



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.

10. VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS

En aquest capítol es descriu el procediment realitzat per a la validació dels enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats. Per a aquesta validació es realitzen un conjunt d'assajos experimentals, on mitjançant l'aplicació de forces conegudes, es mesura el senyal de resposta dels diferents ponts de galgues extensomètriques. Amb les dades obtingudes en els assajos experimentals, es valida el correcte funcionament d'aquests enganxalls dinamomètrics juntament amb el model teòric desenvolupat per a la determinació de les components de força en funció dels senyals mesurats.

10.1. Objectius dels assajos experimentals de validació

L'objectiu principal és comprovar la funcionalitat de cada un dels enganxalls dinamomètrics desenvolupats mitjançant l'anàlisi de les dades obtingudes en assajos experimentals aplicant diferents forces conegudes. Amb les dades que s'obtenen dels assajos experimentals es realitzen un conjunt d'estudis. Aquests són:

- Comprovació de l'estabilitat en els senyals de resposta dels diferents ponts de mesura amb galgues extensomètriques.
- Anàlisi i validació de les equacions teòriques obtingudes en el desenvolupament dels enganxalls dinamomètrics que determinen les components de força al punt d'unió de l'enganxall en funció dels senyals dels ponts de galgues extensomètriques.

10.2. Procediment en els assajos experimentals

En aquest apartat es defineix el procediment utilitzat en la realització dels assajos experimentals per als enganxalls dinamomètrics i es descriuen les diferents configuracions de forces aplicades i la seqüència d'aplicació d'aquestes.

10.2.1. Descripció de les configuracions d'assaig

Per als assajos de validació dels enganxalls dinamomètrics es realitzen un conjunt de configuracions d'assaig amb diverses direccions de força. A la Figura 10.1 es mostren les configuracions o direccions d'aplicació de la força en sentit positiu, on exceptuant el cas de la força vertical F_z , la resta també es realitzen en sentit contrari.

Per a l'assaig de les components transversals de força, s'utilitzen les configuracions en diagonal (F_{dp} , amb angle δ positiu i F_{dn} , amb angle δ negatiu), on s'assagen conjuntament les components longitudinal i transversal de força. En els assajos de força longitudinal i diagonal (F_x , F_{dn} i F_{dp}) el valor màxim de la força aplicada és de 100 kN, mentre que en l'assaig de força vertical (F_z) aquesta és de 50 kN.

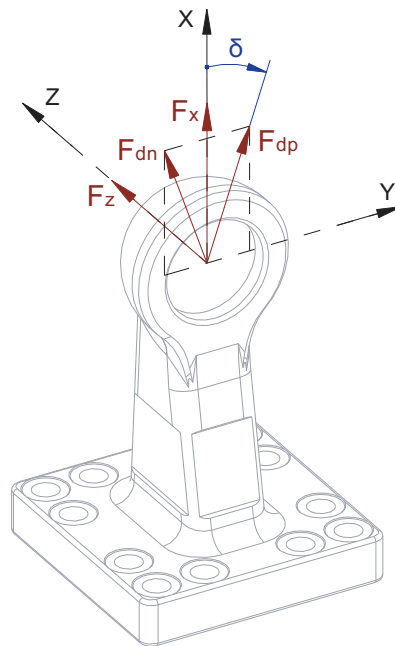


Figura 10.1: Direccions de les forces aplicades en els assajos experimentals de validació dels enganxalls dinàmometrics

10.2.2. Seqüències d'aplicació de força en els assajos experimentals

Per a l'assaig dels enganxalls dinàmometrics s'han realitzat dos tipus de seqüències d'aplicació de força diferents. La primera consisteix en aplicar una seqüència de forces en una única direcció de les definides en la Figura 10.1. L'altra seqüència consisteix en aplicar combinacions de forces en una de les direccions definides juntament amb la força en la direcció z.

Seqüències amb una força

L'assaig amb una única força aplicada consisteix en aplicar cicles de càrrega creixent i decreixent en una de les direccions definides per a cada configuració d'assaig. La seqüència d'aplicació de forces és exactament igual a la realitzada per al dinamòmetre d'enganxalls de tres punts, on aquesta es descriu a l'Apartat 6.6.2. Es realitzen, per a cada un dels enganxalls dinàmometrics i per a cada configuració d'assaig, dos cicles consecutius de càrrega creixent, un cicle de càrrega creixent-decreixent i un cicle de fluència separats cada un d'ells per una precàrrega.

Els assajos realitzats amb una força consisteixen en 7 casos per a cada un dels enganxalls dinàmometrics i aquests són:

- Càrrega a tracció (F_x positiva)
- Càrrega a compressió (F_x negativa)
- Càrrega diagonal en angle positiu a tracció (F_x positiva i F_y positiva)
- Càrrega diagonal en angle positiu a compressió (F_x negativa i F_y negativa)
- Càrrega diagonal en angle negatiu a tracció (F_x positiva i F_y negativa)
- Càrrega diagonal en angle negatiu a compressió (F_x negativa i F_y positiva)
- Càrrega vertical (F_z positiva)

Aquests assajos es realitzen per validar el comportament dels ponts de mesura, per tal de comprovar-ne l'estabilitat com a element de mesura d'esforços.

Seqüències amb combinació de forces

Conjuntament als assajos descrits en l'apartat anterior, s'han realitzat també assajos on es combina l'assaig en una direcció conjuntament amb forces aplicades en la direcció z. Amb aquests assajos el que es busca és determinar els senyals dels ponts en una combinació de forces, per tal d'analitzar aspectes com la sensibilitat creuada.

Els assajos realitzats amb combinació de forces consisteixen en 6 casos per a cada un dels enganxalls dinamomètrics i aquests són:

- Càrrega longitudinal a tracció (F_x positiva) i càrrega vertical (F_z positiva)
- Càrrega longitudinal a compressió (F_x negativa) i càrrega vertical (F_z positiva)
- Càrrega diagonal en angle positiu a tracció (F_x positiva i F_y positiva) i càrrega vertical (F_z positiva)
- Càrrega diagonal en angle positiu a compressió (F_x negativa i F_y negativa) i càrrega vertical (F_z positiva)
- Càrrega diagonal en angle negatiu a tracció (F_x positiva i F_y negativa) i càrrega vertical (F_z positiva)
- Càrrega diagonal en angle negatiu a compressió (F_x negativa i F_y positiva) i càrrega vertical (F_z positiva)

En aquestes seqüències d'aplicació de forces, primerament es realitzen 3 precàrregues a força combinada màxima. Aquestes consisteixen en, primerament, aplicar la càrrega vertical fins al valor màxim de 50 kN, i un cop assolit el màxim de càrrega vertical i mantenint aquesta, s'aplica la càrrega corresponent longitudinal o diagonal fins al valor de 100 kN a tracció o compressió segons l'assaig. Les dues càrregues aplicades màximes es mantenen durant 60 s. Passat l'interval de temps, es descarrega la força longitudinal o diagonal fins a arribar a força nul·la, i a continuació es fa el mateix amb la càrrega vertical. Entre cicles de càrregues màximes es deixa un interval de temps de 60 s sense aplicar cap tipus de força.

Un cop realitzades les precàrregues, es procedeix a adquirir les dades de totes les combinacions de forces possibles entre 0 i 100 kN de força longitudinal o diagonal (en intervals de 10 kN) i entre 0 i 50 kN de força vertical (en intervals de 5 kN). Per iniciar la seqüència es deixa la càrrega vertical nul·la i es realitza una seqüència de força creixent de 0 a 100 kN, en intervals de 10 kN, per a les components F_x , F_{dp} o F_{dn} . El temps en que es manté estable l'estat de càrrega és d'un mínim de 10 s. Un cop assolit el valor màxim es retorna a força nul·la. A continuació, s'incrementa en 5 kN la força vertical F_z i es torna a realitzar el cicle de càrregues creixents per a F_x , F_{dp} o F_{dn} . Es realitza aquest procediment fins arribar a fer totes les seqüències creixents de la força longitudinal o diagonal fins a arribar a una força vertical de 50 kN.

10.3. Requeriments en els assajos experimentals

Per a la realització d'una correcta validació dels enganxalls dinamomètrics, l'equipament utilitzat ha de complir un conjunt de requeriments, i de la mateixa manera que per al cas de la validació del dinamòmetre tripuntal, es pren com a referència la norma UNE-EN ISO 376 [94] (Apartat 6.3). Les condicions requerides són que l'estructura on es fixa l'equip analitzat sigui suficientment rígida i que no hi hagi deformacions que modifiquin la força a aplicar a l'instrument de mesura per tal d'evitar components de força indesitjades, que el sistema de mesura de la força de referència aplicada sigui considerablement més precís que l'element que es valida i que les forces aplicades siguin suficientment estables i repetitives.

10.4. Equips utilitzats en els assajos experimentals

Per al procés de validació dels enganxalls dinamomètrics, de la mateixa manera que en el dinamòmetre per enganxalls de tres punts, s'ha utilitzat la bancada per a assajos estructurals juntament amb els cilindres hidràulics, les cèl·lules de càrrega i la instrumentació necessària per al correcte control de l'aplicació de les forces i l'adquisició de dades. Les característiques i components de la bancada ja s'han exposat a l'Apartat 6.4, així com els requeriments que compleix tot l'equipament. A continuació s'exposa la posada a punt de l'equipament per a poder assajar els enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats.

Cilindres hidràulics i circuit d'accionament

Per a l'aplicació de les forces en els enganxalls dinamomètrics, s'utilitzen dos cilindres hidràulics, un de diàmetre d'èmbol 125 mm i 90 mm de tija per a l'aplicació de forces de fins a 100 kN i l'altre de diàmetre d'èmbol de 80 mm i 56 mm de tija per a l'aplicació de forces de fins a 50 kN. A diferència dels assajos de validació per al dinamòmetre tripuntal on només s'utilitza un cilindre, en el cas dels enganxalls dinamomètrics s'utilitzen simultàniament els dos cilindres. Aquests cilindres hidràulics s'han de controlar independentment l'un de l'altre, per poder regular la força que realitza l'un sense afectar a l'altre. Per a l'accionament del cilindre gran, el circuit hidràulic utilitzat és exactament igual a l'utilitzat en la validació del dinamòmetre tripuntal (Apartat 6.4). Per al cilindre petit s'utilitza un altre grup hidràulic amb bomba de cabal fix i amb un circuit independent al del cilindre gran (Figura 10.2). Al circuit per al cilindre petit s'utilitza també un bloc de vàlvules 5/3 de centres tancats, accionat manualment per palanca i amb retorn per molla. A la sortida del bloc, a la línia de la cambra per a l'avanç del cilindre, s'hi situa el sensor de pressió i la vàlvula reguladora de pressió per controlar la força realitzada pel cilindre. A la sortida del bloc corresponent a la cambra per al retrocés del cilindre no s'hi instal·len els sistemes de control i regulació, ja que per aquest cilindre només es controla la força que realitza en l'avanç, ja que en els assajos realitzats amb aquest cilindre s'aplica força només en aquest sentit (Figura 10.3).

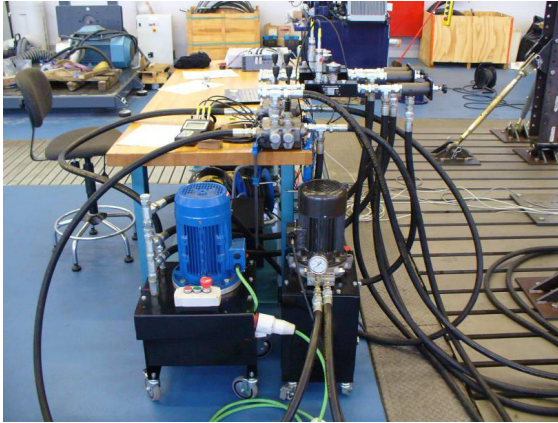


Figura 10.2: Vista principal del circuit hidràulic per a la validació experimental dels enganxalls dinamomètrics

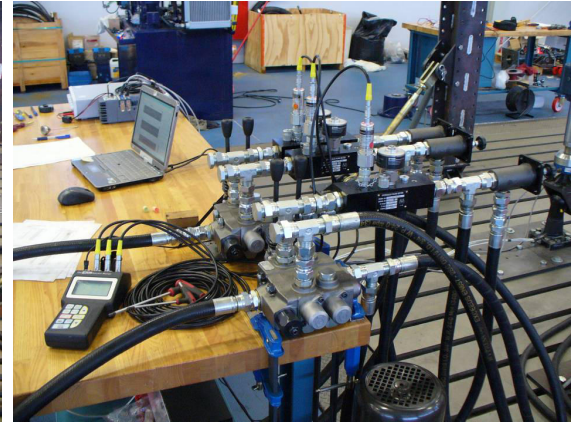


Figura 10.3: Detall dels comandaments hidràulics per a la validació experimental dels enganxalls dinamomètrics

Sistema d'adquisició de dades

Per al sistema d'adquisició de dades s'utilitza el mateix equipament posat a punt per a la validació experimental del dinamòmetre tripuntal (Apartat 6.4). En aquest cas, a l'equip d'adquisició de dades s'hi connecten els ponts de mesura de l'enganxall dinamomètric i les cèl·lules de càrrega per als dos cilindres.

S'ha realitzat un programa específic per al control en els assajos experimentals amb les modificacions pertinents al programa utilitzat en la validació del dinamòmetre tripuntal. El programa enregistra els senyals dels 4 ponts i els senyals de les dos cèl·lules de càrrega dels cilindres hidràulics. El programa també calcula les forces aplicades pels cilindres en tot moment i en mostra els valors per pantalla per a que durant l'assaig experimental es puguin ajustar correctament les forces aplicades mitjançant la regulació de la pressió en el circuit hidràulic.

10.5. Muntatges per a la realització dels assajos experimentals

Per a l'assaig dels enganxalls dinamomètrics, aquests es fixen amb la base de l'enganxall a la bancada mitjançant una placa d'unió. El muntatge dels cilindres es realitza de tal forma que permet l'actuació simultània tant del cilindre gran com del petit. En el cas que només es realitzi l'assaig amb un dels dos cilindres, l'altre s'encarrega de mantenir la posició adequada de l'utilatge sense aplicar força, per garantir la correcta direccionalitat de la força aplicada (Figura 10.4 i Figura 10.5).

Per a l'aplicació de les forces en la direcció longitudinal i transversal a l'enganxall dinamomètric s'utilitza el cilindre gran, i aquest es situa en disposició vertical o diagonal utilitzant un pòrtic format per dos pilars i una biga. El cilindre petit en canvi, s'utilitza per aplicar la component vertical de força. Aquest cilindre està disposat de forma horitzontal i per a la fixació d'aquest s'utilitza un pilar individual amb el corresponent tirant de subjecció.



Figura 10.4: Detall de l'utilatge d'aplicació de la força en els enganxalls de bola



Figura 10.5: Detall de l'utilatge d'aplicació de la força en l'enganxall d'anella

S'ha dedicat una especial cura a garantir que els cilindres estiguin disposats correctament en tots els muntatges, per tal d'evitar l'aparició de components de força no desitjades. A continuació es descriuen les diferents configuracions de muntatge per a l'assaig dels enganxalls dinamomètrics.

Forces longitudinal i vertical (F_x - F_z): Per a l'aplicació de la força longitudinal a tracció i a compressió en els enganxalls dinamomètrics s'ha realitzat un muntatge amb el cilindre gran per aplicar una força màxima de 100 kN. Per a l'aplicació de la força vertical s'utilitza el cilindre petit per aplicar una força a compressió fins a valors de 50 kN. Mitjançant el pòrtic de doble biga es situa el cilindre gran en disposició vertical i el cilindre petit en disposició horitzontal. A la Figura 10.6 es mostra el muntatge utilitzat en els enganxalls dinamomètrics de bola i a la Figura 10.7 es mostra el muntatge per a l'enganxall dinamomètric d'anella.

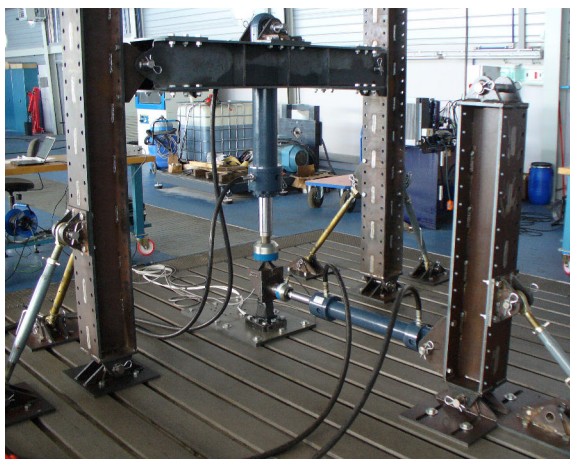


Figura 10.6: Muntatge per a l'assaig de força longitudinal i força vertical en els enganxalls dinamomètrics de bola

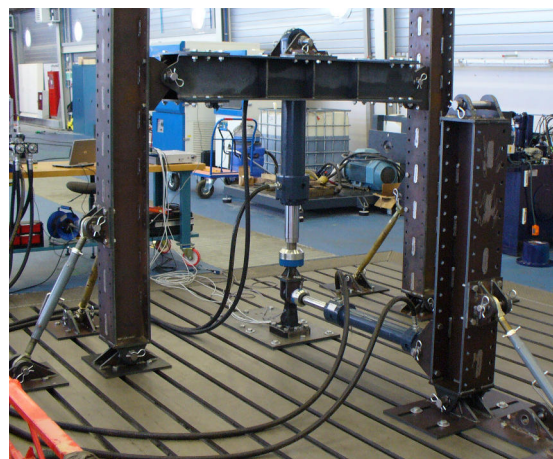


Figura 10.7: Muntatge per a l'assaig de força longitudinal i força vertical en l'enganxall dinamomètric d'anella

Forces diagonal i vertical ($F_{dp}-F_z$, $F_{dn}-F_z$): Per a l'aplicació de la força diagonal es situa el cilindre gran muntat de tal manera que forma un angle de $14,4^\circ$ respecte la vertical. Aquest és l'angle més pròxim, i que permeten els utilatges utilitzats, que estableix una proporció entre la component de força longitudinal màxima de 100 kN i la transversal màxima de 25 kN. Així, si s'aplica una força màxima amb el cilindre de 100 kN s'obté una component longitudinal de 97,0 kN i una component transversal de 24,3 kN. Depenent de la disposició del cilindre gran, definit per l'angle δ indicat a la Figura 10.1, es té la disposició diagonal positiva (*dp*) o diagonal negativa (*dn*). En valors d'angle positiu, amb el cilindre treballant a tracció les components F_x i F_y són positives, i amb el cilindre aplicant força de compressió aquestes dos components seran negatives. En canvi, en la disposició en angle negatiu, per a tracció es té F_x positiva i F_y negativa, i amb els signes invertits per al cas de força a compressió. A la Figura 10.8 i la Figura 10.9 es mostren les dues disposicions del cilindre gran.

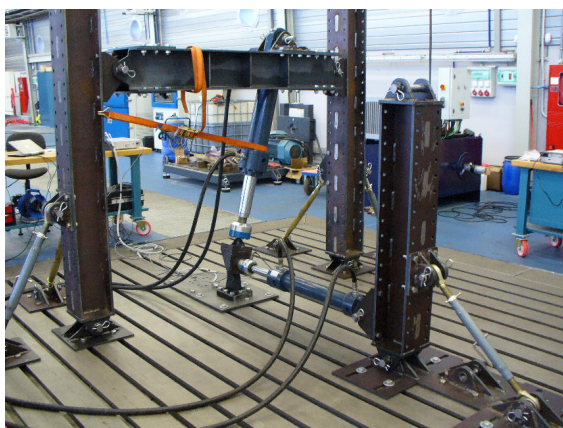


Figura 10.8: Assaig de força diagonal amb angle positiu en els enganxalls dinamomètrics de bola

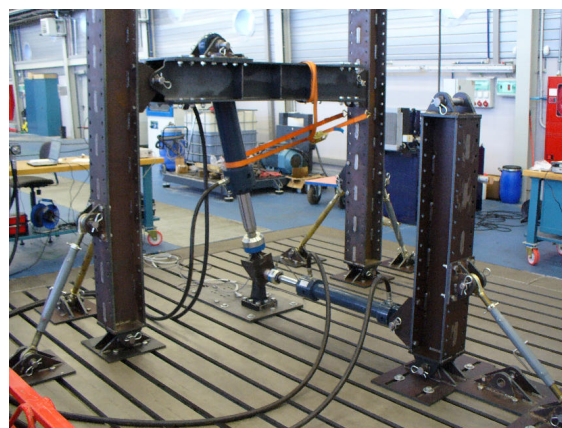


Figura 10.9: Assaig de força diagonal amb angle negatiu en els enganxalls dinamomètrics de bola

10.6. Tractament de les dades dels assajos experimentals

Amb les dades adquirides dels senyals dels ponts de mesura i de les cèl·lules de càrrega del cilindre, el següent pas consisteix en obtenir els valors de referència, tant dels senyals com de les forces aplicades als dinamòmetres per als estudis de validació del comportament d'aquests.

10.6.1. Càlcul dels valors de referència dels senyals en els assajos

Un cop adquirides les dades en els assajos es procedeix a calcular els valors de referència dels senyals, tant dels ponts de mesura com de les cèl·lules de càrrega. Per al cas dels assajos amb un cilindre, el procediment és similar al que s'ha utilitzat per al cas del dinamòmetre tripuntal (Apartat 6.6). En aquests assajos, el procés d'adquisició durant l'assaig experimental s'ha programat de forma que s'adquireixen les dades contínuament cada 0,1 s dels 4 ponts de mesura i de les 2 cèl·lules de càrrega dels cilindres hidràulics, amb un interval de temps mínim de 30 s per a cada estat de càrrega en els escalonaments. Els valors que s'utilitzen en les fases posteriors s'obtenen a partir de fer la mitjana dels valors de cada senyal (sigui del pont o de la cèl·lula de càrrega) adquirits en aquests intervals.

Per als assajos a càrrega combinada realitzats amb els dos cilindres simultàniament, els intervals de temps entre escalonaments són d'un mínim de 10 s, i s'ha procedit de forma equivalent als casos dels assajos amb un cilindre però utilitzant les dades adquirides en aquests 10 s.

Referent al soroll en els senyals dels ponts de mesura, s'observa que per als casos més desfavorables (els ponts A i B dels enganxalls dinamomètrics, on el senyal és més baix) l'error degut a l'amplitud del soroll no supera l'1,5% en fons d'escala. Tot i ser considerablement més gran que en el cas del dinamòmetre tripuntal, es considera que, ja que en el tractament dels senyals adquirits es realitza la mitjana en l'interval, s'admet que aquest soroll es cancel·la i no es té en consideració en els càlculs posteriors en el procés de validació.

10.6.2. Determinació de la força aplicada a l'enganxall dinamomètric en els assajos

Abans d'iniciar un cicle d'assaig experimental s'adquireixen els valors de senyal a càrrega nul·la de les cèl·lules de càrrega instal·lades als cilindres. Per fer-ho, s'assegura que no hi hagi contacte entre l'utilatge i l'enganxall dinamomètric en adquirir aquestes dades. Així, per als enganxalls dinamomètrics de bola, es fa retrocedir lleugerament el cilindre petit per a que es perdi el contacte entre l'utilatge i l'enganxall dinamomètric. En l'enganxall dinamomètric d'anella es desacobla el conjunt dels dos utilatges per prendre les mesures. D'aquesta manera es pretén garantir que no hi ha cap tipus de càrrega a l'hora d'adquirir els valors de senyal a càrrega nul·la a l'inici de l'assaig.

De la mateixa manera que en els assajos amb el dinamòmetre tripuntal, també es fa una distinció entre la sensibilitat a compressió i la sensibilitat a tracció de les cèl·lules de càrrega instal·lades als cilindres, tal i com s'especifica en el full de calibratge del fabricant (Taula 6.5). Amb la recta característica de cada cèl·lula de càrrega i els senyals d'aquestes, es calculen les forces teòricament aplicades a l'enganxall dinamomètric durant l'assaig experimental.

10.7. Estudi de l'estabilitat dels ponts de mesura

Per tal de valorar l'estabilitat del sistema de mesura de forces amb ponts de galgues extensomètriques, s'estudien un conjunt d'errors en les mesures. Per això, de la mateixa manera que en el dinamòmetre tripuntal, s'estudia la linealitat, la repetibilitat, la reversibilitat, la sensibilitat i la fluència en cada pont de mesura dels enganxalls dinamomètrics (Apartat 6.7). L'objectiu d'aquest estudi no és comprovar si la mesura de les forces a partir dels senyals és precisa (aquest aspecte s'analitza en el següent apartat en la validació del model teòric), sinó determinar si el comportament de l'equip de mesura és estable i repetitiu independentment de la seqüència de forces aplicades.

En aquest estudi s'ha utilitzat un assaig de referència per a la validació de cada pont de mesura. Per als ponts A i B, utilitzats per a la mesura de la component longitudinal de força, s'han utilitzat les dades de l'assaig F_x a tracció i compressió. Per al pont C, per a la mesura de la component vertical de força, s'han utilitzat les dades obtingudes en l'assaig F_z . Per al pont D, s'utilitzen les dades de l'assaig F_{dn} a tracció i a compressió.

A la Taula 10.1 es mostren els errors en cada pont de mesura per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, a la Taula 10.2 es mostren els resultats per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats i per últim, a la Taula 10.3 es mostren els resultats per a l'enganxall dinamomètric d'anella. Les equacions per a la determinació dels errors de linealitat, repetibilitat, reversibilitat, sensibilitat i fluència són les mostrades a l'Apartat 6.7.1.

Taula 10.1: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

	e_Z	e_L	e_R	e_H	e_K	e_F
Pont A	0,364%	0,522%	0,255%	0,378%	1,841%	0,083%
Pont B	0,689%	2,129%	0,508%	2,965%	4,612%	0,172%
Pont C	0,310%	0,828%	0,222%	0,258%	0,295%	0,093%
Pont D	1,358%	6,793%	2,205%	8,472%	7,460%	0,813%

Taula 10.2: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

	e_Z	e_L	e_R	e_H	e_K	e_F
Pont A	0,865%	1,290%	0,414%	0,901%	5,617%	0,821%
Pont B	1,017%	2,248%	0,318%	3,468%	4,378%	1,067%
Pont C	0,279%	0,790%	0,060%	0,437%	0,161%	0,038%
Pont D	0,124%	6,648%	0,379%	5,969%	6,282%	0,025%

Taula 10.3: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric d'anella

	e_Z	e_L	e_R	e_H	e_K	e_F
Pont A	1,137%	0,813%	0,435%	0,325%	3,358%	0,918%
Pont B	0,763%	1,523%	0,361%	1,875%	2,320%	0,683%
Pont C	0,123%	1,352%	0,046%	0,582%	0,072%	0,024%
Pont D	0,102%	5,649%	0,405%	6,408%	7,851%	0,009%

Si s'analitzen globalment els enganxalls dinamomètrics, s'observa que tots tenen un comportament similar, ja que cada un dels punts de mesura es comporta de forma semblant en els tres dinamòmetres. En els punts A i B, en tots els casos es comprova que els errors són poc importants, amb errors de certa importància en la linealitat, la histèresis i la sensibilitat. El pont C té un bon comportament, amb errors reduïts en tots els factors.

En el pont on s'observen els desajustos més significatius és en el pont D. Tot i que els errors de zero, de repetibilitat i de fluència són reduïts, els errors de linealitat i histèresis són importants comparats amb la resta de punts de mesura. Es detecta per aquest pont un comportament poc lineal per al cicle de càrrega decreixent, i si es compara amb la resta de cicles a càrrega creixent, es posa de manifest un efecte d'histèresis significatiu. Aquest efecte condiciona, a més de l'error de reversibilitat, també els errors de linealitat i sensibilitat, i per aquest motiu s'obtenen errors importants en aquests factors. Si s'analitzés només els 3 cicles a força creixent, els resultats serien significativament inferiors, amb errors similars als de la resta dels punts.

Per al pont D també s'han calculat aquests factors per a l'assaig en la direcció F_{dp} , on en general s'han obtingut errors similars. Cal destacar que s'hauria d'haver realitzat l'estudi amb un assaig a força transversal sense aplicació simultània de component

longitudinal de força, ja que és d'esperar que per al cas únicament amb component transversal els errors per a cada un dels factors serien més reduïts. Aquest efecte s'ha comprovat realitzant el càlcul dels errors per al pont B en els assajos en diagonal, on s'obté un patró d'errors similar al del pont D. Aquest aspecte posa de manifest una afectació provocada per la component de força longitudinal en el pont D.

En resum, els ponts de mesura de les components longitudinal i vertical de força (ponts A, B i C) es comporten de forma estable i repetitiva. En canvi, per al pont D es detecta un efecte d'histerèsis important que s'ha de tenir en compte en l'estimació de la mesura de la component transversal F_y . S'intueix però, que els errors obtinguts en aquest pont no són representatius, ja que l'assaig utilitzat per a la comprovació, a part de la component transversal de força, hi ha també component longitudinal, i que afecta al comportament del pont.

10.8. Validació del model teòric dels enganxalls dinamomètrics

En aquest apartat es realitza la validació del model teòric mitjançant les dades experimentals per a cada un dels enganxalls dinamomètrics, amb l'objectiu de comprovar si les consideracions aplicades en el desenvolupament dels models i el comportament real d'aquests en condicionen la viabilitat. Els models per determinar les components de força longitudinal, transversal i vertical per a cada enganxall dinamomètric, obtinguts a l'Apartat 9.1.5, es mostren a la Taula 10.4. Com que els senyals dels ponts tenen desviacions a força nul·la significatives, per corregir aquest efecte es prenen de referència els senyals adquirits a l'inici de l'assaig (S_0) per ajustar les mesures.

Taula 10.4: Equacions del model teòric per al càlcul de les components de força en els enganxalls dinamomètrics amb compensació dels senyals a càrrega nul·la (forces en kN i senyals en V/V)

Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	$F_{x,A} = 546430,45 \cdot (S_A - S_{A,0})$
	$F_{x,B} = 546430,45 \cdot (S_B - S_{B,0})$
	$F_y = -56835,70 \cdot (S_D - S_{D,0})$
	$F_z = -71782,17 \cdot (S_C - S_{C,0}) - 60897,85 \cdot (S_A - S_{A,0})$
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	$F_{x,A} = 446204,27 \cdot (S_A - S_{A,0})$
	$F_{x,B} = 446204,27 \cdot (S_B - S_{B,0})$
	$F_y = 27446,54 \cdot (S_D - S_{D,0})$
	$F_z = 37598,74 \cdot (S_C - S_{C,0}) - 44413,86 \cdot (S_A - S_{A,0})$
Enganxall dinamomètric d'anella	$F_{x,A} = 410089,10 \cdot (S_A - S_{A,0})$
	$F_{x,B} = 410089,10 \cdot (S_B - S_{B,0})$
	$F_y = 27684,25 \cdot (S_D - S_{D,0})$
	$F_z = 35831,36 \cdot (S_C - S_{C,0}) - 17759,88 \cdot (S_A - S_{A,0})$

10.8.1. Resultats de validació del model teòric amb els assajos experimentals

A continuació es presenten els resultats per a la validació del model teòric desenvolupat mitjançant les dades adquirides en els assajos experimentals. Per a la validació es mostra per a cada component de força mesurada ($F_{x,A}$, $F_{x,B}$, F_y i F_z) els valors dels residuals, calculats a partir de la diferència entre el valor teòricament aplicat en l'assaig menys el valor mesurat a partir de les equacions del model i els senyals adquirits (Equació 6.7). Les dades utilitzades en aquesta validació corresponen a totes les configuracions d'assaig aplicant la seqüència d'assaig combinada (Apartat 10.2.2).

A la Figura 10.10 es mostren els residuals del model teòric per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.

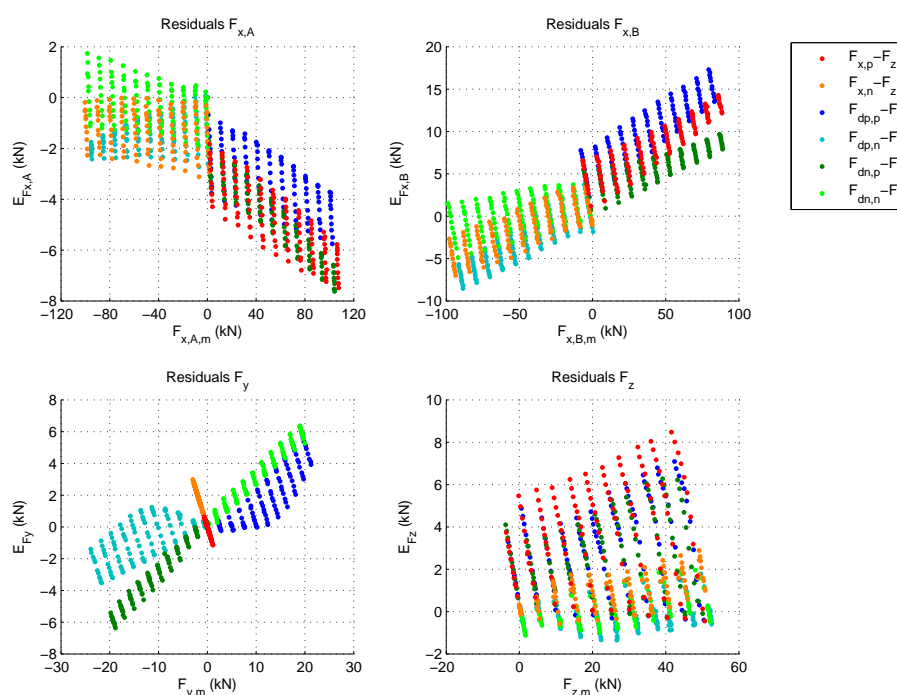


Figura 10.10: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

Per al cas dels residuals en $F_{x,A}$ s'observa que aquests es troben dins de valors acceptables tenint en compte els nivells d'error en la mesura amb galgues extensomètriques, amb errors que no sobrepassen en cap cas els 8 kN. Cal destacar que s'observa un comportament diferenciat a tracció i a compressió. Es comprova, a més, que per als diferents valors de F_z , el senyal del pont A es desvia, cosa que indica que hi ha sensibilitat creuada en aquest pont.

Per a la component longitudinal mesurada amb el pont B, s'observa una menor sensibilitat, manifestada per la disposició del núvol de punts, que fa que la força mesurada sigui inferior respecte a l'aplicada a l'enganxall dinamomètric. També s'observa sensibilitat creuada deguda a les components de força vertical i transversal, i un comportament diferenciat segons el sentit de F_x , igual que en el pont A.

Per a la mesura de la component transversal F_y , primerament es detecta que per als assajos on no s'aplica aquesta component de força sí que hi apareix senyal, i que provoca uns errors de sensibilitat creuada que arriben als 3 kN. Per als assajos on hi ha component transversal de força, s'observa que els errors que apareixen són deguts a que la sensibilitat del pont és inferior a l'esperada, on aquest aspecte ja s'ha detectat en part a les simulacions per elements finits en la validació del model teòric (Apartat 9.2).

Per a la mesura de la component vertical F_z s'aprecia també falta de sensibilitat, amb un augment dels valors dels residuals al augmentar la força aplicada. També es visualitza sensibilitat creuada en els assajos en força longitudinal i diagonal. Cal destacar que els errors són més grans en els assajos en força longitudinal positiva que en els casos amb força longitudinal negativa, cosa que posa de manifest un comportament diferenciat segons el sentit de la força.

A la Figura 10.11 es mostren els residuals del model teòric per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats.

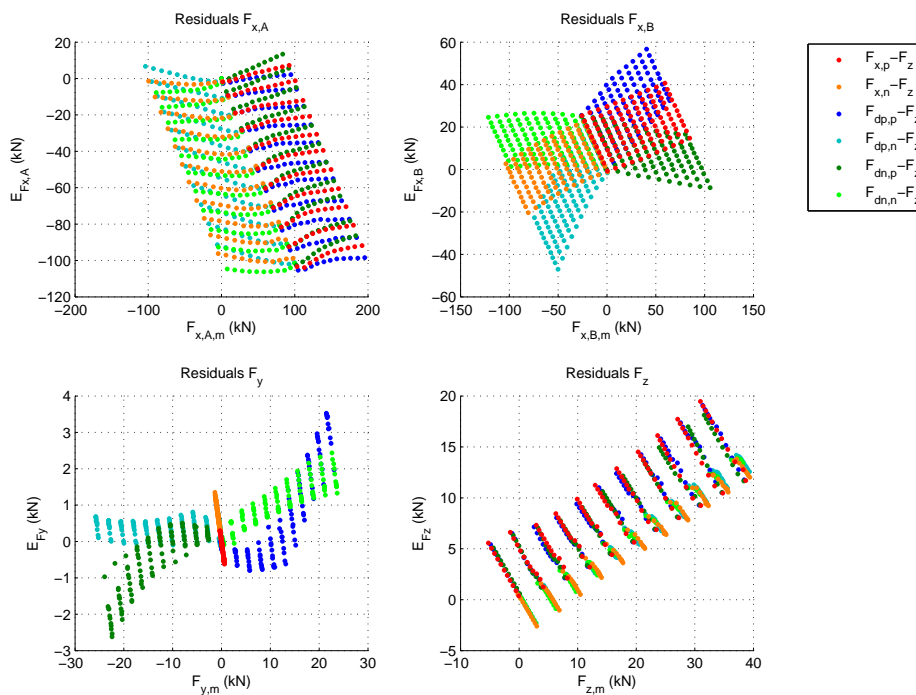


Figura 10.11: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats, en la mesura de la component longitudinal de força a partir del pont A, s'observa que apareix una sensibilitat creuada provocada per la força vertical molt important, que fa que les mesures no siguin en absolut fiables. També s'observen canvis en la tendència dels residuals en els assajos amb component transversal de força respecte al cas únicament amb força longitudinal.

Per al pont B per a la mesura de la component longitudinal de força, a més d'experimentar també una gran sensibilitat creuada provocada per la força vertical, s'afegeix en aquest cas la disminució de sensibilitat respecte als valors de senyal esperats. Tot i això, els efectes de la sensibilitat creuada provocats per la força vertical no són tant importants com en el pont A, però igualment les mesures no són en absolut

correctes. També s'observen desviacions en funció de la direcció de la força en els assajos diagonals respecte el cas de força longitudinal, cosa que indica sensibilitat creuada provocada per la component transversal de força.

Per al cas de la mesura de la component transversal de força, aquesta no experimenta canvis importants provocats per la força vertical, i igual que en el cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, s'observa una menor sensibilitat, amb un increment de l'error a mesura que la força transversal aplicada és més gran. També la distribució dels residuals manifesta certa no linealitat en el comportament d'aquest pont.

Per a la mesura de la component vertical de força apareixen desviacions en la pròpia mesura d'aquesta component, i també s'observa sensibilitat creuada provocada per la component longitudinal de força. En aquest cas, no s'observa sensibilitat creuada provocada per la component transversal de força.

Per últim, a la Figura 10.12 es mostren els residuals del model teòric per a l'enganxall dinamomètric d'anella.

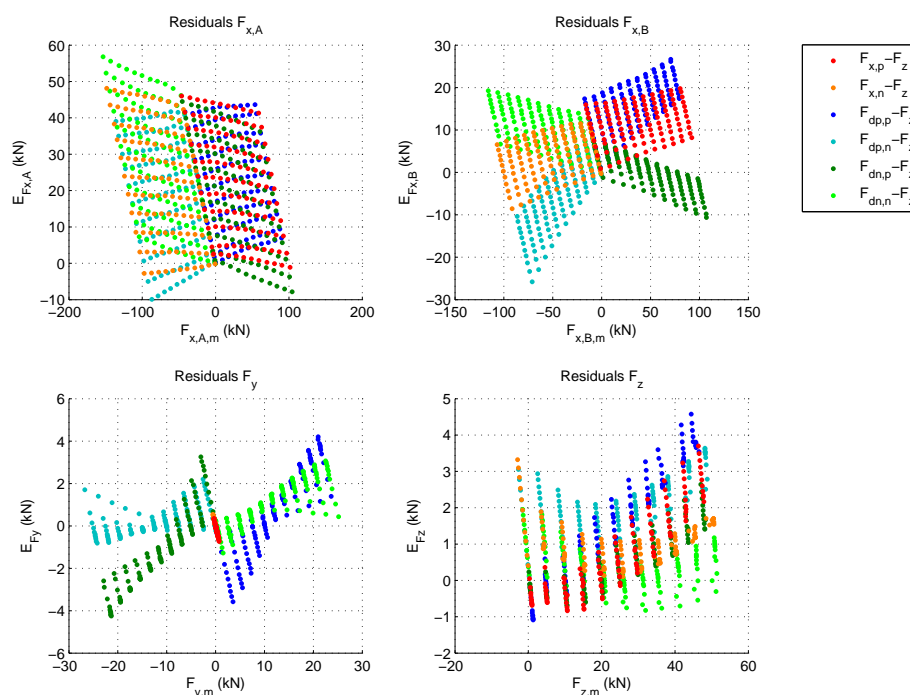


Figura 10.12: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric d'anella

En aquest enganxall dinamomètric, en els ponts A i B, s'identifiquen les mateixes desviacions que en el cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats. En el pont D s'observen desviacions molt similars als residuals dels altres dos dinamòmetres. Per al pont C, en la mesura de F_z es detecta una lleu disminució de la sensibilitat, similar al cas del de bola amb base de 12 forats.

10.8.2. Anàlisi de les desviacions en la mesura amb el model teòric

Amb els resultats obtinguts dels residuals, es pot concloure que el model teòric desenvolupat no és adequat per a la determinació de les components de força, ja que en alguns casos la sensibilitat creuada entre punts és molt important, sobretot en els punts A i B dels enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella. En base a aquests resultats, sembla que la configuració basada en la utilització de 2 graelles de mesura, utilitzada a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, té un millor comportament dels punts A i B, que no en els dinamòmetres on s'ha optat per una configuració de pont complet per a la mesura de l'esforç axial.

Cal tenir present que, en general, per a desenvolupaments amb galgues extensomètriques es poden arribar a errors del 10% (generalment una disminució de la deformació mesurada) a causa dels errors en l'enganxat de les galgues i en l'alineació amb la direcció de mesura. També afecta a la mesura el coneixement adequat de les característiques del material, la geometria de la peça, etc. A més, com s'ha comprovat a l'Apartat 9.2, aquests errors en part són atribuïbles també a algunes de les consideracions realitzades en el desenvolupament dels models teòrics, donada la geometria complexa i la disposició de les graelles de mesura.

Per analitzar més en detall les desviacions obtingudes, es realitza una comparació entre les forces aplicades, les components de força mesurades i els senyals dels punts. Primerament s'estudien els senyals de resposta en cada assaig, i posteriorment els casos de components de força mesurades i aplicades per identificar les desviacions en la mesura. Aquesta anàlisi es realitza amb els casos del 1r cicle dels assajos amb una força aplicada, ja que en els assajos combinats es comprova una bona superposició d'efectes entre assajos amb una força.

Anàlisi dels senyals obtinguts en els punts de mesura

A continuació s'exposa per a cada enganxall dinamomètric i per a tots els assajos amb una força els senyals obtinguts quan s'aplica la força màxima. Es mostra a la Taula 10.5 els senyals en els punts de mesura de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, a la Taula 10.6 els senyals per al de bola amb base de 8 forats i a la Taula 10.7 els senyals per al d'anella.

Taula 10.5: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

	$F_{x,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,n}$	$F_{x,n}$	$F_{x,n}$ $F_{y,p}$	$F_{x,n}$ $F_{y,n}$	F_z
Senyal S_A	189,85	181,79	185,73	-181,46	-176,01	-170,73	3,08
S_B	167,17	159,49	167,13	-172,76	-171,00	-163,76	-11,04
($\mu V/V$) S_C	-121,88	-114,10	-135,27	135,30	167,87	145,31	-674,17
S_D	-8,62	-353,75	343,89	7,02	-351,68	381,66	0,57

Taula 10.6: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

	$F_{x,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,n}$	$F_{x,n}$	$F_{x,n}$ $F_{y,p}$	$F_{x,n}$ $F_{y,n}$	F_z
Senyal S_A	207,07	210,78	189,51	-224,94	-205,68	-231,67	211,12
S_B	190,77	144,90	238,02	-182,29	-217,80	-116,19	-58,80
($\mu V/V$) S_C	118,09	120,69	100,66	-186,34	-167,39	-193,57	1219,61
S_D	-14,16	809,05	-858,35	-19,49	861,29	-894,91	-5,07

Taula 10.7: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric d'anella

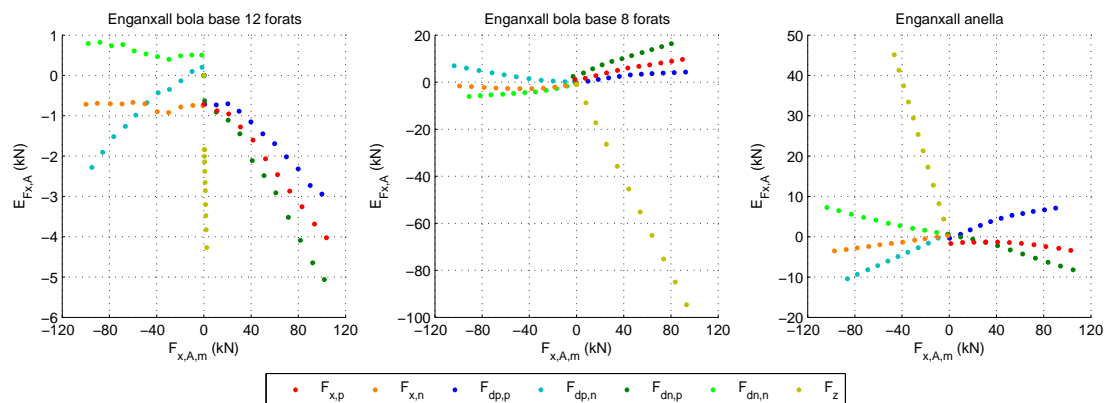
		$F_{x,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,p}$	$F_{x,p}$ $F_{y,n}$	$F_{x,n}$	$F_{x,n}$ $F_{y,p}$	$F_{x,n}$ $F_{y,n}$	F_z
Senyal ($\mu\text{V/V}$)	S_A	247,92	219,35	257,87	-234,36	-249,04	-207,39	-102,15
	S_B	224,17	195,14	258,98	-223,66	-253,19	-173,39	-38,46
	S_C	139,84	127,72	134,70	-203,43	-176,68	-190,92	1290,51
	S_D	-21,25	874,66	-852,15	-16,36	928,90	-968,34	-13,57

Primerament, tal i com ja s'ha identificat en els estudis previs en el desenvolupament d'aquests dinamòmetres, el senyal en els ponts A i B dels enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella (amb pont complet de galgues) són més grans que el cas del de bola amb base de 12 forats (amb pont diagonal de galgues). Els senyals en fons d'escala dels ponts C i D, que mesuren les components del moment flector, són significativament més grans que els senyals en fons d'escala del pont A i B, que mesuren l'esforç axial.

Es comprova, per als enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella, que el senyal del pont A per a l'assaig F_z té el mateix ordre de magnitud que en els assajos amb força longitudinal, cosa que posa de manifest una gran sensibilitat creuada, ja que s'obté un senyal en el pont A i aquest teòricament hauria de ser nul. En els assajos en direcció diagonal, als enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella, també s'observa una gran variabilitat en els senyals del pont B, amb una important sensibilitat creuada d'aquest pont a la component transversal de força.

Identificació de les desviacions en la mesura de $F_{x,A}$

A la Figura 10.13 es mostren els residuals en la mesura de la component longitudinal de força amb el pont A per als tres dinamòmetres, obtinguts a partir de les dades del 1r cicle de càrrega dels assajos amb una força aplicada.


Figura 10.13: Residuals per al càlcul de $F_{x,A}$ en cada un dels enganxalls dinamomètrics

Per al cas del de bola amb base de 12 forats s'observa un bon comportament en totes les configuracions d'assaig, amb errors que entren dins de l'esperat en les mesures amb ponts de galgues extensomètriques. Per als altres dos, on el pont A és un pont complet de mesura, en els casos concrets de la força longitudinal ($F_{x,p}$ i $F_{x,n}$) els resultats són coherents, amb valors d'error similars al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.

En els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella, l'error augmenta per al cas dels assajos diagonals F_{dp} i F_{dn} , cosa que evidencia una sensibilitat creuada del pont A a la força transversal. Per al cas del de bola amb base de 12 forats també apareix aquest efecte però en menor magnitud.

Per als assajos de força vertical F_z , a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats no s'experimenta una sensibilitat creuada important. Per al de bola amb base de 8 forats, en canvi, s'observa una sensibilitat creuada molt elevada. En l'assaig vertical a força màxima, la mesura de força longitudinal del pont A arriba a gairebé els 100 kN. També el d'anella experimenta una sensibilitat elevada del pont A a la força vertical, on per a força vertical màxima, el valor de força longitudinal mesurat és de -45 kN, en sentit contrari al cas del de bola amb base de 8 forats.

Identificació de les desviacions en la mesura de $F_{x,B}$

A la Figura 10.14 es mostren els residuals en la mesura de la força longitudinal amb el pont B en els assajos amb una força aplicada per als tres enganxalls dinamomètrics.

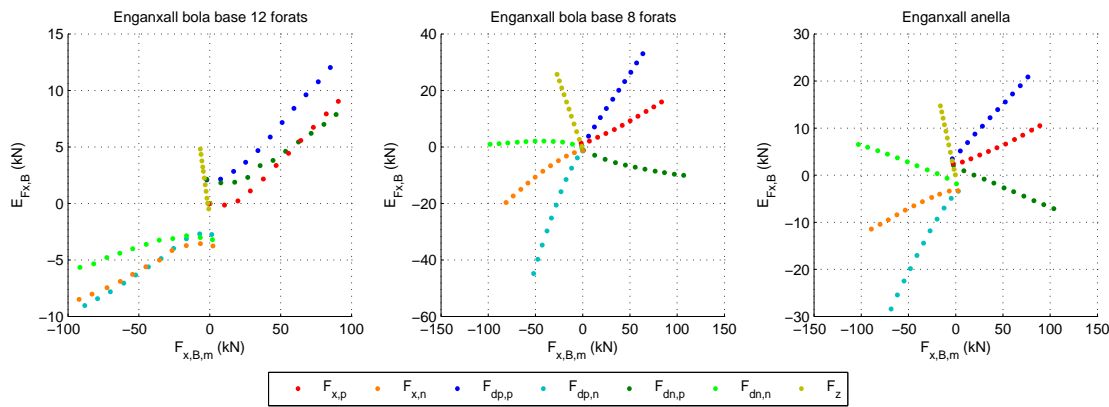


Figura 10.14: Residuals per al càlcul de $F_{x,B}$ en cada un dels enganxalls dinamomètrics

Per a la mesura de la força longitudinal mitjançant el pont B s'observa que per als assajos de força longitudinal $F_{x,p}$ i $F_{x,n}$ els resultats per als tres enganxalls són similars, experimentant disminucions en la força longitudinal mesurada aproximadament del 10% del fons d'escala per al cas del de bola amb base de 12 forats i del d'anella, i del 20% per al de bola amb base de 8 forats.

A més, en els enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats, experimenten desviacions addicionals en els assajos a força diagonal F_{dp} i F_{dn} , amb tendències molt similars en els dos casos, i amb desviacions més grans que per al cas del pont A. En canvi, en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, no hi ha desviacions importants en els assajos diagonals respecte als de força longitudinal. Es comprova també que la sensibilitat creuada del pont B a la força vertical és considerablement més reduïda que en pont A.

Identificació de les desviacions en la mesura de F_y

A la Figura 10.15 es mostren els residuals en la mesura de la component transversal de força amb el pont D en els assajos amb una força aplicada per als tres enganxalls dinamomètrics.

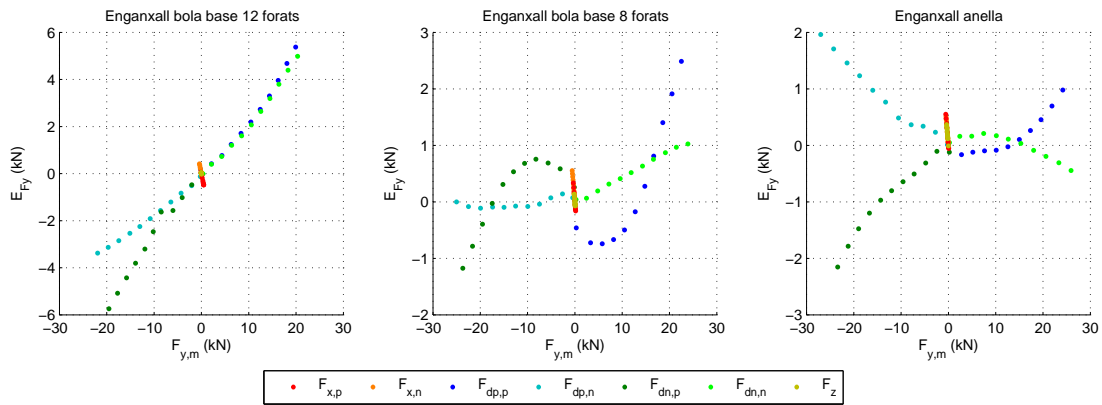


Figura 10.15: Residuals per al càlcul de F_y en cada un dels enganxalls dinamomètrics

Tal i com s’ha comentat en l’estudi de l’estabilitat dels ponts de mesura (Apartat 10.7), es visualitza un comportament no lineal en els ponts de mesura D, on també s’observa que la sensibilitat creuada d’aquest pont amb la força vertical i longitudinal és pràcticament nul·la.

En el pont D de l’enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, tot i ser el que té un comportament més lineal, és on s’identifica una disminució de la sensibilitat més gran, si es compara amb la resta d’enganxalls dinamomètrics. També s’identifica un comportament diferenciat depenent del tipus d’assaig realitzat, ja sigui l’assaig $F_{dp,p}$, $F_{dp,n}$, $F_{dn,p}$ o $F_{dn,n}$.

Identificació de les desviacions en la mesura de F_z

Per últim, a la Figura 10.16 es mostren els residuals en la mesura de la component vertical de força en els assajos amb una força aplicada per als tres enganxalls dinamomètrics.

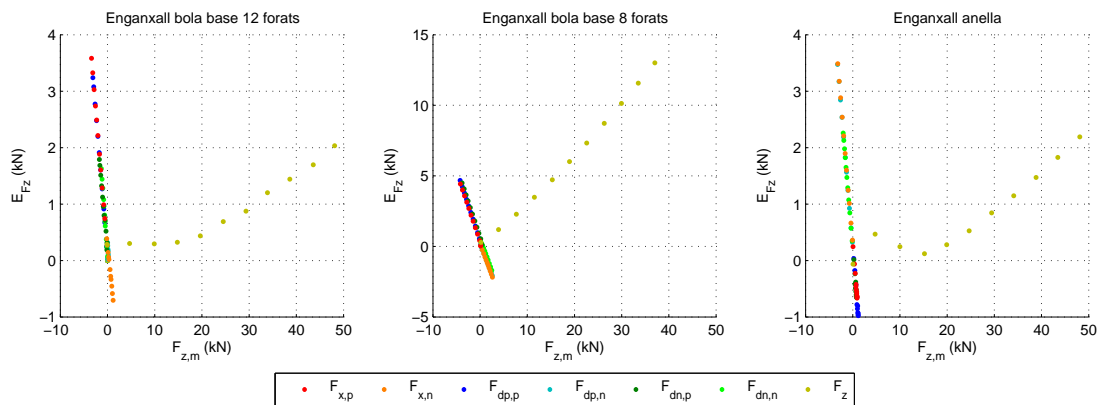


Figura 10.16: Residuals per al càlcul de F_z en cada un dels enganxalls dinamomètrics

Per als casos de l’enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats i del d’anella, els errors en la mesura de la component F_z són reduïts. Només en el de bola amb base de 8 forats s’observa una disminució significativa de la sensibilitat.

Cal tenir present que en la mesura de la força vertical hi intervé també el senyal del pont A. Per al cas del de bola amb base de 12 forats, com que en l’estimació de la força longitudinal no apareixen errors significatius, aquests no afecten significativament en la mesura de la força vertical. Per al cas de l’enganxall de bola amb base de 8 forats, com

que l'error en la mesura de la força longitudinal és gran, apareix la desviació en l'estimació de F_z . Si s'admet que el senyal en el pont A és zero, en el càlcul de la component vertical de força per a aquest enganxall dinamomètric, la mesura de F_z seria de 45,9 kN, i aquest és un valor que entra dins dels marges d'error habituals. Si es realitza el mateix plantejament, per a l'enganxall dinamomètric d'anella, s'obté un valor en l'estimació de F_z de 46,2 kN, on en aquest cas, donada la seva geometria, el moment que provoca la força longitudinal en la secció d'estudi és pràcticament zero.

En els assajos sense component vertical de força s'observa també una certa sensibilitat en el pont C provocada per la component longitudinal de força, on fins i tot superen els errors en el cas de component vertical, amb desviacions de fins a 5 kN.

10.8.3. Estudis per a la identificació dels errors en la mesura amb el model teòric

Atès que els errors en alguns casos són considerables, es realitza un conjunt d'estudis per identificar les possibles causes d'aquests, especialment per a les desviacions provocades per les grans sensibilitats creuades. Es plantegen dues hipòtesis o possibles causes que podrien provocar les sensibilitats creuades identificades. Aquestes són:

- Alguna de les galgues extensomètriques no està adequadament enganxada, de manera que mesura menys deformació que la que realment hi ha al material base.
- La geometria real de l'enganxall es desvia de la teòrica, i per tant es dona el cas de seccions no simètriques a la llança de l'enganxall i amb els paràmetres característics de diferent valor als utilitzats en la modelització.

Aquestes desviacions explicarien aquests errors de sensibilitat creuada tant important en els ponts de mesura d'esforç axial (ponts A i B), ja que aquests ponts de mesura no compensen adequadament les deformacions provocades per les components del moment flector si la secció no és simètrica. Ja que les deformacions provocades per l'esforç axial són considerablement més petites que les provocades per les components del moment flector, un error en la compensació de la flexió provoca grans errors al pont de mesura de l'axial, ja que desviacions que són acceptables en la mesura de la deformació per flexió, amb un error de la mateixa magnitud, no ho són per a l'esforç axial.

En base a aquestes hipòtesis, la sensibilitat tan elevada del pont A a la component vertical de força es pot explicar a partir de les diferències en les deformacions experimentades pels punts superior i inferior. Atès que en el cas de força vertical la deformació unitària d'aquests punts és molt més elevada que en les càrregues longitudinals, fa que en càrrega vertical una compensació no adequada del moment flector en el pont A es tradueixi en errors grans en la mesura de la component longitudinal de força, i per tant no s'aconsegueix una compensació correcta del moment flector. Una justificació equivalent es pot realitzar per a explicar la sensibilitat creuada del pont B a les components transversals de força, on aquest, al no compensar correctament l'efecte de la flexió i al ser les deformacions d'aquesta component considerablement més grans que les del propi esforç axial, apareix aquesta sensibilitat creuada tant important per aquesta component de força.

Per tal de validar aquestes consideracions es realitzen a continuació un conjunt d'estudis, on s'analitza l'efecte de la disminució en la mesura d'una de les galgues i l'efecte d'una secció d'estudi no simètrica.

Estudi de la disminució en la mesura de deformació per a cada galga

Per analitzar un possible mal comportament de les galgues per una inadequada transferència de tota la deformació a la galga per un enganxat defectuós, es realitza una anàlisi on es simula una disminució del 10% en la mesura de la deformació unitària en una de les galgues. Per a aquesta anàlisi es presenta el cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats perquè és el cas on els errors en la validació experimental són més grans, on per als altres dos enganxalls dinamomètrics s'obtenen resultats similars.

L'error en cada component de força mesurada pel dinamòmetre es calcula en base a aplicar un 10% de disminució en els valors de deformació en cada una de les galgues de l'enganxall dinamomètric, definides a la Figura 9.4. Les dades de referència (el cas sense cap error) corresponen als valors de deformació unitària per a cada graella de mesura obtinguts en la simulació FEM (Apartat 9.2). Els percentatges d'error corresponents a cada component de força mesurada mostrats a la Taula 10.8 es calculen a partir de la diferència del cas on s'aplica la desviació respecte el cas sense desviació, i s'expressa respecte el valor de força en fons d'escala per a cada component de mesura.

Taula 10.8: Valors d'error en l'estimació de la força mesurada per al cas d'un error simulat en cada galga extensomètrica per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Component de mesura	Galga amb error de mesura	Cas amb força aplicada a fons d'escala				
		$F_{x,p}$	$F_{x,n}$	$F_{y,p}$	$F_{y,n}$	F_z
$F_{x,A}$ (Pont A)	Galga P_1	-0,7%	0,6%	0,0%	0,0%	17,8%
	Galga P_2	-10,0%	9,9%	0,0%	0,0%	-18,6%
$F_{x,B}$ (Pont B)	Galga P_3	-5,0%	5,0%	10,2%	-10,2%	0,3%
	Galga P_4	-5,0%	5,0%	-10,2%	10,2%	0,3%
F_z (Pont C)	Galga P_5	0,2%	-0,2%	0,0%	0,0%	-4,8%
	Galga P_6	-2,1%	2,1%	0,0%	0,0%	-4,8%
F_y (Pont D)	Galga P_7	1,8%	-1,8%	-4,8%	4,8%	0,2%
	Galga P_8	-1,8%	1,8%	-4,8%	4,8%	-0,2%

Per al pont de mesura A, per a força longitudinal no apareixen errors significatius per al cas de la galga P_1 , ja que la deformació d'aquesta realment és molt petita, i per a errors en la galga P_2 els errors en la mesura de la component longitudinal de força arriben al 10%. Els errors més importants en aquest pont apareixen en el cas de força vertical aplicada, amb errors del 18% aproximadament, deguts a la no compensació de les deformacions provocades per aquesta força. Per al pont de mesura B, la desviació en la mesura d'una de les galgues provoca un error del 5% en l'estimació de la força longitudinal quan s'aplica aquesta força. En el cas de força transversal aplicada, l'error en la mesura d'aquest pont és del 10,2%, atribuïble a la no compensació del moment flector provocat per aquesta força.

Per al pont C per a la mesura de la component del moment flector provocat per la força vertical, si s'admet una disminució del 10% en la mesura d'una de les galgues superior o inferior, l'error en l'estimació de la mesura de F_z és del 4,8%. En forces longitudinals, i només amb desviació a la galga inferior, apareix en aquest pont un error del 2,1%, a causa de la no compensació de les deformacions provocades per aquesta component. De

la mateixa manera, en les galgues a dreta o esquerra per a la mesura de flexió provocada per la component transversal de força mitjançant el pont D, amb un error del 10% en una d'elles, també apareixen errors del 4,8% en la mesura de F_y . També apareix un error del 1,8% en aquest pont per la no compensació de les deformacions provocades per la component longitudinal de força.

Desviacions provocades per una secció d'estudi no simètrica

Un dels aspectes que s'ha comprovat un cop finalitzada la mecanització els enganxalls, és que les dimensions finals no corresponen exactament a les previstes en el model CAD. Una mesura de les dimensions del forat posterior per la part exterior posa de manifest que aquestes desviacions són de l'ordre de 2 a 3 mm segons del cas. Cal tenir present que el mecanitzat tant de les cares exteriors de l'enganxall com del forat mecanitzat per la part posterior ha estat complex, donada la dificultat de situar correctament cada enganxall al centre de mecanitzat.

No s'ha pogut validar la geometria interna del forat mecanitzat donada la impossibilitat de realitzar mesures adequades amb instruments de mesura comuns, i tampoc amb l'equip de mesura tridimensional en que s'ha modelitzat el model CAD-3D de cada enganxall, ja que amb el palpador de mesura no s'ha pogut tenir accés suficient a l'interior del forat per realitzar una mesura fiable.

Per valorar l'efecte d'aquestes desviacions en el mecanitzat del forat posterior, es proposa realitzar simulacions FEM per comprovar l'efecte en una desviació coneguda. Es contempla una desviació del forat mecanitzat de 3 mm en les dues direccions i els dos sentits sobre el pla de la base de l'enganxall. Així, s'estudien desviacions del forat mecanitzat en l'eix z de l'enganxall en cada sentit (desviació cap amunt i cap avall) i desviacions en l'eix y també en cada sentit (desviació cap a la dreta i cap a l'esquerra). En aquest estudi no es contemplen altres situacions com una desviació en la direcció x (forat més o menys profund) i tampoc cap rotació relativa del forat respecte a l'enganxall.

Taula 10.9: Valors d'error en l'estimació de la força mesurada per als casos amb desviacions en el mecanitzat del forat posterior per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Desplaçament del forat mecanitzat posterior	Component de mesura	Força aplicada a fons d'escala				
		$F_{x,p}$	$F_{x,n}$	$F_{y,p}$	$F_{y,n}$	F_z
3 mm amunt (despl. z positiu)	$F_{x,A}$	-6,9%	6,8%	0,0%	0,0%	-35,4%
	$F_{x,B}$	-4,3%	4,2%	0,0%	0,0%	-13,8%
	F_y	0,0%	0,0%	-0,2%	0,2%	0,0%
	F_z	-1,3%	1,3%	0,0%	0,0%	8,4%
3 mm avall (despl. z negatiu)	$F_{x,A}$	9,8%	-9,8%	0,0%	0,0%	34,2%
	$F_{x,B}$	4,6%	-4,7%	0,0%	0,0%	14,0%
	F_y	0,0%	0,0%	0,8%	-0,8%	0,0%
	F_z	1,4%	-1,4%	0,0%	0,0%	-4,8%
3mm cap a l'esquerra (despl. y positiu)	$F_{x,A}$	0,1%	-0,1%	-14,6%	14,6%	0,1%
	$F_{x,B}$	3,0%	-3,0%	-25,5%	25,5%	-0,2%
	F_y	-6,1%	6,1%	2,5%	-2,5%	-0,2%
	F_z	0,0%	0,0%	3,0%	-3,0%	0,2%
3 mm cap a la dreta (despl. y negatiu)	$F_{x,A}$	0,1%	-0,2%	14,6%	-14,6%	0,0%
	$F_{x,B}$	3,1%	-3,0%	25,5%	-25,5%	-0,1%
	F_y	6,1%	-6,1%	2,5%	-2,5%	0,2%
	F_z	0,0%	0,1%	-2,9%	2,9%	0,2%

A la Taula 10.9 es presenta només el resultat per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats, ja que és el que presenta majors desviacions. En la resta de simulacions realitzades amb altres enganxalls dinamomètrics els resultats són molt similars. De la mateixa manera que en la Taula 10.8, els percentatges en la desviació es calculen a partir de la diferència entre la força mesurada pel cas amb desviació i el cas de referència (corresponents als valors obtinguts en la simulació exposats a la Taula 9.5) i dividits respecte al valor de força en fons d'escala per a cada component de mesura.

A continuació es realitza una revisió de les desviacions analitzades i dels efectes que provoquen en la mesura. Cal tenir present que al modificar la posició del forat posterior, paràmetres com els moments d'inèrcia i posicions dels centres d'inèrcia de les seccions d'estudi canvien. Les conclusions que se'n deriven dels resultats de la Taula 10.9 són:

- En el descentrament del forat amunt i avall, per a la mesura de la component longitudinal, apareixen errors en els ponts A i B (més grans en el pont A que en el B). Aquest efecte és degut a que F_x provoca un moment flector en la secció, i aquesta, al no ser simètrica, el pont de mesura no compensa l'efecte d'aquest. En el descentrament del forat a dreta i esquerra, per a força longitudinal apareixen també errors en els ponts A i B (en aquest cas més grans en el pont B) ja que F_x provoca un moment flector que no es compensa al pont de mesura perquè la secció no és simètrica.
- En el descentrament del forat amunt i avall, per al cas de força F_z , els ponts A i B tenen desviacions (més importants en el pont A que en el pont B) donada la no compensació del moment flector pel fet de tenir una secció no simètrica respecte l'eix y. En el descentrament a dreta i esquerra, per al cas de força F_y , els ponts A i B tenen desviacions (més grans en B) donada a la no compensació del moment flector. Aquest efecte és la principal font d'error per sensibilitat creuada, amb errors del 35% en el pont A i del 25% en el pont B.
- Les forces transversals no provoquen desviacions en la mesura dels ponts per al cas de descentrament del forat cap amunt i cap avall. De forma equivalent, la força vertical no provoca desviacions significatives en els ponts de mesura per al cas de desviació a dreta i esquerra.
- El descentrament amunt i avall del forat posterior no implica desviacions en la mesura de F_y . De la mateixa manera, la desviació a dreta i esquerra provoca desviacions poc importants en la mesura de F_z , amb errors del 3% provocats principalment per l'error en la mesura del pont A.
- En el descentrament amunt i avall, per a la mesura de F_z , apareix un error atribuïble al canvi en el valor del moment d'inèrcia de la secció en la direcció y i també a l'error en la mesura del pont A. En el descentrament a dreta i esquerra apareix error en la mesura de F_y a causa del canvi del moment d'inèrcia de la secció en la direcció z.
- En l'aplicació de força longitudinal, en descentrament amunt i avall, apareix error en la mesura de F_z , i en el descentrament a dreta i esquerra, apareix error en la mesura de F_y . Aquest efecte es deu a que F_x , a l'estar desplaçada respecte el centre de la secció, provoca en cada cas un moment flector mesurat pel pont C o D segons el cas.

10.8.4. Conclusions en la validació del model teòric

En l'anàlisi dels senyals es comprova que els senyals dels ponts de mesura per a l'esforç axial són significativament inferiors als senyals dels ponts de mesura de les components del moment flector, donada la diferència substancial en els valors de deformació per a cada cas. Aquest aspecte ja ha estat identificat en les simulacions FEM per a la validació del disseny dels enganxalls dinamomètrics. El fet de que les deformacions per als ponts de mesura A i B siguin petites fa que els errors siguin molt grans en comparació amb els ponts C i D. El baix senyal en els ponts de mesura de l'esforç axial ha estat determinant a l'hora de no aconseguir una bona mesura amb el model teòric.

En els ponts A de mesura per a la component longitudinal de força, a part de l'efecte de la inclinació de les cares superior i inferior de la llança de l'enganxall, que ja s'ha identificat en les simulacions de validació per elements finits, en els assajos experimentals s'observa que també s'hi ha d'afegir l'efecte de la no correcta compensació del moment flector provocat per la força vertical. Aquest aspecte afecta també a la pròpia mesura de la component vertical de força, ja que aquesta depèn de la correcta mesura en el pont A. En els ponts B es comprova un efecte similar, on en aquest cas s'observa una compensació inadequada del moment flector provocat per la component transversal de força.

Els estudis simulant una disminució de la sensibilitat en una de les galgues dels ponts de mesura posen de manifest que, per al cas de mesura de la component longitudinal, apareixen errors més grans provocats per les altres components de força que no pas per la pròpia component de força a mesurar. Per exemple, en el pont B, és té un error del 5% en l'estimació de la força longitudinal, però errors del 10% en aquest pont quan hi ha aplicada força transversal.

Pel que fa a les desviacions en el mecanitzat del forat posterior, cal destacar que per al pont A, els errors més importants es donen en el desplaçament del forat mecanitzat amunt i avall per a l'assaig de força vertical, amb errors que arriben al 35%. De forma equivalent, en el pont B, els errors més importants es donen en el desplaçament a dreta i esquerra i per als assajos de força transversal, amb errors del 25%. Es comprova que els ponts de mesura de l'esforç axial no compensen correctament les components del moment flector en el cas que la secció no sigui simètrica i, juntament amb el baix nivell de deformació per a l'esforç axial en comparació amb el del moment flector, fa que apareguin errors de sensibilitat creuada importants. Per tant, es conclou que el sistema de mesura és molt sensible als desajustos en la geometria, on qualsevol desviació del comportament ideal provoca errors de sensibilitat creuada importants.

11. MODELS D'AJUST EXPERIMENTAL PER A LA MESURA AMB ELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS

En el capítol anterior per a la validació del model teòric, s'han identificat un conjunt d'aspectes que modifiquen el comportament ideal de les mesures en els enganxalls dinamomètrics. Donades aquestes desviacions, es desenvolupen un conjunt de models d'ajust experimental a partir de les dades dels assajos realitzats per obtenir les equacions que relacionin els senyals mesurats amb les forces aplicades al punt d'unió de l'enganxall dinamomètric. Es busca amb aquests nous models compensar els errors identificats, per tal d'obtenir un equip de mesura funcional i amb millors estimacions en la mesura de les components de força.

11.1. Descripció dels models d'ajust experimental per als enganxalls dinamomètrics

En els següents apartats es desenvolupen tres models d'ajust experimental diferents per determinar les forces aplicades a cada enganxall dinamomètric en funció dels senyals mesurats. Aquests models d'ajust experimental per a la determinació de les forces aplicades en els enganxalls dinamomètrics són:

- Model d'ajust experimental basat en les equacions del model teòric (model 1).
- Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats (model 2).
- Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats i amb combinació dels senyals dels punts de mesura d'esforç axial (model 3).

El model 1, consisteix en ajustar els coeficients del model teòric de cada enganxall dinamomètric analitzat en el capítol anterior. Tot i que no es preveu en aquest model compensar els efectes de sensibilitat creuada, es realitza per tal de comprovar si hi ha canvis significatius respecte als coeficients del model teòric, i fins a quin punt es poden corregir els errors en l'estimació de les components de força amb aquest tipus d'ajust. El model 2 es basa en utilitzar totes les mesures de tots els punts de galgues de cada enganxall dinamomètric per estimar cada una de les components de força. Amb aquest model es busca minimitzar l'efecte que poden tenir aspectes com la sensibilitat creuada. Per últim, el model 3 consisteix en utilitzar la suma dels senyals dels punts A i B per a la mesura de l'esforç axial, en comptes de tractar-los de forma separada en el model d'ajust experimental. Això es fa degut als desajustos observats en els coeficients en el model 2, com ja s'exposarà en detall més endavant a l'Apartat 11.2.2.

En tots els models desenvolupats es tenen en compte un conjunt de consideracions. Un dels aspectes observats és que el senyal dels punts a càrrega nul·la és significatiu, i per tant, es realitzen tots els models basats en la compensació del senyal a càrrega nul·la. Aquesta consideració ja s'aplica des del model teòric (Apartat 10.8). També, atès que en la validació del model teòric es detecten desviacions importants provocades per la sensibilitat creuada, es passa a desenvolupar tots els models d'ajust amb les dades dels assajos combinats (Apartat 10.2.2), per tal que el model s'ajusti millor en aquests casos.

11.2. Desenvolupament i validació dels models d'ajust experimental

A continuació es presenten els models d'ajust experimental desenvolupats, tot indicant les equacions dels models i els coeficients que en resulten d'aplicar el mètode d'aproximació per mínims quadrats. També per a cada model d'ajust i per a cada enganxall dinamomètric es presenten els residuals obtinguts per analitzar la precisió en la mesura de les forces al punt d'unió de l'enganxall.

11.2.1. Model 1: Model d'ajust experimental basat en el model teòric

Per tal de millorar el model per a les mesures de les components de força aplicades en els assajos experimentals es proposa el model 1 on s'ajusten els coeficients de l'equació teòrica. En aquest model no es preveu compensar les sensibilitats creuades de forma important ja que aquestes s'haurien de compensar en un model on intervinguin tots els senyals mesurats en els diferents ponts per a l'estimació de cada component de força. Tot i això es creu interessant realitzar-ho per visualitzar fins a quin punt és possible millorar la mesura. Les equacions d'aquest model es mostren a la Taula 11.1.

Taula 11.1: Model 1 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_{x,A} &= a_{SA} \cdot (S_A - S_{A,0}) \\
 F_{x,B} &= a_{SB} \cdot (S_B - S_{B,0}) \\
 F_y &= a_{SD} \cdot (S_D - S_{D,0}) \\
 F_z &= a_{SC} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SA,Fz} \cdot (S_A - S_{A,0})
 \end{aligned}$$

Els diferents coeficients de les equacions anteriors es determinen mitjançant el càlcul de regressió pel mètode dels mínims quadrats exposat a l'Apartat 7.2. S'aplica aquest mètode a l'Equació 11.1, on aquesta correspon al cas de la component longitudinal de força mesurada a partir del senyal del pont A, amb un plantejament equivalent per la resta de casos excepte per a la component de mesura F_z , on per aquest cas hi intervindran els dos senyals dels ponts C i A amb els respectius coeficients.

$$\begin{bmatrix} F_{x,a,1} \\ \vdots \\ F_{x,a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{A,1} - S_{A,0} \\ \vdots \\ S_{A,n} - S_{A,0} \end{bmatrix} \cdot a_{SA} \tag{11.1}$$

Els coeficients obtinguts per a cada enganxall dinamomètric i per a cada equació del model es mostren a la Taula 11.2.

Taula 11.2: Coeficients per al model 1 dels enganxalls dinamomètrics

	$F_{x,A}$	$F_{x,B}$	F_y	F_z	
	a_{SA}	a_{SB}	a_{SD}	a_{SC}	$a_{SA,Fz}$
Eng. din. bola base 12 forats	529627,94	597089,87	-67690,74	-75739,29	-47385,12
Eng. din. bola base 8 forats	226172,64	480593,63	28674,62	48389,41	-37094,24
Eng. din. anella	335859,61	420664,16	29949,12	37192,33	-19150,55

Si s'analitzen els coeficients obtinguts, per al cas del pont A es té que en els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i el d'anella aquests disten considerablement dels valors del model teòric. Aquesta desviació és deguda a que, donada l'elevada sensibilitat creuada, en el càlcul de regressió amb l'ajust únicament amb un senyal per a cada component de mesura no es pot compensar de forma adequada la sensibilitat creuada, i s'obtenen uns coeficients que no tenen un clar significat físic. Al pont A de l'enganxall dinamomètric amb base de 12 forats no apareix una desviació significativa respecte al cas teòric, ja que la sensibilitat creuada en aquest cas és reduïda.

Per al cas del pont B, en tots els casos, els valors dels coeficients entren dins dels valors esperats, amb coeficients lleugerament superiors al del model teòric, per tal de compensar la menor sensibilitat detectada en aquests ponts. En aquests ponts també hi ha sensibilitat creuada amb la força transversal, però com que es dona el cas que s'utilitzen tantes dades de força transversal positiva com negativa, i donada l'elevada linealitat, els coeficients per als ponts B acaben resultant pròxims als valors dels models teòrics.

Per als ponts D de mesura per a la component transversal de força en els tres dinamòmetres, els coeficients obtinguts en tots els casos són superiors als obtinguts en el model teòric per compensar la disminució de sensibilitat detectada en aquests ponts. En la mesura de la component vertical on intervenen la mesura del pont C i A, amb l'excepció del coeficient del pont A en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats, els coeficients són més grans, en valor absolut, que en el model teòric.

Si s'analitzen els estadístics obtinguts per als models ajustats experimentalment a partir del model teòric, exposats a la Taula 11.3, es detecten certs aspectes a comentar.

Taula 11.3: Estadístics per al model 1 dels enganxalls dinamomètrics

		$F_{x,A}$	$F_{x,B}$	F_y	F_z	
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	σ^2	7,856	19,946	2,210	1,935	
	IC_{aj}	1862,007	3350,923	604,693	a_{SC}	$a_{SA,Fz}$
	$max. IC_{Fm}$	5,506	8,774	2,925	254,020	943,009
	R^2	0,9977	0,9941	0,9851	0,9925	
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	σ^2	1742,098	375,638	0,621	1,365	
	IC_{aj}	17025,441	12384,507	136,147	a_{SC}	$a_{SA,Fz}$
	$max. IC_{Fm}$	82,147	38,137	1,550	193,174	782,835
	R^2	0,4829	0,8885	0,9958	0,9946	
Enganxall dinamomètric d'anella	σ^2	563,696	118,214	1,072	1,037	
	IC_{aj}	10955,933	5837,305	184,875	a_{SC}	$a_{SA,Fz}$
	$max. IC_{Fm}$	46,715	21,374	2,038	101,227	498,175
	R^2	0,8326	0,9649	0,9929	0,9960	

Per als casos de les equacions de $F_{x,A}$ i $F_{x,B}$, apareix una variància de l'error (σ^2) molt gran en els dinamòmetres que experimenten sensibilitat creuada en els ponts A i B. En aquests casos, també són molt grans els diferents intervals de confiança analitzats. Aquests valors van en consonància amb els grans errors en l'estimació de la mesura. Per a les mesures F_y i F_z , els valors obtinguts entren dins dels valors esperats i indiquen un bon ajust del model en tots els casos d'assaig.

Si s'analitzen els residuals del model per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, mostrats a la Figura 11.1, en la mesura de la component longitudinal a partir del senyal del pont A, s'obtenen uns residuals inferiors respecte al model teòric. Una millora significativa també es dona en la mesura de la component longitudinal amb el pont B, on s'aconsegueix corregir l'efecte de la disminució de la sensibilitat en el pont. En el pont D, en la mesura de la component transversal, també es corregeix l'efecte de la disminució de sensibilitat. Tant en aquest pont, com en el C, els errors disminueixen considerablement respecte el model teòric.

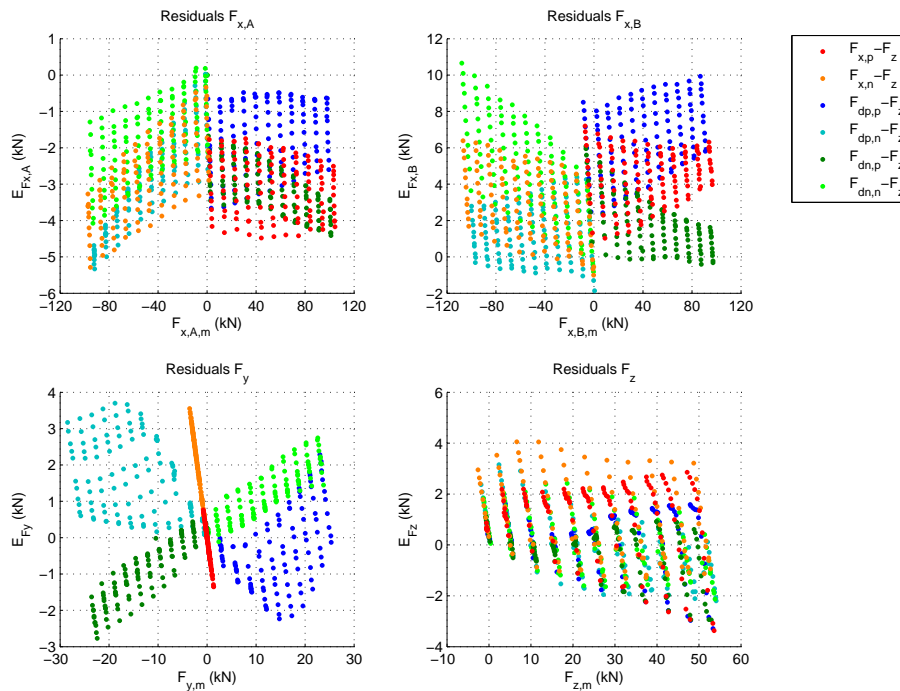


Figura 11.1: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

Per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats (Figura 11.2), per al pont A s'observa que els resultats continuen no sent acceptables donada l'elevada sensibilitat creuada, igual que amb el model teòric, i per tant el coeficient determinat a partir de model d'ajust no s'ajusta adequadament a les dades experimentals. Aquesta distribució dels residuals posa de manifest que són necessàries més variables per a determinar correctament la mesura de la component longitudinal, ja que la desviació provocada per la component vertical de força no es pot compensar únicament amb el senyal del pont A en la determinació de la mesura de $F_{x,A}$.

Per al pont B s'observa una correcció de la sensibilitat del pont però amb els mateixos problemes de sensibilitat creuada que el pont A, en aquest cas principalment provocada per la component transversal de força. En els ponts C i D s'aconsegueix ajustar millor la mesura en els valors en fons d'escala respecte al model teòric, i s'obtenen uns valors de residuals acceptables.

Cal destacar que per a la mesura de F_z , en el cas del model teòric en aquest dinamòmetre es tenia sensibilitat creuada provocada per la component de força F_x . Com que en l'estimació d'aquesta component F_z s'utilitza tant el senyal del pont C com el del pont A, els coeficients per a aquests ponts s'han ajustat per tal de compensar els efectes de la sensibilitat creuada.

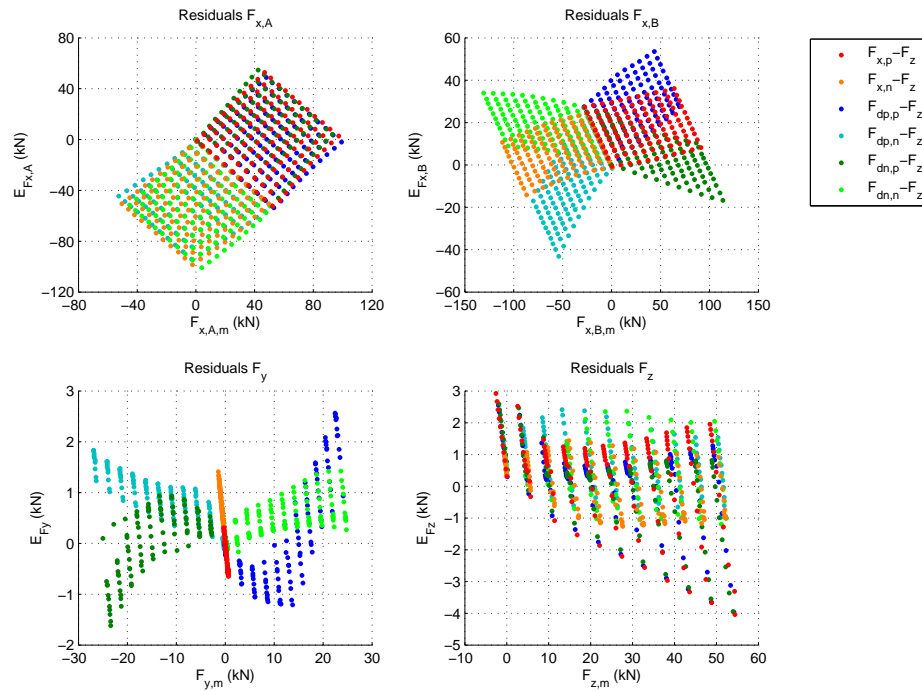


Figura 11.2: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Per últim, en els residuals de l'enganxall dinamomètric d'anella (Figura 11.3) s'observen les mateixes problemàtiques que en la mesura de $F_{x,A}$ i $F_{x,B}$ en el cas del de bola amb base de 8 forats. Per a l'estimació de F_y i F_z els resultats són acceptables, i entren dins dels errors habituals en mesures amb galgues extensomètriques.

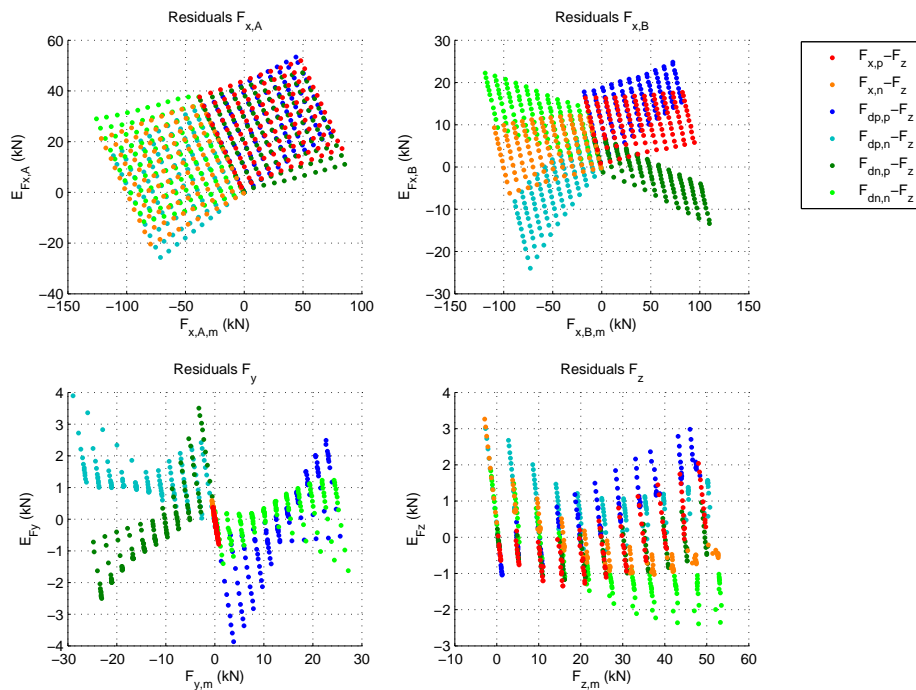


Figura 11.3: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric d'anella

11.2.2. Model 2: Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats

En el model 1, s'utilitza un o dos senyals mesurats en els ponts per al càlcul de cada component de força al punt d'unió de l'enganxall. Ja que s'observen sensibilitats creuades importants en els ponts de mesura, s'opta per plantejar un càlcul de les components de força a partir dels 4 senyals dels ponts de galgues extensomètriques. A la Taula 11.4 es mostren les equacions que en resulten d'aquest plantejament.

Taula 11.4: Model 2 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_x &= a_{SA, Fx} \cdot (S_A - S_{A,0}) + a_{SB, Fx} \cdot (S_B - S_{B,0}) + a_{SC, Fx} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD, Fx} \cdot (S_D - S_{D,0}) \\
 F_y &= a_{SA, Fy} \cdot (S_A - S_{A,0}) + a_{SB, Fy} \cdot (S_B - S_{B,0}) + a_{SC, Fy} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD, Fy} \cdot (S_D - S_{D,0}) \\
 F_z &= a_{SA, Fz} \cdot (S_A - S_{A,0}) + a_{SB, Fz} \cdot (S_B - S_{B,0}) + a_{SC, Fz} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD, Fz} \cdot (S_D - S_{D,0})
 \end{aligned}$$

Per a la determinació dels coeficients en cada equació del model, per al cas de la component longitudinal de força, s'aplica el mètode dels mínims quadrats en l'Equació 11.2, amb un plantejament equivalent en la resta de components.

$$\begin{bmatrix} F_{x,a,1} \\ \vdots \\ F_{x,a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{A,1} - S_{A,0} & S_{B,1} - S_{B,0} & S_{C,1} - S_{C,0} & S_{D,1} - S_{D,0} \\ & & \vdots & \\ S_{A,n} - S_{A,0} & S_{B,n} - S_{B,0} & S_{C,n} - S_{C,0} & S_{D,n} - S_{D,0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{SA, Fx} \\ a_{SB, Fx} \\ a_{SC, Fx} \\ a_{SD, Fx} \end{bmatrix} \quad 11.2$$

A la Taula 11.5 es mostren els coeficients obtinguts per a cada equació de component de força i per a cada enganxall dinamomètric.

Taula 11.5: Coeficients per al model 2 dels enganxalls dinamomètrics

		a_{SA}	a_{SB}	a_{SC}	a_{SD}
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	F_x	282045,07	279550,71	-1339,89	-6498,90
	F_y	35801,71	-51731,05	-36,00	-67720,38
	F_z	161771,49	-232399,27	-69499,48	1868,59
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	F_x	268072,49	258666,90	-37092,88	10688,76
	F_y	-50394,44	45641,81	11361,25	32047,83
	F_z	-125039,19	86015,28	67667,93	6122,52
Enganxall dinamomètric d'anella	F_x	307934,50	89633,14	27509,68	10007,96
	F_y	-44245,41	46172,57	-2507,25	31158,83
	F_z	-13478,36	-6303,35	37519,61	-499,78

Per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, on la sensibilitat creuada és reduïda, els coeficients a_{SC} i a_{SD} per a l'equació de F_x són petits. En canvi, això no és així en els altres dos dinamòmetres, on per aquesta mesura també hi intervenen significativament els senyals S_C i S_D , per tal de compensar els efectes de sensibilitat creuada. També cal destacar que caldria esperar que els coeficients a_{SA} i a_{SB} del nou model fossin més petits, ja que en estimar la força F_x s'utilitzen els dos senyals S_A i S_B . Sí que s'intueix que les sumes dels coeficients a_{SA} i a_{SB} s'aproximen als coeficients corresponents del model teòric, tot i que amb certes desviacions provocades per la intervenció dels altres dos senyals utilitzats en l'estimació d'aquesta component de força.

En els tres enganxalls dinamomètrics, els coeficients de les equacions de F_y corresponents a S_A i S_B tenen valors molt grans, més fins i tot que el del pont D (que és el que correspon a la mesura directa de la component de la força). A més, els coeficients a_{SA} i a_{SB} són de signe contrari en cada equació. En casos on es tenen dos variables fortament dependents, com és el cas del senyal S_A i S_B , s'acostumen a obtenir aquests coeficients tan grans i de signe contrari i que s'acaben cancel·lant en el càlcul de la variable estimada. Aquest fenomen s'anomena multicol·linealitat i és un aspecte a evitar quan es realitzen models d'ajust per regressió [96]. En l'equació obtinguda, aquests coeficients tan grans poden provocar inestabilitat i errors importants en l'estimació de la força F_y . També s'aprecia multicol·linealitat entre els senyals S_A i S_B en l'estimació de F_z en els dos enganxalls dinamomètrics de bola, on els coeficients per als ponts A i B són més grans que el coeficient del pont C.

Aquesta problemàtica implica que els coeficients determinats experimentalment no tenen sentit físic i per tant no es poden treure conclusions sobre el nivell de sensibilitat directa i creuada. Tot i que per a les mesures utilitzades per a la determinació del model els resultats d'error són acceptables, el model pot desviar-se considerablement en noves mesures.

En els estadístics obtinguts per aquest model (Taula 11.6) s'observa que els valors elevats en la variància i els diferents intervals de confiança que s'obtenien per a la component longitudinal de força en el model 1 han desaparegut.

Taula 11.6: Estadístics per al model 2 dels enganxalls dinamomètrics

		F_x	F_y	F_z	
		σ^2	0,121	0,727	1,113
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	IC_{aj}	a_{SA}	5904,575	14486,825	17919,216
		a_{SB}	6551,849	16074,907	19883,565
	a_{SC}	187,539	460,126	569,144	
	a_{SD}	160,755	394,411	487,859	
	$max. IC_{Fm}$	0,690	1,693	2,095	
	R^2	1,0000	0,9951	0,9957	
		σ^2	1,108	0,295	1,077
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	IC_{aj}	a_{SA}	12504,831	6453,061	12328,513
		a_{SB}	12208,448	6300,114	12036,309
	a_{SC}	2742,380	1415,193	2703,712	
	a_{SD}	894,820	461,768	882,203	
	$max. IC_{Fm}$	2,084	1,076	2,055	
	R^2	0,9997	0,9980	0,9958	
		σ^2	0,808	0,878	1,021
Enganxall dinamomètric d'anella	IC_{aj}	a_{SA}	11493,528	11983,155	12918,644
		a_{SB}	12701,369	13242,450	14276,248
	a_{SC}	671,800	700,419	755,099	
	a_{SD}	376,049	392,069	422,677	
	$max. IC_{Fm}$	1,782	1,858	2,003	
R^2	0,9998	0,9942	0,9960		

Per als residuals obtinguts en el model 2 per l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats (Figura 11.4), si es comparen amb els residuals del model 1, s'observen millores significatives en l'estimació dels valors de les components de força. En els residuals en la mesura de F_x , per a l'assaig $F_{dp,p}$ es té una desviació important a càrrega

nul·la, donades les desviacions del senyal a càrrega nul·la tant en el pont A com en el B en realitzar els assajos de precàrrega. Tot i això, aquest no es considera significatiu perquè no arriba a l'1,5%. Per al casos de la mesura de F_y i F_z la millora respecte al model 1 no és significativa.

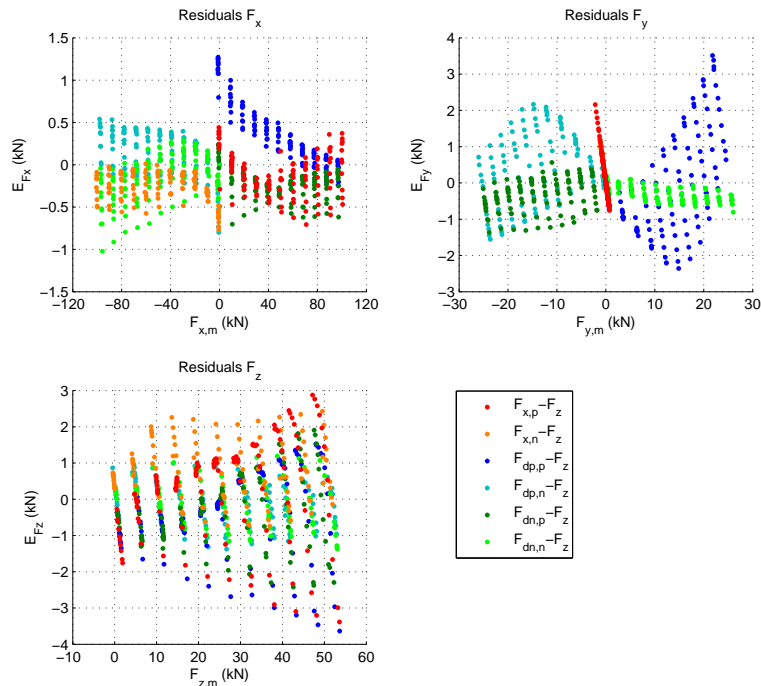


Figura 11.4: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

Per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats (Figura 11.5), per a l'estimació de la component F_x , s'observa que s'aconsegueix eliminar gairebé del tot la sensibilitat creuada, amb errors del $\pm 3\%$ en fons d'escala. Per al cas de les components F_y i F_z no s'observen millores significatives respecte al model 1.

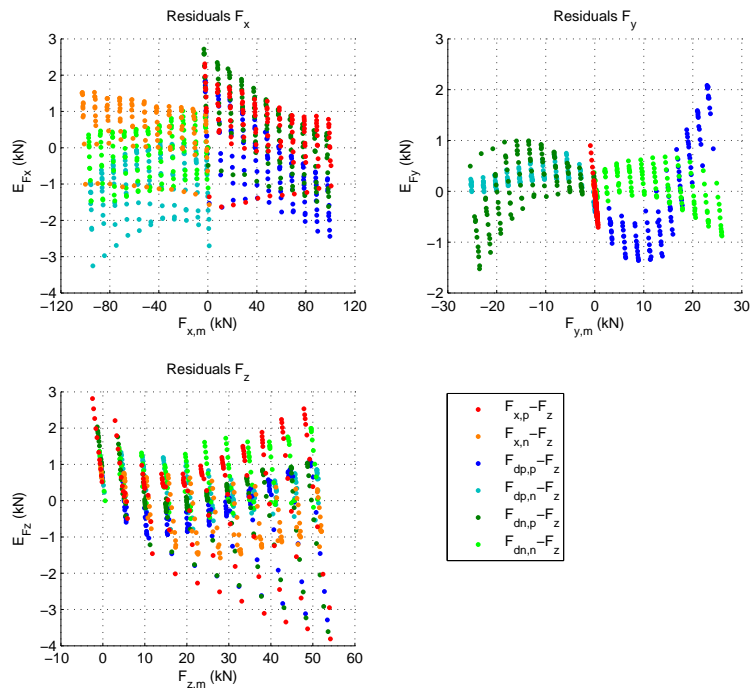


Figura 11.5: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Amb els resultats dels residuals obtinguts per al cas de l'enganxall dinamomètric d'anella (Figura 11.6) s'arriben a les mateixes conclusions que amb el de bola amb base de 8 forats. En l'estimació de la component longitudinal de força s'aconsegueix compensar la sensibilitat creuada. Per als casos de les components transversal i vertical la millora és reduïda respecte al model 1.

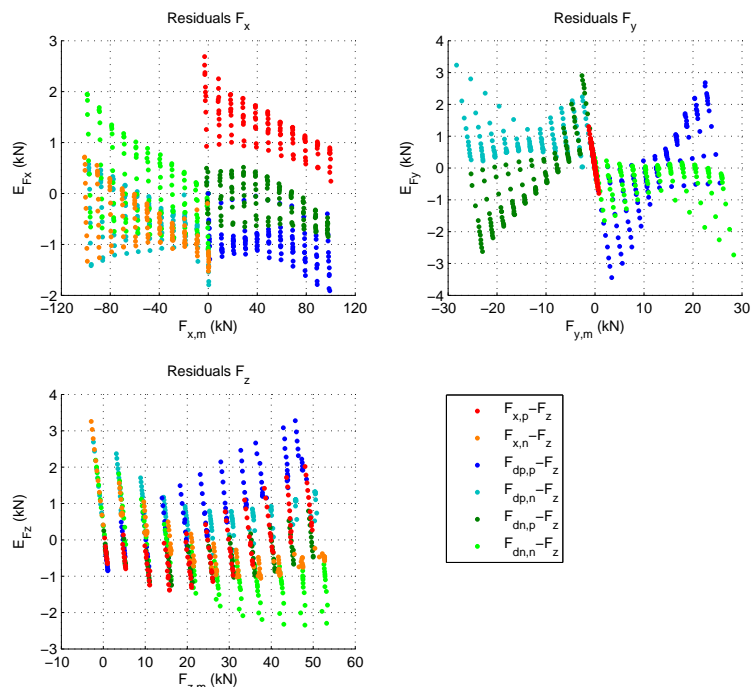


Figura 11.6: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric d'anella

11.2.3. Model 3: Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats amb combinació dels ponts de mesura d'esforç axial

Donats els problemes de multicol·linealitat que apareixen amb els senyals dels ponts A i B en el model 2, es proposa un model on s'utilitza la suma dels dos senyals S_A i S_B en comptes de tractar-los per separat. Amb aquest ajust s'elimina en el model de regressió la redundància de dos mesures fortament dependents. A la Taula 11.7 es mostren les equacions per a aquest model.

Taula 11.7: Model 3 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)

$$\begin{aligned}
 F_x &= a_{SAB,Fx} \cdot (S_A - S_{A,0} + S_B - S_{B,0}) + a_{SC,Fx} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD,Fx} \cdot (S_D - S_{D,0}) \\
 F_y &= a_{SAB,Fy} \cdot (S_A - S_{A,0} + S_B - S_{B,0}) + a_{SC,Fy} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD,Fy} \cdot (S_D - S_{D,0}) \\
 F_z &= a_{SAB,Fz} \cdot (S_A - S_{A,0} + S_B - S_{B,0}) + a_{SC,Fz} \cdot (S_C - S_{C,0}) + a_{SD,Fz} \cdot (S_D - S_{D,0})
 \end{aligned}$$

Si s'aplica a l'Equació 11.3 el mètode dels mínims quadrats, es determinen els coeficients per al cas de la component longitudinal de força. Mitjançant un plantejament equivalent per a cada una de les equacions del model de cada enganxall dinamomètric, s'obtenen els coeficients d'aquestes, que es mostren a la Taula 11.8.

$$\begin{bmatrix} F_{x,a,1} \\ \vdots \\ F_{x,a,n} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{1,A} - S_{A,0} + S_{1,B} - S_{B,0} & S_{1,C} - S_{C,0} & S_{1,D} - S_{D,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n,A} - S_{A,0} + S_{n,B} - S_{B,0} & S_{n,C} - S_{C,0} & S_{n,D} - S_{D,0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{SAB,Fx} \\ a_{SC,Fx} \\ a_{SD,Fx} \end{bmatrix} \quad 11.3$$

Taula 11.8: Coeficients per al model 3 dels enganxalls dinamomètrics

		a_{SAB}	a_{SC}	a_{SD}
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	F_x	280862,72	-1375,28	-6514,05
	F_y	-5689,52	-1277,63	-68251,77
	F_z	-25068,63	-75090,70	-524,33
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	F_x	263313,25	-36049,77	11022,33
	F_y	-1799,98	710,57	28641,88
	F_z	-18245,36	44261,42	-1362,56
Enganxall dinamomètric d'anella	F_x	204234,75	21497,17	13075,45
	F_y	-1294,14	-16,93	29888,31
	F_z	-10070,01	37717,22	-600,60

A diferència del model anterior, en aquest cas els coeficients obtinguts sí tenen un significat físic evident. Així, per a la mesura de F_x , els coeficients per a S_A+S_B , són més grans que la resta de coeficients en aquestes equacions. El mateix passa per a la component mesurada F_y , on el coeficient del pont D té un valor molt més gran que la resta de coeficients. En el cas de la component mesurada F_z el coeficient de S_C té un valor important, també S_A+S_B per tal de compensar el moment flector de la component longitudinal de força i el terme de S_D és negligible. Cal destacar que els termes obtinguts a_{SC} per a F_z i a_{SD} per F_y són pràcticament iguals als del model 1 d'ajust experimental, i que el coeficient a_{SAB} correspon a un valor pròxim a la meitat dels coeficients per al pont A i B del model teòric, ja que en aquest cas s'utilitza la suma dels senyals.

Taula 11.9: Estadístics per al model 3 dels enganxalls dinamomètrics

		F_x	F_y	F_z	
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	σ^2	0,121	0,758	1,753	
	IC_{aj}	a_{SAB}	124,329	311,587	473,914
		a_{SC}	62,920	157,686	239,835
		a_{SD}	141,783	355,330	540,445
	$max. IC_{Fm}$	0,686	1,718	2,613	
	R^2	1,0000	0,9949	0,9932	
Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	σ^2	1,107	0,383	1,504	
	IC_{aj}	a_{SAB}	349,759	205,835	407,704
		a_{SC}	121,848	71,708	142,035
		a_{SD}	181,975	107,093	212,123
	$max. IC_{Fm}$	2,076	1,222	2,420	
	R^2	0,9997	0,9974	0,9941	
Enganxall dinamomètric d'anella	σ^2	1,156	0,937	1,020	
	IC_{aj}	a_{SAB}	276,270	248,724	259,477
		a_{SC}	102,980	92,712	96,720
		a_{SD}	192,388	173,206	180,694
	$max. IC_{Fm}$	2,122	1,910	1,993	
	R^2	0,9997	0,9938	0,9960	

En els estadístics mostrats a la Taula 11.9 es comprova, igual que en el model 2 d'ajust experimental, que ja no apareixen els problemes en la variància de l'error obtinguts en el model 1 d'ajust experimental, i tampoc en els diferents intervals de confiança tan dels coeficients com dels valors estimats.

A la Figura 11.7 es mostren els valors dels residuals per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats. Si es comparen amb els del model 2, per a la component longitudinal i transversal s'obtenen valors molt similars. En canvi, per al cas de la component vertical fins i tot s'obtenen residuals lleugerament més grans que en el model anterior, però sense ser aquests significatius.

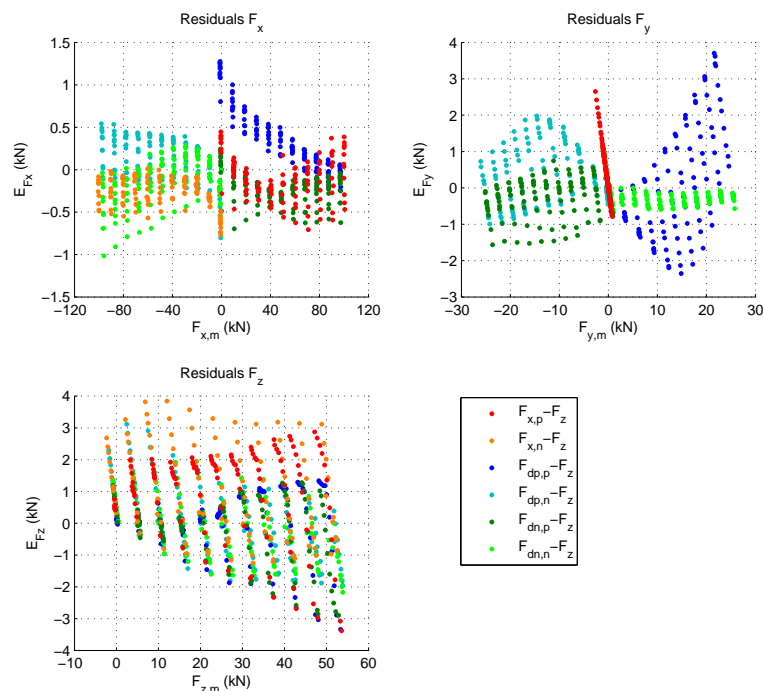


Figura 11.7: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

En els residuals per a l'enganxall de bola amb base de 8 forats (Figura 11.8) es pot observar que hi ha un lleu empitjorament de la mesura en F_y , mentre que en la resta de components mesurades els residuals són pràcticament iguals que en el model anterior.

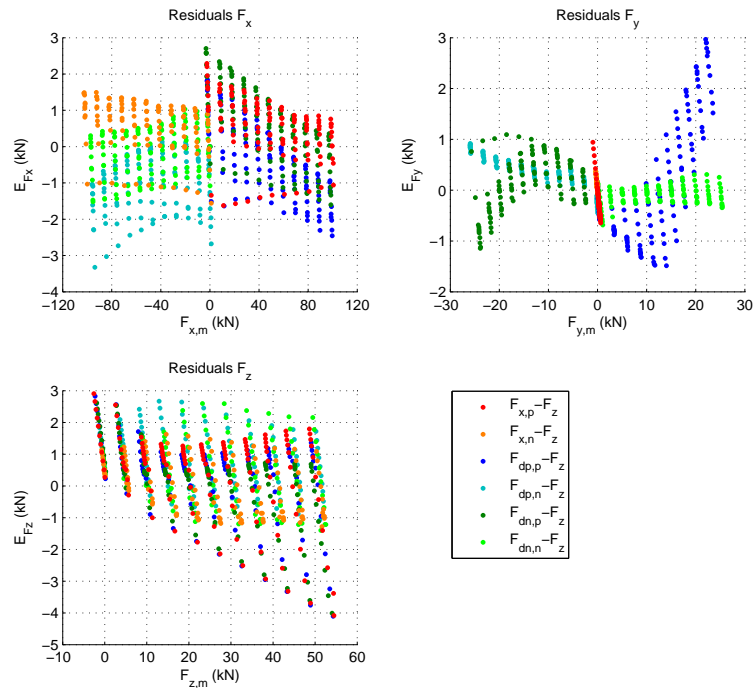


Figura 11.8: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Per últim, per al cas de l'enganxall dinamomètric d'anella (Figura 11.9), no s'observen canvis significatius respecte al model 2 en cap de les components de mesura.

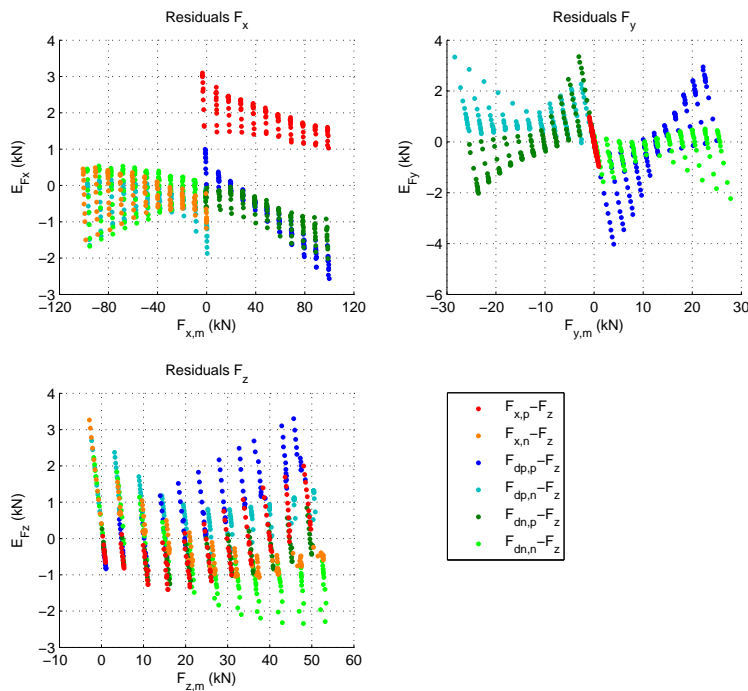


Figura 11.9: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric d'anella

11.3. Conclusions dels models d'ajust experimental analitzats per als enganxalls dinamomètrics

En base a tots els models desenvolupats per als enganxalls dinamomètrics, per a utilitzar-los en els assajos en camp, tant el model teòric com el model d'ajust experimental basat en el model teòric (model 1) no són adequats per a l'estimació de les components de força, ja que no compensen l'elevada sensibilitat creuada que apareix en els ponts de mesura.

En la determinació dels models d'ajust experimental s'ha analitzat un ampli ventall de combinacions de força, suficient per incloure gairebé la totalitat dels casos de força possibles en els enganxalls. En els assajos en camp, el cas d'aplicació de força únicament transversal no és factible que es doni sense component longitudinal, donades les posicions extremes en els moviments permesos per l'enganxall, i només tindria sentit analitzar-ho per estudiar el comportament del pont D. En els assajos experimentals, només hagués fet falta realitzar més casos amb el cilindre gran inclinat per ampliar el ventall de casos, fins a arribar a valors d'angle de 60° (corresponent a l'angle màxim que permeten aquests enganxalls) i garantir que no es sobrepassin en aquests els 25 kN de component transversal.

Atès que s'ha analitzat un ampli ventall de combinacions de forces, es pot garantir que els models d'ajust experimental que utilitzen tots els senyals mesurats (models 2 i 3) es comportaran correctament dins dels marges analitzats. Ara bé, si en una situació concreta es desviés d'aquests casos, el model 3, que utilitza la combinació dels senyals dels ponts de mesura d'esforç axial, al disposar d'uns coeficients coherents i amb significat físic evident, es conclou que aquest es comportarà millor que no pas l'altre. Donada aquesta justificació, per als tres enganxalls dinamomètrics s'utilitzaran els models d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats amb combinació dels ponts de mesura d'esforç axial per als assajos en camp.