \cdot (S_1 - S_{1,0}) + a_{2,Mz} \cdot (S_2 - S_{2,0}) + \dots + a_{6,Mz} \cdot (S_6 - S_{6,0})
 \end{aligned}$$

En l'ajust de regressió per mínims quadrats, es busca determinar els coeficients que aproximïn millor els valors de les components del torsor l'enllaç a l'ormeig en funció dels senyals mesurats. Per al cas de la component $F_{x,i}$, el model on s'aplica el mètode per mínims quadrats es mostra en l'Equació 7.13, realitzant un plantejament equivalent per a la resta de les components en l'enllaç.

$$\begin{bmatrix} F_{x,i,a,1} \\ \vdots \\ F_{x,i,a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{1,1} - S_{1,0} & S_{2,1} - S_{2,0} & \cdots & S_{5,1} - S_{5,0} & S_{6,1} - S_{6,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{1,n} - S_{1,0} & S_{2,n} - S_{2,0} & \cdots & S_{5,n} - S_{5,0} & S_{6,n} - S_{6,0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{1,Fx} \\ \vdots \\ a_{6,Fx} \end{bmatrix} \quad 7.13$$

Les dades dels assajos experimentals utilitzades són les mateixes que per al desenvolupament del model 2. Així, s'utilitzen les dades de totes les configuracions d'assaig tant a tracció com a compressió i dels 4 cicles de càrrega. Els coeficients obtinguts es mostren a Taula 7.10.

Taula 7.10: Coeficients del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$F_{x,i}$	-101413,11	1055,37	411,37	103596,40	104149,72	307,32
$F_{y,i}$	730,39	-490,98	-516,28	-19,98	-72,36	48482,15
$F_{z,i}$	101,23	48244,87	48956,83	-1326,63	-852,15	150,91
$M_{x,i}$	-631,49	-16533,41	17160,27	724,20	-512,12	3213,62
$M_{y,i}$	-75836,88	-8222,10	-8233,25	-88,11	4,70	-39,94
$M_{z,i}$	99,65	1194,12	-505,18	38185,12	-37961,56	13364,31

Si es comparen dels coeficients obtinguts en aquest model respecte als del model 2, es comprova que els coeficients dels senyals dels bolons que teòricament intervien en cada component tenen valors molts similars en un i altre model. A més, els coeficients dels senyals dels bolons que teòricament no intervien en la mesura són significativament inferiors als que sí que hi intervien, i per tant la ponderació d'aquests en l'estimació de la component del torsor d'enllaç és reduïda. Aquests coeficients posen de manifest que la sensibilitat creuada és en general reduïda.

A la Taula 7.11 es mostren els estadístics per aquest model, on no es visualitzen diferències importants en comparació amb el model de l'apartat anterior.

Taula 7.11: Estadístics del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	
σ^2	0,625	0,512	1,187	0,171	0,053	0,187	
IC_{aj}	a_1	233,532	211,378	321,697	121,970	68,297	127,857
	a_2	199,341	180,431	274,598	104,112	58,298	109,138
	a_3	201,783	182,642	277,962	105,388	59,012	110,475
	a_4	210,017	190,094	289,304	109,688	61,420	114,983
	a_5	210,057	190,131	289,360	109,709	61,432	115,005
	a_6	203,396	184,101	280,184	106,230	59,483	111,358
$max. IC_{Fm}$	1,567	1,418	2,158	0,818	0,458	0,858	
R^2	0,9996	0,9962	0,9969	0,9962	0,9998	0,9990	

Els residuals obtinguts en aquest model es mostren a la Figura 7.7, i es calculen seguint el mateix procediment que en el model anterior, descrit a la Figura 7.5.

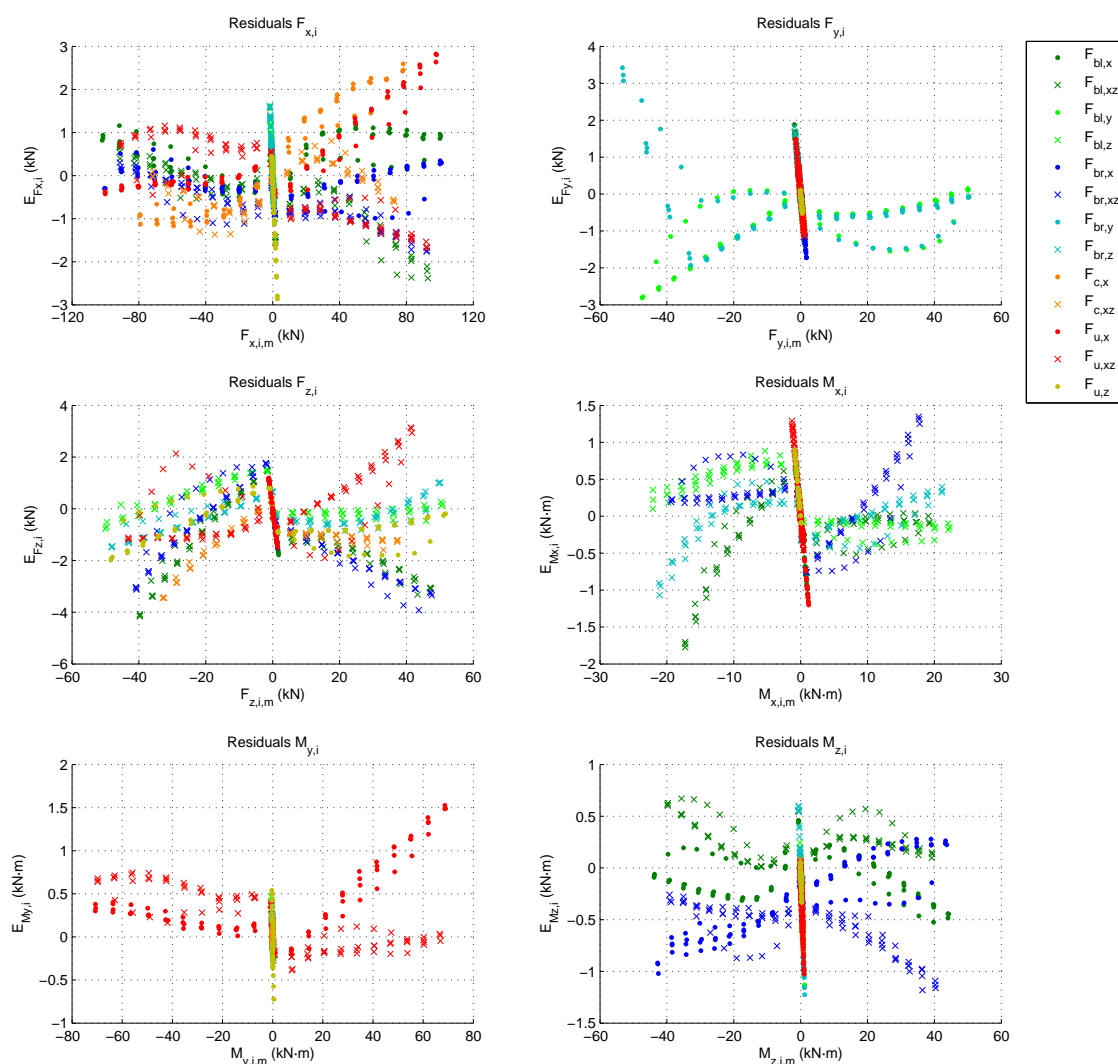


Figura 7.7: Residuals del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

En analitzar els residuals d'aquest model, no es detecten canvis significatius respecte al model 2 per als casos on la magnitud de la component del torsor d'enllaç és important, però sí que s'observen millores en els casos on la mesura de la component del torsor d'enllaç hauria de ser nul·la, i s'obtenen per aquests casos residuals més petits.

S'observa doncs que amb el model 3 s'aconsegueix que la sensibilitat creuada disminueixi.

Per a una millor comparativa dels tres models d'ajust experimental, es sobreposen els residuals d'aquests en un sol gràfic per a cada component de força i moment en l'enllaç a l'ormeig (Figura 7.8). Es comprova que en general no hi ha diferències significatives entre els diferents models, excepte entre el model 1 i la resta de models en l'estimació de $F_{x,i}$. Entre els models 2 i 3, només en la component $M_{z,i}$ s'identifiquen clarament els beneficis del model 3 respecte al model 2.

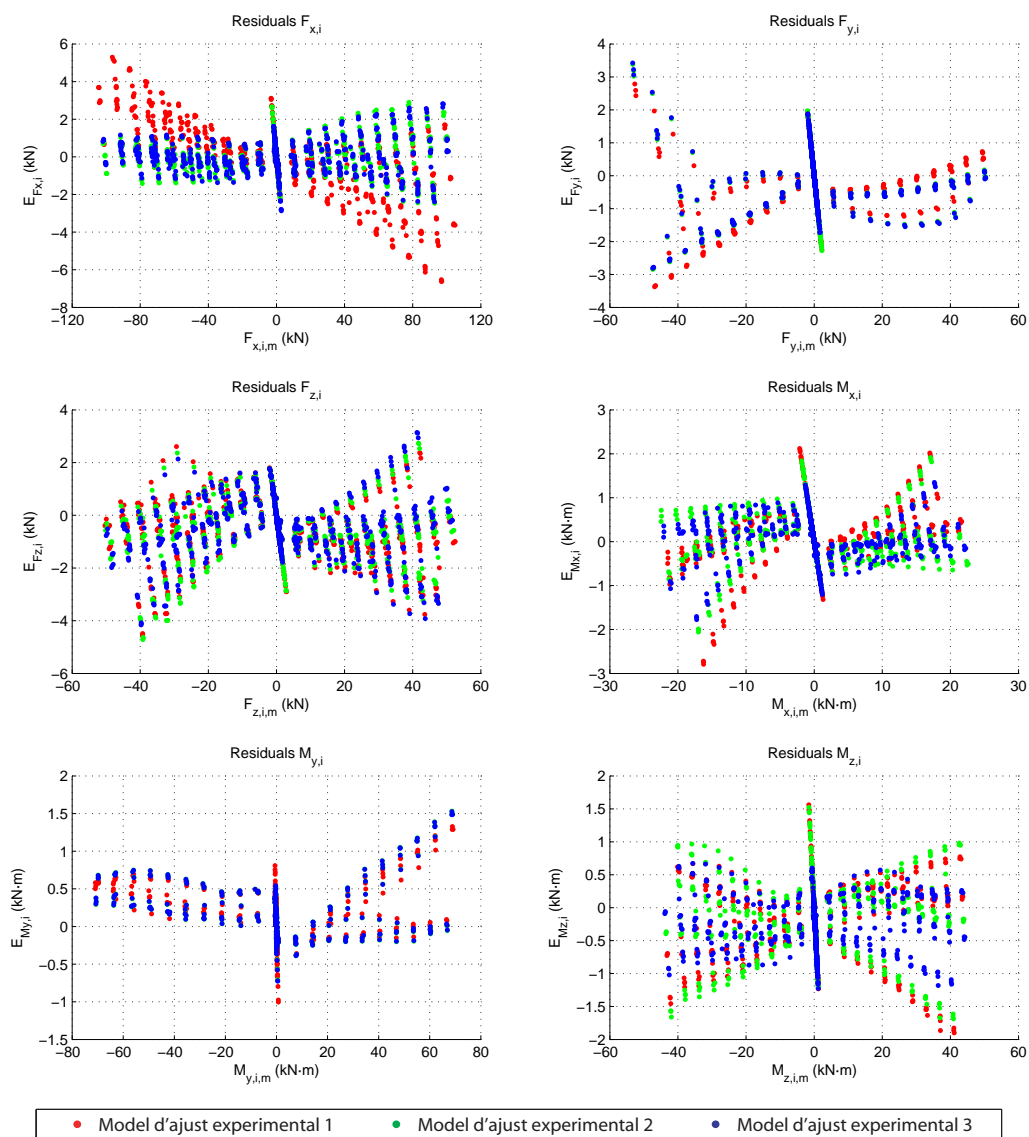


Figura 7.8: Comparativa dels models d'ajust experimental per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig

7.4. Conclusions dels models d'ajust experimentals desenvolupats per al dinamòmetre tripuntal

En aquest dinamòmetre es verifica que el comportament real és bastant similar al previst a partir del model teòric, encara que hi ha certs errors o discrepàncies, i que s'aconsegueixen corregir en bona part amb els models d'ajust experimental. També es demostra que és molt convenient realitzar el calibratge del dinamòmetre en conjunt i no pas dels bolons de mesura instal·lats en el dinamòmetre de forma individual, ja que s'obtenen en general errors menors en l'estimació del torsor d'enllaç.

En relació a la utilització dels models per als assajos en camp, el model 1 té una diferència significativa respecte als altres dos models, i és que en aquest es realitza el càlcul que determina directament les forces als bolons de mesura. Aquest aspecte és un avantatge en els assajos en camp, ja que permet disposar de les forces en els bolons de mesura i així es pot fàcilment identificar si un d'aquests no es comporta correctament. Si es té en compte la precisió en la mesura, es considera preferible utilitzar el model 3, ja que compensa millor la sensibilitat creuada que els altres models d'ajust experimental.

Donades aquestes consideracions, en els assajos en camp, per una banda s'utilitzarà el model 3 per a la determinació del torsor d'enllaç a partir de tots els senyals dels bolons de mesura, i per l'altra, els models d'ajust experimental per als bolons de mesura, per comprovar el valor de força en aquests durant l'assaig en camp. En el cas que s'hagin de realitzar càlculs amb les dades un cop finalitzat l'assaig, com per exemple per determinar els valors de força als ancoratges de l'ormeig, serà convenient partir de les dades del torsor d'enllaç obtingut amb el model 3, ja que en aquest model els errors són menors que en les rectes ajustades experimentalment dels bolons de mesura.