

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.

8. DESENVOLUPAMENT DELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS PER A ORMEJOS REMOLCATS

Tal i com s'ha exposat anteriorment, un dels objectius d'aquesta tesi consisteix en el desenvolupament d'un conjunt d'enganxalls dinamomètrics per a la mesura d'esforços en ormejos remolcats. En aquest apartat s'exposen els requeriments i les consideracions en el desenvolupament d'aquests dinamòmetres, a continuació el procediment seguit en el disseny conceptual, per finalment descriure el disseny definitiu d'aquests i les seves característiques principals.

8.1. Consideracions i requeriments en els enganxalls dinamomètrics

En aquest apartat es presenten les consideracions i els requeriments que s'han tingut en compte a l'hora de desenvolupar aquests dinamòmetres per a ormejos remolcats, on s'exposa el tipus de dinamòmetre a desenvolupar, les components de força i els valors màxims d'aquestes a mesurar.

8.1.1. Concepte de dinamòmetre

En la revisió de l'estat de l'art dels dinamòmetres per a ormejos remolcats (Apartat 2.3), en els equips que mesuren múltiples components de força en el punt d'unió de l'enganxall, molts autors proposen dissenys complexos, com és el cas de l'ús de EOR i DEOR en aquests dinamòmetres. Aquests tenen l'inconvenient que, donada la seva geometria, l'obtenció mitjançant fórmules teòriques que relacionen els senyals amb les components de força aplicades al dispositiu poden arribar a ser complexes.

Amb l'objectiu de simplificar el disseny i el desenvolupament teòric, es proposa una alternativa completament diferent a les analitzades en l'estat de l'art, basada en la utilització d'enganxalls comercials i estandarditzats que, amb les mínimes modificacions possibles, permeti la mesura indirecta de les càrregues en la llança de l'enganxall mitjançant extensometria, i així determinar les components de força al punt d'unió de l'enganxall. A més, al mantenir la geometria original es busca que les mesures obtingudes siguin equivalents a les d'un enganxall estàndard sense modificar.

8.1.2. Selecció dels enganxalls comercials per al desenvolupament dels dinamòmetres

Els enganxalls seleccionats per a construir aquests dinamòmetres són enganxalls del tipus anella i del tipus bola, ja que aquests tipus d'enganxalls estan normalitzats, i donades les expectatives del mercat, cada cop més aquest tipus d'enganxalls seran més utilitzats en detriment d'altres tipologies. Un altre aspecte important és que aquests enganxalls dinamomètrics siguin intercanviables, per tal de facilitar la seva instal·lació en múltiples ormejos. Per complir amb aquest requeriment s'utilitzen enganxalls amb base de fixació mitjançant cargols.

Donats aquests condicionants, finalment s'han elegit tres tipus d'enganxalls de la marca Scharmüller®. Aquests es mostren a la Figura 8.1 i són:

- Enganxall de bola de 80 mm amb una longitud de 250 mm i amb una base de fixació amb 12 forats per a cargols M20, amb 3 forats per a cargols a cada vèrtex de la base de fixació i una cota de 160 mm entre forats dels vèrtexs.
- Enganxall de bola de 80 mm amb una longitud de 250 mm i amb una base de fixació amb 8 forats per a cargols M20, amb 4 forats als vèrtexs i 4 als punts mitjos de les arestes i una cota de 145 mm entre forats dels vèrtexs.
- Enganxall d'anella de 50 mm amb una longitud de 250 mm i amb una base de fixació amb 8 forats per a cargols M20, amb 4 forats als vèrtexs i 4 als punts mitjos de les arestes i una cota de 145 mm entre forats dels vèrtexs.

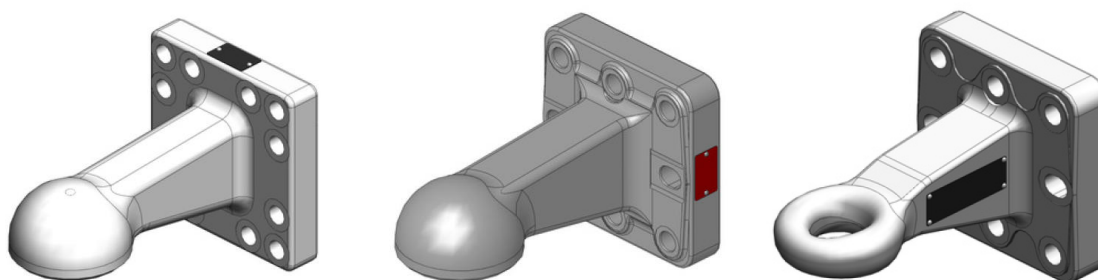


Figura 8.1: Imatges dels enganxalls utilitzats en el desenvolupament. D'esquerra a dreta: enganxall de bola amb base de 12 forats, enganxall de bola amb base de 8 forats i enganxall d'anella

Referent a la normativa, els enganxalls de bola segueixen les especificacions dimensionals de la norma UNE-ISO 24347 [97] i l'enganxall d'anella les de la norma UNE-ISO 20019 [98].

8.1.3. Components de força i valors màxims a mesurar

Per a determinar les components de força a mesurar, en els enganxalls de bola, atès que la unió en el punt d'enganxall és un parell esfèric, es considera que en aquest punt apareixen tres components de força i cap component de moment. D'aquesta manera, les components de força al punt d'unió d'interès són la longitudinal, la transversal i la vertical. Per al cas de l'enganxall d'anella també es contempla una situació de càrregues equivalent, ja que la boca de l'anella permet la rotació en les tres direccions. En determinades situacions, com seria el cas de les posicions extremes del moviment i en situacions pròximes a la bolcada, podrien aparèixer moments en la unió de l'enganxall. Ja que aquestes situacions no corresponen a condicions normals de funcionament, la mesura d'aquestes components no es contempla en el desenvolupament d'aquests enganxalls dinamomètrics.

Per determinar els valors en fons d'escala a mesurar per aquests dinamòmetres, en les fitxes tècniques dels enganxalls utilitzats s'especifica que la força de tir dinàmica màxima és de 100 kN i la càrrega vertical estàtica (la força que es pot recolzar a l'enganxall) és de 40 kN. Per a l'elecció del valor en fons d'escala per a cada component de mesura es presenta el següent raonament. Per a la component longitudinal de força es pren el valor de 100 kN especificat en les característiques tècniques dels enganxalls. Si es prenen de referència els càlculs per al dinamòmetre

tripuntal (Apartat 3.1.3), un tractor de 185 kW i 12000 kg pot realitzar una força longitudinal màxima de 80 kN. Es considera doncs un factor de 1,25 per a tenir en consideració els efectes dinàmics. Per al cas de la component vertical de força, on la càrrega estàtica màxima prevista és de 40 kN, es pren de valor en fons d'escala 50 kN, aplicant el mateix marge de seguretat que en el cas de la component longitudinal, per tal de tenir en compte els efectes dinàmics. La component transversal de força màxima admesa per al disseny és de 25 kN, i s'obté aquest valor després de relacionar els moments d'inèrcia en les dos direccions en una secció de la llança de l'enganxall, per tal de garantir la mateixa resistència a flexió que per al cas de la component vertical de força, ja que aquest valor no s'especifica en la informació tècnica dels enganxalls.

8.2. Metodologia conceptual del procés de mesura

En aquest apartat es presenta a nivell conceptual el procés de mesura amb els enganxalls dinamomètrics, mitjançant l'anàlisi de les etapes necessàries en la determinació de les components de força a partir de les mesures amb galgues extensomètriques en la llança de l'enganxall.

8.2.1. Procediment per a la mesura de les components de força mitjançant les deformacions en l'enganxall

Secció d'estudi per a la mesura de les components de força

Per a la mesura de les components de força al punt d'unió es pretén analitzar els esforços en el prisma mecànic de la llança de l'enganxall mitjançant extensometria. Per a aquest cas es pren una secció a la llança de l'enganxall situada a 150 mm del punt d'unió (dimensió l a la Figura 8.2), per tal d'analitzar-ne les tensions normals que apareixen en aquesta. Aquesta secció correspon a un tram de la secció regular sense canvis considerables que puguin afectar a la correcta distribució de tensions.

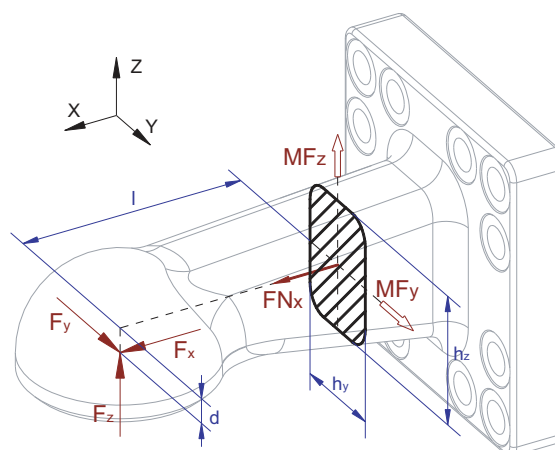


Figura 8.2: Forces en el punt d'unió de l'enganxall, components d'esforç a mesurar en la secció d'estudi i dimensions que intervenen en el càlcul

Les components de força longitudinal F_x , transversal F_y i vertical F_z provoquen un conjunt d'esforços en la secció d'estudi, corresponents a un esforç axial, un esforç

tallant, un moment flector i un moment torsor. De totes aquestes, a la Figura 8.2 es mostra la component de l'esforç axial i les dos components del moment flector en la secció, ja que són les que provoquen tensions normals en la secció i són les que es determinaran amb les galgues extensomètriques. L'esforç tallant no es té en consideració ja que les galgues extensomètriques disposades per a la mesura en la direcció longitudinal no es veuran afectades per aquest, i tampoc pel moment torsor.

Les components d'esforç en la secció estan directament relacionades amb les components de força al punt d'unió. Per al cas de la component longitudinal F_x , aquesta correspon a l'esforç axial en la secció FN_x (Equació 8.1).

$$F_x = FN_x \quad 8.1$$

La component transversal F_y ve determinada per la component del moment flector MF_z (Equació 8.2).

$$F_y = \frac{MF_z}{l} \quad 8.2$$

Per últim, la component vertical F_z , ve en aquest cas determinada per la component del moment flector MF_y però cal també compensar el moment flector que provoca la component de força F_x (Equació 8.3).

$$F_z = -\frac{MF_y}{l} - \frac{F_x \cdot d}{l} \quad 8.3$$

Tensions normals en la secció d'estudi

L'estat de tensions normals en la secció d'estudi correspon a una superposició de les tensions provocades per l'esforç axial i les dues components del moment flector (Figura 8.3). En aquest estudi es considera que el material és homogeni i l'efecte de la inclinació de les cares superior i inferior de la llança de l'enganxall és negligible.

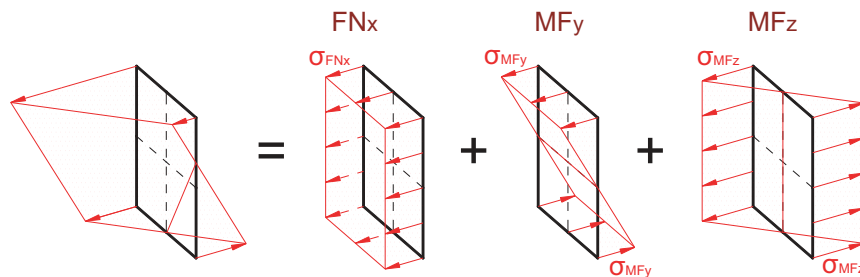


Figura 8.3: Descomposició de l'estat de tensions en els casos d'esforç axial i dos moments flexors

Les tensions normals provocades per l'esforç axial són uniformes en tota la secció, on aquests es relacionen a partir de l'àrea de la secció d'estudi (Equació 8.4).

$$FN_x = \sigma_{FNx} \cdot A \quad 8.4$$

Per al cas de la component del moment flector MF_y , les tensions en l'aresta superior i inferior de la secció, al ser aquesta simètrica respecte l'eix y que passa pel centre d'inèrcia de la secció, són iguals, de sentit contrari i de valor σ_{MF_y} (Equació 8.5).

$$MF_y = \sigma_{MF_y} \cdot \frac{I_y \cdot 2}{h_z} \quad 8.5$$

De forma equivalent, i al ser la secció també simètrica respecte l'eix z que passa pel centre d'inèrcia de la secció, el valor de la component del moment flector MF_z es pot expressar en funció de les tensions σ_{MF_z} a dreta i esquerra de la secció d'estudi segons l'Equació 8.6.

$$MF_z = \sigma_{MF_z} \cdot \frac{I_z \cdot 2}{h_y} \quad 8.6$$

Punts d'estudi i operacions per a la mesura de les tensions en la secció d'estudi

Si s'analitza el diagrama d'esforços en la secció (Figura 8.3), s'observa que en els punts mitjos de les arestes només hi apareix tensió per una component del moment flector però mai per l'altra. Així, per als punts mitjos de les arestes superior i inferior no hi apareixen tensions provocades per la component MF_z . De forma equivalent, per als punts centrals de les arestes dreta i esquerra de la secció d'estudi no apareixen tensions provocades per la component MF_y . Aquests punts, mostrats com a P_1 , P_2 , P_3 i P_4 a la Figura 8.4 són els punts de referència per a l'estudi de l'estat de tensions en la secció.

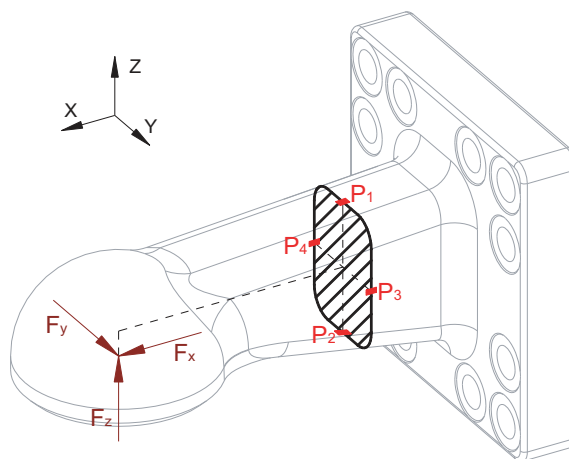


Figura 8.4: Punts d'estudi per a la mesura de la deformació sobre la secció dels enganxalls

Els punts P_1 i P_2 no es veuen afectats per la component MF_z i per tant les mesures en aquests punts corresponen a la combinació de les tensions normals provocades per FN_x i MF_y (Figura 8.5).

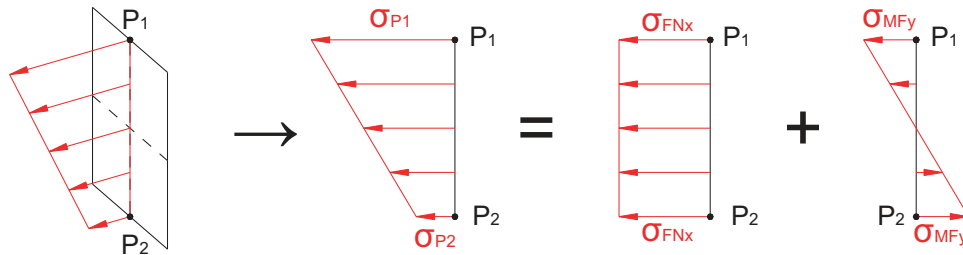


Figura 8.5: Estat tensional en la línia vertical central de la secció (Punts P_1 i P_2)

Amb els valors de tensió a P_1 i P_2 (σ_{P1} i σ_{P2}), al realitzar la suma i dividir per dos s'anul·la la tensió deguda la component MF_y i s'obté el valor de tensió corresponent a l'esforç axial (σ_{FNx}). Al realitzar la diferència de les tensions i dividir per dos s'elimina la component corresponent a l'esforç axial FN_x , i s'obté el valor de tensió provocada per la component del moment flector en y (σ_{MFy}). Les equacions que relacionen les tensions dels punts amb les de les components d'esforç a la secció es mostren a la Taula 8.1.

Taula 8.1: Equacions per a la relació de les tensions en els punts de mesura P_1 i P_2 i les tensions de cada component d'esforç en la secció d'estudi

$\sigma_{P1} = \sigma_{FNx} + \sigma_{MFy}$	$\sigma_{FNx} = \frac{\sigma_{P1} + \sigma_{P2}}{2}$
$\sigma_{P2} = \sigma_{FNx} - \sigma_{MFy}$	$\sigma_{MFy} = \frac{\sigma_{P1} - \sigma_{P2}}{2}$

De forma equivalent, els punts P_3 i P_4 no es veuen afectats per la component MF_y , i les tensions en aquests punts són la combinació dels efectes de FN_x i MF_z .

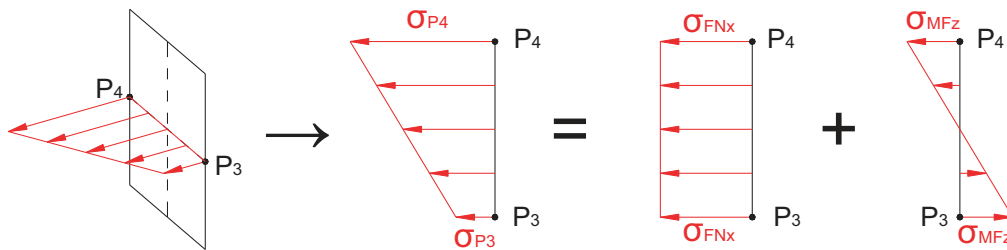


Figura 8.6: Estat tensional en la línia horitzontal central de la secció (Punts P_3 i P_4)

D'aquesta manera, els valors de tensió a P_3 i P_4 (σ_{P3} i σ_{P4}), al realitzar la suma i dividir per dos s'anul·la la tensió deguda a la component del moment flector MF_z i s'obté la tensió corresponent a l'esforç axial (σ_{FNx}). Amb la diferència de les tensions i dividint per dos s'anul·la la component corresponent a l'esforç axial FN_x i s'obté la tensió provocada per la component del moment flector en z (σ_{MFz}). Les equacions de la Taula 8.2 mostren les relacions entre les tensions en els punts i les components de tensió de cada esforç a mesurar en la secció.

Taula 8.2: Equacions per a la relació de les tensions en els punts de mesura P_3 i P_4 i les tensions de cada component d'esforç en la secció d'estudi

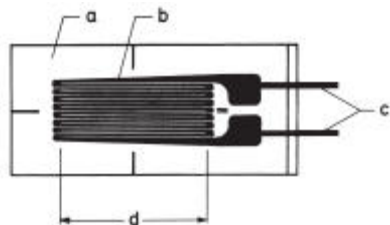
$\sigma_{P_3} = \sigma_{FNx} - \sigma_{MFz}$	$\sigma_{FNx} = \frac{\sigma_{P_3} + \sigma_{P_4}}{2}$
$\sigma_{P_4} = \sigma_{FNx} + \sigma_{MFz}$	$\sigma_{MFz} = \frac{-\sigma_{P_3} + \sigma_{P_4}}{2}$

8.2.2. Configuracions amb galgues extensomètriques per a la mesura de les components d'esforç

Un cop analitzades les operacions per obtenir els valors de tensió corresponents a cada esforç en la secció d'estudi, el següent pas consisteix en obtenir aquests mitjançant les mesures de deformació amb galgues extensomètriques. En aquest plantejament s'analitza la relació de tensions i deformacions en cada punt d'estudi només en la direcció longitudinal, ja que es considera suficient per determinar l'estat de càrregues en la secció. Amb aquest plantejament, la tensió i la deformació en la direcció longitudinal són directament proporcionals al mòdul d'elasticitat del material. En aquest cas es considera també que en els punts d'estudi apareixen deformacions en la direcció transversal, de signe contrari a les longitudinals i relacionades pel coeficient de Poisson.

Galgues extensomètriques

Per a les mesures de les deformacions en la llança de l'enganxall s'utilitzen galgues extensomètriques resistives. Les galgues extensomètriques són sensors basats en l'efecte piezorresistiu, i per tant, són sensors que varien la seva resistència en funció de la deformació [99].

**Figura 8.7: Esquema de les parts d'una galga extensomètrica [99]**

A la Figura 8.7 es mostren les parts d'una galga extensomètrica. Un galga consisteix en un material de suport (a) habitualment de poliamida i que cobreix la graella de mesura (b). Aquesta graella és la resistència elèctrica i té aquesta forma per tal de tenir una elevada longitud per a que sigui sensible a la deformació. La longitud efectiva de la graella (d) correspon també a la direcció de mesura de la deformació unitària. Els punts de connexió (c) permeten connectar la galga a l'equip d'adquisició o al circuit elèctric corresponent per a la mesura.

El paràmetre característic que defineix la sensibilitat d'una galga extensomètrica és el factor k . Aquest factor és la relació entre la variació unitària de la resistència i la deformació unitària de la galga (Equació 8.7).

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

8.7

Ponts de mesura

Per a la mesura de les deformacions mitjançant galgues extensomètriques s'utilitza la configuració en pont. El pont de mesura o pont de Wheatstone amb galgues extensomètriques és el circuit elèctric que fa possible la mesura acurada del canvi de la resistència elèctrica en les galgues extensomètriques. Aquest circuit permet a més, segons la configuració de mesura, augmentar la sensibilitat de la mesura mitjançant la disposició de diferents galgues en les branques del pont adequades. També es pot aconseguir cancel·lar efectes indesitjats com la deformació provocada per efectes tèrmics o components de càrrega en direccions diferents a la d'estudi.

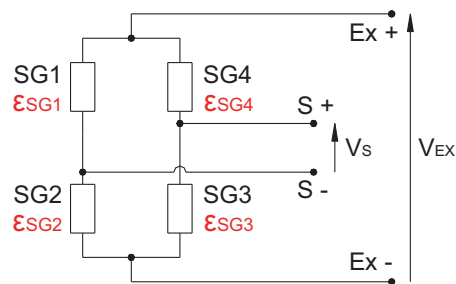


Figura 8.8: Esquema del pont de mesura amb galgues extensomètriques

A la Figura 8.8 es mostra l'esquema bàsic del pont de mesura amb galgues extensomètriques. Consisteix en un circuit format per 4 galgues extensomètriques (de SG1 a SG4), distribuïdes en dos braços en paral·lel amb dos galgues a cada una. En dos dels punts de connexió oposats del pont ($Ex+$ i $Ex-$) s'hi aplica la tensió d'excitació mitjançant una font estabilitzada (V_{EX}) i als altres dos punts ($S+$ i $S-$) es mesura la tensió de sortida del pont (V_S). El senyal de sortida S s'expressa a partir de la relació de la tensió de sortida respecte la tensió d'excitació. En el cas de que les resistències del pont siguin iguals (o almenys les resistències d'una branca) el pont està equilibrat i el senyal de sortida és nul. Si hi ha un desequilibri entre les resistències s'obindrà un senyal a la sortida del pont. En el cas de que el pont estigui format per 4 galgues extensomètriques, la relació entre el senyal del pont i la deformació es mostra a l'Equació 8.8.

$$S = \frac{V_S}{V_{EX}} = \frac{k}{4} (\varepsilon_{SG1} - \varepsilon_{SG2} + \varepsilon_{SG3} - \varepsilon_{SG4}) \quad 8.8$$

En l'equació anterior s'observa que la deformació ε en una de les galgues contribueix amb un senyal de sortida positiu o negatiu en funció de la situació d'aquesta en el pont. Així, una deformació positiva (a tracció) en les galgues SG1 o SG3 provoca un senyal de sortida positiu, mentre que una deformació positiva en les galgues SG2 i SG4 provoca un senyal negatiu.

En molts casos no s'utilitzen 4 galgues actives, sinó que se n'utilitzen una o dues. La resta del pont es completa amb resistències de precisió o bé amb galgues extensomètriques inactives (galgues que no estan sotmeses a deformacions degudes a esforços mecànics). Depenent del número utilitzat de galgues actives, es tenen diferents configuracions. En el cas d'una galga la configuració és en quart de pont, en el cas de

dos galgues en la mateixa branca es té una configuració de mig pont, amb dos galgues en diferent branca es té una configuració en doble-quart pont o bé de pont diagonal i si s'utilitzen 4 galgues actives la configuració s'anomena de pont complet.

En el cas d'estudi d'aquesta tesi, en la secció on s'analitzen les tensions i les deformacions, es té el cas on hi ha dues components de moment flector i l'esforç axial combinats. Per a la mesura per separat de l'esforç axial i d'una de les components del moment flector s'han de realitzar dos ponts diferents, mitjançant una configuració que mesuri l'esforç axial i compensi la component del moment flector i a la inversa [99]. A continuació s'exposen les alternatives per mesurar les components del moment flector i l'esforç axial.

8.2.2.1. Mesura del moment flector amb ponts de mesura

Una biga sotmesa a un moment flector rep una deformació positiva en una cara (a tracció) i una deformació negativa (a compressió) en l'oposada (Figura 8.9). Si la secció és simètrica i el material és homogeni aquestes deformacions són iguals i de signe contrari, i a més, la direcció principal de tensions és en la direcció longitudinal i proporcional al moment flector. Tenint en compte aquestes consideracions, es poden realitzar diferents connexions en pont mitjançant galgues extensomètriques per a la mesura del moment flector i la compensació de l'efecte de l'esforç axial, mostrades a la Figura 8.9, la Figura 8.10 i la Figura 8.11.

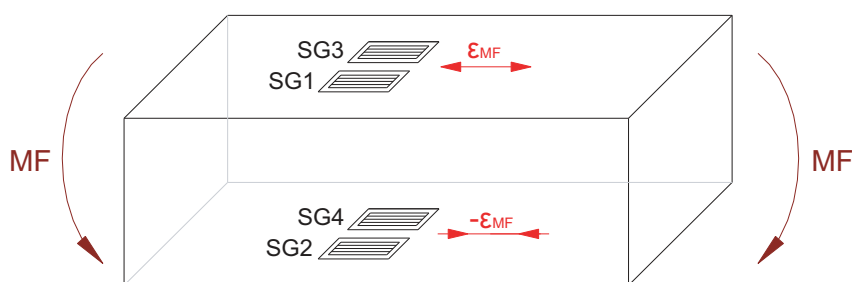


Figura 8.9: Esquema de la disposició de les galgues per a la mesura de l'esforç flector

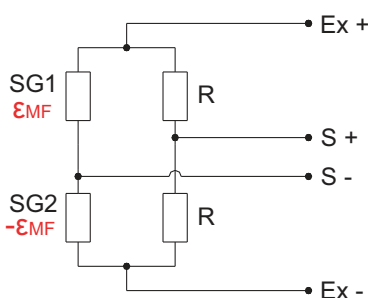


Figura 8.10: Configuració en mig pont per a la mesura del moment flector i compensació de l'esforç axial

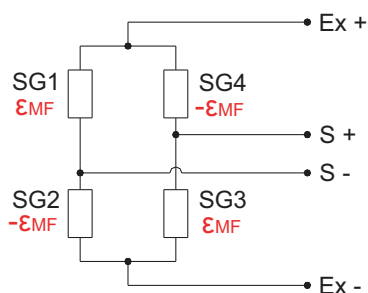


Figura 8.11: Configuració en pont complet per a la mesura del moment flector i compensació de l'esforç axial

Per a la mesura del moment flector i compensar l'efecte de l'esforç axial es poden realitzar dues configuracions. L'una consisteix en una configuració de mig pont (SG1 i SG2), amb una galga que mesura la deformació a tracció (positiva) i l'altra a compressió (negativa), on a causa de la configuració del pont, es suma l'efecte i s'obté un senyal proporcional al moment flector (Figura 8.10 i Equació 8.9).

$$S = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{SG1} - \varepsilon_{SG2}) = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{MF} \quad 8.9$$

L'altra configuració és la de pont complet, on s'obté el mateix efecte però amb un senyal de sortida del doble respecte al cas de mig pont (Figura 8.11 i Equació 8.10).

$$S = \frac{k}{4} \cdot (2 \cdot \varepsilon_{SG1} - 2 \cdot \varepsilon_{SG2}) = k \cdot \varepsilon_{MF} \quad 8.10$$

8.2.2.2. Mesura de l'esforç axial amb ponts de mesura

En una biga sotmesa a una càrrega axial pura, la deformació en la direcció longitudinal és igual en qualsevol punt de la secció d'aquesta i proporcional a la força aplicada. En la direcció transversal, la deformació té signe contrari a la de la direcció longitudinal i estan directament relacionades pel coeficient de Poisson (ν). Tenint en compte tant les mesures en la direcció longitudinal com en la transversal, es poden realitzar diferents configuracions per a la mesura de l'esforç axial i que es mostren a la Figura 8.12, la Figura 8.13 i la Figura 8.14.

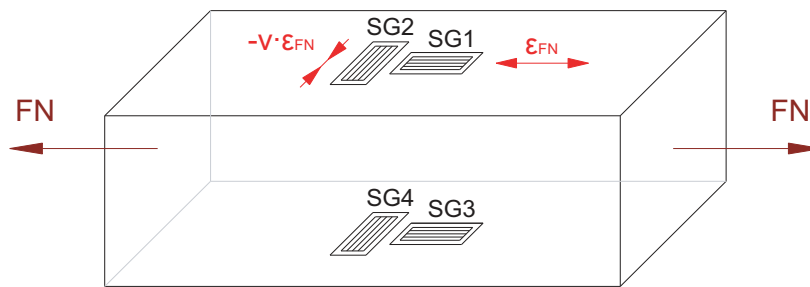


Figura 8.12: Esquema de la disposició de les galgues per a la mesura de l'esforç axial

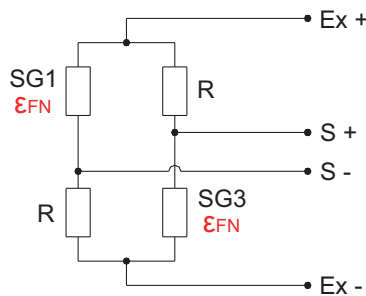


Figura 8.13: Configuració en pont diagonal per a la mesura de l'esforç axial i compensació del moment flector

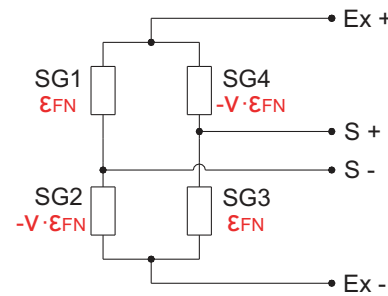


Figura 8.14: Configuració en pont complet per a la mesura de l'esforç axial i compensació del moment flector

La configuració en pont diagonal consisteix en realitzar la suma de les mesures de deformacions longitudinals en els punts superior i inferior. D'aquesta manera s'obté un senyal proporcional a l'esforç axial, i si la secció és simètrica, s'aconsegueix compensar l'efecte del moment flector (Figura 8.13 i Equació 8.11).

$$S = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{SG1} + \varepsilon_{SG3}) = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{FN} \quad 8.11$$

La configuració en pont complet consisteix en mesurar, a més de la deformació longitudinal, també la deformació transversal, mitjançant la utilització de dos graelles de mesura col·locades a 90° l'una de l'altra. En una de les branques (*SG1* i *SG2*), es suma el senyal corresponent a l'efecte de la deformació longitudinal i s'hi resta el de la transversal, relacionades pel coeficient de Poisson (ν), i que al ser aquestes de signe contrari, s'aconsegueix obtenir un senyal més gran que en el cas d'utilitzar només la mesura en la direcció longitudinal. Per tal de poder compensar l'efecte del moment flector (sempre que la secció d'estudi sigui simètrica), es disposa de la configuració equivalent a la branca complementaria del pont (*SG3* i *SG4*) (Figura 8.14 i Equació 8.12). Per últim, cal destacar que en la configuració en pont complet es compensen els efectes d'expansió tèrmica del material provocades pels canvis de temperatura.

$$S = \frac{k}{4} \cdot ((1 + \nu) \cdot \varepsilon_{SG1} + (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{SG3}) = \frac{k}{2} (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{FN} \quad 8.12$$

8.3. Anàlisi i quantificació dels valors de deformació previstos

Un cop analitzades les possibilitats en l'obtenció de les dades d'interès mitjançant galgues extensomètriques, el següent pas en el desenvolupament és determinar quins valors de deformació s'obtindrien en la llança de cada enganxall. L'objectiu és comprovar que les deformacions que s'obtindrien en els ponts de mesura són adequades per al posterior càlcul de les components de força al punt d'unió de l'enganxall, per tal de validar-ne la viabilitat com a instruments de mesura. Per aquests estudis es modelitza en CAD-3D cada enganxall i es realitza un conjunt de simulacions pel mètode d'elements finits (simulacions FEM) per a determinar les deformacions en els 4 punts de referència per a les mesures (definits a la Figura 8.4).

8.3.1. Determinació de les característiques del material

Dos dels factors que condicionen el comportament mecànic de l'enganxall, i que per tant són d'interès en aquest estudi, són el límit elàstic i el límit de fractura de l'acer amb que estan fabricats. Per aquesta mesura s'ha utilitzat el duròmetre portàtil Krautkramer MIC 20 de GE® (Figura 8.15). Aquest duròmetre utilitza el mètode de rebot per a la mesura de la duresa del material, i a més, el propi equip permet a partir de la mesura obtinguda determinar el valor del límit de fractura del material, segons les conversions establertes per la norma DIN 50 150.

Per obtenir un valor del límit de fractura representatiu s'ha realitzat un total de 10 mesures i se n'ha calculat la mitjana. Les mesures obtingudes indiquen que per a l'enganxall d'anella el límit de fractura és de 875 MPa, per a l'enganxall de bola amb base de 8 forats és de 1085 MPa i per a l'enganxall de bola amb base de 12 forats és de 1030 MPa. A partir del límit de fractura, admetent que el límit elàstic és el 85% del límit de fractura (valor típic en acers d'alt límit elàstic) i calculant-ho a partir del cas més desfavorable, corresponent als 875 MPa per a l'enganxall d'anella, es considera el valor de límit elàstic de 750 MPa per a tots els enganxalls. Aquest valor es pren de referència per a valorar el sobredimensionament de cada enganxall.

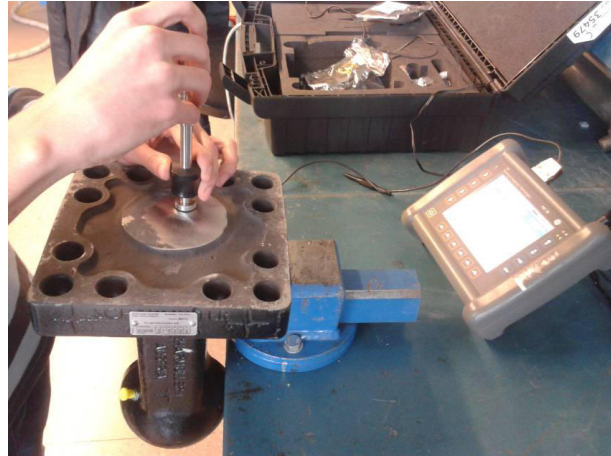


Figura 8.15: Mesura del límit de fractura de l'acer en l'enganxall de bola amb base de 12 forats mitjançant el duròmetre de rebot

8.3.2. Desenvolupament del model per a les simulacions

Modelització del model CAD-3D

Per al procés d'estudi i desenvolupament dels enganxalls dinamomètrics s'ha realitzat un model d'aquests en CAD-3D. Una de les grans dificultats en modelitzar aquests enganxalls és la geometria complexa que tenen, cosa que impossibilita realitzar algunes mesures correctament mitjançant estris de mesura convencionals. Per tal de modelitzar-los, s'ha utilitzat un equip de mesura tridimensional per tal d'obtenir uns models paramètrics el més representatius possibles (Figura 8.16).



Figura 8.16: Equip de mesura tridimensional Faro Fusion® de 3m i 7 eixos. Esquerra: Vista general; dreta superior: Detall del palpador; Dreta inferior: Imatge del programa de tractament de dades

L'equip de mesura tridimensional utilitzat és el Faro Fusion[®] de 3 m i 7 eixos i consisteix en un braç amb diferents articulacions on en cada una d'elles incorpora encoders d'alta resolució. A aquest equip s'hi pot acoblar a l'extrem un element palpador i un sistema de mesura per làser, que connectat amb un ordinador i amb el programa informàtic corresponent s'encarrega de calcular en tot moment la posició del punt de mesura del palpador o del làser i de tractar automàticament totes les dades adquirides per obtenir un model en CAD-3D de l'element mesurat.

Primerament, per obtenir la forma dels enganxalls s'ha utilitzat l'equip làser que permet obtenir la forma de l'enganxall a partir d'un núvol de punts. Per ajustar millor les cotes determinants en la modelització s'utilitza el sistema de mesura amb palpador. Amb el palpador es modelen les formes geomètriques característiques (plans, cilindres, punts), per tal de disposar de les dimensions principals de forma precisa. Els models finals amb totes aquestes dades es realitzen amb el programa de disseny CAD-3D CREO 2.0[®].

Model per a la simulació per elements finits

Les simulacions per elements finits es realitzen amb el mòdul Simulate[®] del programa CREO 2.0[®]. El procediment bàsic d'un càlcul pel mètode d'elements finits (FEM), un cop definides la geometria, les característiques del material, les càrregues i les restriccions, es basa en generar una malla que divideix la geometria complexa de la peça en elements de geometria simple per tal d'estudiar individualment cada un d'aquests elements. Mitjançant un procés de càlcul numèric iteratiu es calcula l'estat de tensions i de deformacions de cada element individual i es comparen amb els elements adjacents fins que l'estat de càrrega dels elements de càlcul i les interaccions entre ells s'equilibren dins d'uns marges d'error prèviament definits [100].

Per a l'aplicació de les forces en els enganxalls s'han modelitzat un conjunt de zones sobre la superfície interior de la bola i de l'anella. L'aplicació d'aquestes sobre la superfície es defineix de tal forma que la resultant de forces estigui aplicada al punt central de la bola o l'anella. S'han definit les components longitudinals de força de 100 kN en els dos sentits, les components transversals de 25 kN també en els dos sentits i una component vertical de 50 kN en sentit cap amunt. Depenent del cas simulat, s'habiliten o s'inhabiliten les components de força en l'execució de la simulació. Per a les restriccions del model es simula la fixació dels cargols de la base de l'enganxall. Per a definir-les, es restringeix en la direcció longitudinal les superfícies corresponents a les àrees de les volanderes del cargol, i a les superfícies cilíndriques de cada forat del cargol es restringeix el moviment en les dues direccions radials.

Les característiques de l'acer definides en la simulació són un mòdul elàstic E de 210 GPa i un coeficient de Poisson ν de 0,3. Per tal d'obtenir les dades de deformació que es mesurarien amb les galgues, s'ha definit per a cada punt d'estudi P_1 , P_2 , P_3 i P_4 de la Figura 8.4, la mesura de la deformació en la direcció longitudinal sobre la superfície de les cares de la llança. La simulació es configura de tal forma que finalitza quan s'aconsegueix un 1% de convergència entre iteracions.

Per últim, atès que a les cares de les llances dels enganxalls la superfície no és del tot llisa, es realitza un mecanitzat en aquestes cares de profunditat 2 mm i de 60 mm d'amplada per eliminar la cara superficial rugosa i deixar-la a punt per a la instal·lació

de les galgues extensomètriques. Aquest mecanitzat es modelitza en els models dels enganxalls per tenir-ho en consideració en les simulacions.

8.3.3. Estudi inicial de les deformacions en l'enganxall

Per a l'anàlisi de les deformacions en els punts d'estudi es realitzen tres simulacions per elements finits per a cada enganxall, una per a cada valor màxim en cada component de força. D'aquesta manera, es realitza una simulació amb F_x de 100 kN, una amb F_y de 25 kN i una amb F_z de 50 kN, totes en sentit positiu. Els resultats de deformació unitària en la direcció longitudinal en cada un dels punts d'estudi (P_1 , P_2 , P_3 i P_4) i per a cada enganxall i component de força aplicada es mostren a la Figura 8.17.

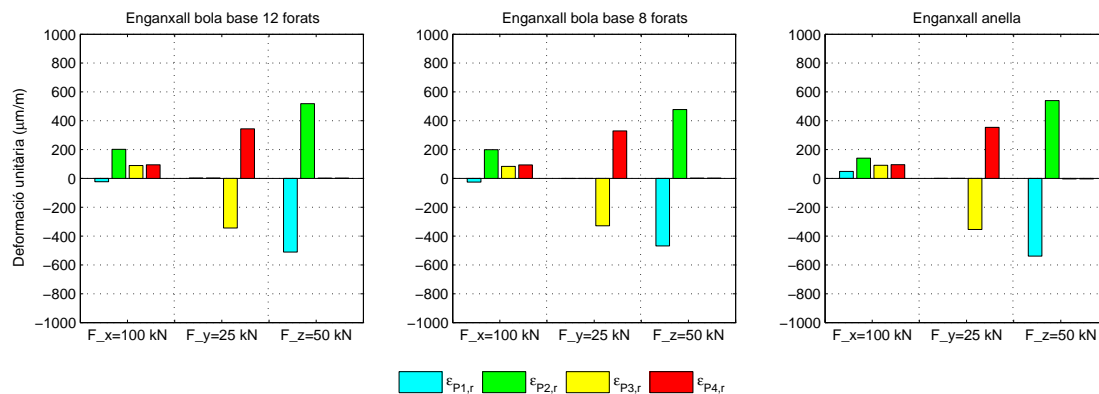


Figura 8.17: Resultats de l'estudi de les deformacions en els punts d'instal·lació de les galgues per als enganxalls dinamomètrics

En aquestes simulacions es comprova que la component longitudinal de força produeix deformacions molt petites als punts d'estudi de l'enganxall, si es comparen amb les deformacions que es tenen en els assajos de les components vertical i transversal. Per tant, es tindria una millor sensibilitat en la mesura de les components vertical i transversal que en la mesura de la component longitudinal. Cal destacar que, donat que la component longitudinal està descentrada respecte a la secció d'estudi, apareix un moment flector que provoca que la deformació en el punt P_1 sigui inclús negativa.

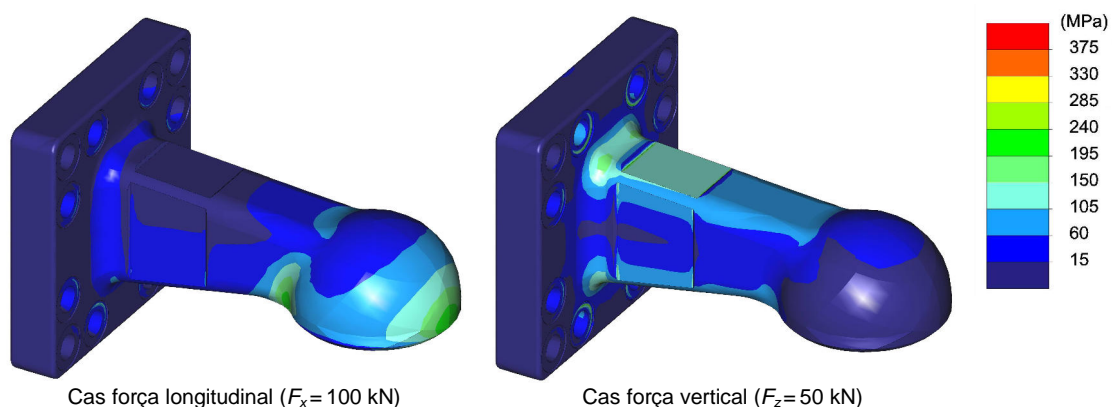


Figura 8.18: Tensions equivalents de VonMises en l'enganxall de bola amb base de 12 forats per al cas d'una força longitudinal i per al cas d'una força vertical

Si s'analitzen les tensions en l'enganxall obtingudes en la simulació, també es posa de manifest que els enganxalls estan molt sobredimensionats, on s'observa poca

deformació i per tant es tindria poca sensibilitat en la mesura (Figura 8.18). També s'observa, atès l'estat de tensions, que les forces vertical i transversal són les que limiten la resistència de l'enganxall i no la força longitudinal.

Amb aquests resultats, la conclusió a la que s'arriba en l'estudi és que les deformacions a la llança de l'enganxall són reduïdes ja que l'enganxall està molt sobredimensionat. A la vegada, les deformacions per a la component longitudinal de força són petites en comparació a les provocades per les components vertical i transversal, i per tant caldria millorar sobretot la sensibilitat en la mesura de la component longitudinal. Interessa doncs, augmentar la deformació per tal d'augmentar el senyal mesurat i disposar d'un interval ampli de senyal per a la determinació de la força mesurada. Al tenir deformacions tant petites en el fons d'escala, el pont de mesura serà més propens a que apareguin efectes com les desviacions del senyal a força nul·la, els errors en la sensibilitat o errors per possibles sorolls ambientals.

8.3.4. Modificacions per a l'increment de la sensibilitat en les mesures

Per tal d'augmentar la deformació en els punts on es preveu instal·lar les galgues es proposa realitzar un buidat de la part interior de la llança de l'enganxall, mitjançant el mecanitzat d'un forat en forma de prisma trapezoïdal amb una profunditat total de 140 mm des de la base de l'enganxall. Aquesta modificació es mostra a la Figura 8.19. El disseny es realitza de tal forma que queda a les 4 parets de la llança el mateix gruix d , i s'optimitzarà aquesta dimensió per tal de maximitzar la deformació tot garantint la resistència estructural. També s'indica a la Figura 8.19 el mecanitzat de 2 mm realitzat a les 4 cares de la llança de l'enganxall per disposar d'una superfície llisa per a la instal·lació de les galgues extensomètriques.

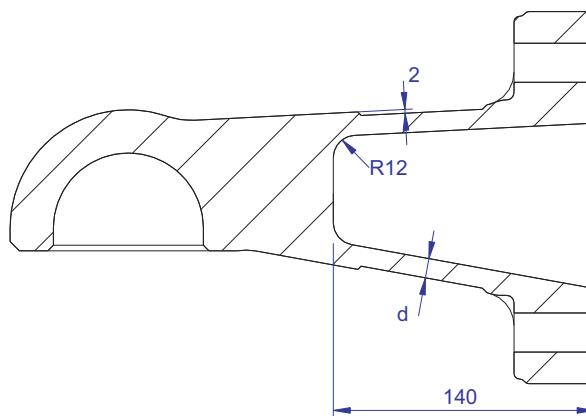


Figura 8.19: Dimensions del forat mecanitzat a la part posterior de l'enganxall

Així, amb aquesta modificació, es pretén incrementar les deformacions i per tant la sensibilitat en la mesura, principalment les provocades per la component longitudinal de força. En concret, es busca reduir l'àrea de la secció i en menor grau els moments d'inèrcia d'aquesta, ja que les deformacions degudes a esforç axial són significativament més petites que les provocades pels moments flectors en la secció.

Per al disseny i l'optimització del forat mecanitzat s'ha considerat el cas on hi intervenen les tres components de força amb el seu valor màxim de forma simultània. El

criteri de resistència utilitzat consisteix en limitar la tensió equivalent de VonMises a un valor màxim de 375 MPa, tenint en compte així un coeficient de seguretat igual a 2, ja que el límit elàstic que s'ha admès per al material dels enganxalls és de 750 MPa (Apartat 8.3.1).

Després de realitzar diferents estudis d'optimització amb diferents gruixos de paret a la llança de l'enganxall (dimensió d de la Figura 8.19), el forat mecanitzat s'ha realitzat de tal forma que quedi una paret de 10,5 mm de gruix per als dos enganxalls de bola, mentre que per a l'enganxall d'anella aquesta cota és de 12,5 mm.

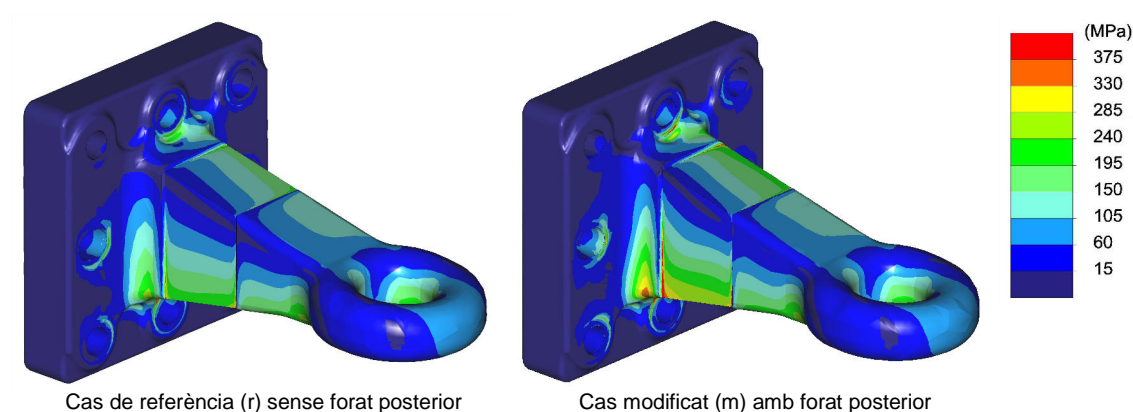


Figura 8.20: Tensions equivalents de VonMises en l'enganxall d'anella per al cas de càrrega màxima en les components longitudinal, transversal i vertical de força per al casos amb i sense forat posterior

A la Figura 8.20 es mostra una comparativa de les tensions en el model de les simulacions per a l'enganxall d'anella amb i sense el forat posterior. Es comprova que el fet de realitzar el forat incrementa les tensions en l'enganxall, però sense canviar significativament el patró de distribució d'aquestes. Cal destacar que en les simulacions per elements finits de cada enganxall, amb el forat mecanitzat posterior, les zones on apareixen les tensions més elevades corresponen a la zona arrodonida entre la base i la llança dels enganxalls, i és aquesta zona la que limita la resistència estructural dels enganxalls.

8.3.5. Resultats de l'estudi de deformacions amb els enganxalls modificats

A la Figura 8.21 es mostren els resultats de l'estudi de les deformacions en els punts d'instal·lació de les galgues per als tres enganxalls desenvolupats en aquesta tesi i amb les dues alternatives de disseny, la de referència (r), sense forat mecanitzat, i la modificada (m), amb forat interior mecanitzat. De la mateixa manera que en la Figura 8.17, es presenten els resultats de les deformacions en la direcció longitudinal en els 4 punts i per a les tres components de força.

Amb el disseny dels enganxalls amb el forat interior mecanitzat, per a la component longitudinal de força, s'observa que la modificació en l'enganxall no implica un canvi significatiu en la deformació en el punt P_1 , ja que aquesta deformació continua sent petita respecte a la resta de deformacions. S'observa també un increment d'un 60% en les deformacions del punt P_2 en els enganxalls de bola i d'un 70% en el d'anella. En els

punts P_3 i P_4 l'increment de les deformacions són del 90% en els de bola i del 80% en el d'anella, on s'aconsegueix gairebé doblar la deformació deguda a la component longitudinal. Per a la component transversal s'aconsegueix augmentar la deformació un 11% en l'enganxall d'anella i un 14% aproximadament en els de bola. Per al cas de la component vertical l'increment de deformació supera el 30%.

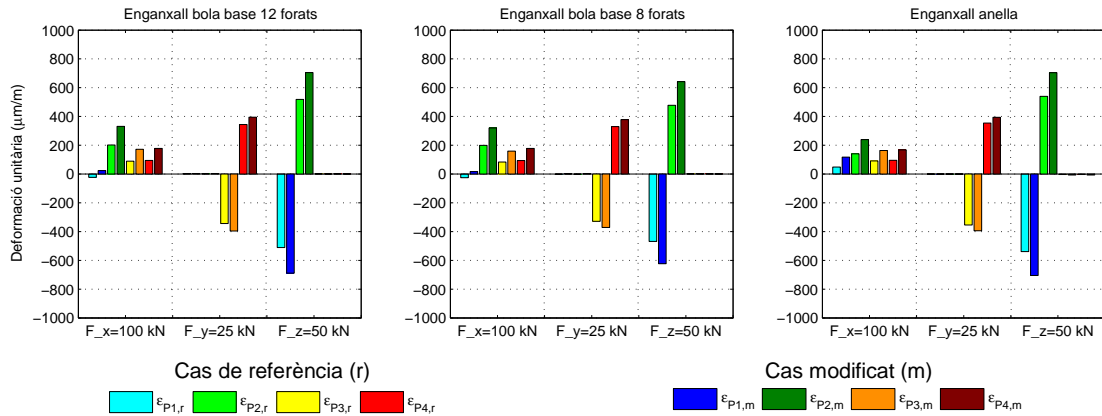


Figura 8.21: Comparativa dels resultats de l'estudi de les deformacions en els punts d'instal·lació de les galgues en els enganxalls per al cas de referència i el modificat

Aquests valors de deformacions obtinguts disten considerablement del valor màxim teòricament assolible. Per al cas d'estudi i per a una limitació de 375 MPa en el disseny es podria arribar a valors de deformació de 1785 $\mu\text{m/m}$. Es té aquesta problemàtica perquè les zones on apareixen les tensions màximes no corresponen als punts d'instal·lació de les galgues, com es pot observar a la Figura 8.20.

En resum, amb el mecanitzat del forat al llarg de la llança de l'enganxall s'aconsegueix augmentar la deformació que es mesurarà i per tant els senyals dels punts de galgues extensomètriques. A més, s'aconsegueix augmentar sobretot el senyal corresponent a la component longitudinal de força, que és la component que produeix menors deformacions a l'enganxall. Tot i que els valors de deformació previstos continuen sent reduïts respecte al valor màxim teòricament assolible, donada la geometria i les condicions de resistència establertes, no es pot augmentar més la sensibilitat mitjançant un increment de les deformacions, i caldrà actuar en altres aspectes com el disseny dels punts amb galgues extensomètriques per augmentar el senyal mesurat.

8.4. Descripció del disseny final dels enganxalls dinamomètrics

Un cop descrit el procediment seguit en el desenvolupament d'aquests enganxalls dinamomètrics, a continuació es descriu el disseny final d'aquests, on s'exposen les característiques principals i es descriu el disseny dels punts de mesura amb galgues extensomètriques utilitzat per a cada cas.

8.4.1. Descripció de les característiques principals dels enganxalls dinamomètrics

Com s'ha comentat a l'Apartat 8.1, els enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats són enganxalls d'un punt que s'instal·len a la llança de l'ormeig i que

permeten mesurar les components longitudinal, transversal i vertical de força en el punt d'unió d'aquests amb l'enganxall del tractor. A la Figura 8.22 es mostra el disseny final dels tres enganxalls dinamomètrics desenvolupats.



Figura 8.22: Enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats. D'esquerra a dreta: Enganxalls dinamomètrics d'anella, de bola amb base de 8 forats i de bola amb base de 12 forats

Per a cada enganxall dinamomètric es disposa de 4 ponts per a la mesura amb galgues extensomètriques. Amb les mesures d'aquests ponts de galgues es determinen les components longitudinal, transversal i vertical de força al punt d'unió de l'enganxall. El valor de la component longitudinal màxima a mesurar és de 100 kN tant a tracció com a compressió, la component transversal màxima és de 25 kN en els dos sentits i la component vertical màxima és de 50 kN mesurada en sentit cap amunt.

Aquests dinamòmetres s'han construït a partir d'uns enganxalls comercials, on les dimensions característiques i les normatives de referència per a cada un d'ells s'han exposat a l'Apartat 8.1.2. A cada enganxall s'hi ha realitzat un forat mecanitzat al llarg de la llança i per la part posterior en forma de prisma trapezoïdal, per tal de reduir la secció de la llança on s'hi instal·len les galgues, amb l'objectiu d'augmentar la sensibilitat en la mesura (Apartat 8.3).

8.4.2. Descripció de les connexions dels ponts de mesura

En aquest apartat es descriuen en detall les configuracions dels ponts de mesura amb galgues extensomètriques en els enganxalls dinamomètrics. A cada enganxall s'hi instal·len els ponts de mesura per determinar l'esforç axial i les components del moment flector, i amb aquestes determinar les forces longitudinal, transversal i vertical al punt d'unió de l'enganxall.

8.4.2.1. Tipus de configuracions en pont de mesura

A l'Apartat 8.2.2, s'han exposat les diferents configuracions possibles per a la mesura dels esforços axial i flector. Atès que les mateixes deformacions en els punts d'estudi de referència (P_1 , P_2 , P_3 i P_4 de la Figura 8.4) s'utilitzen tant en la mesura de l'esforç axial

com de les components del moment flector, i per tant en diversos ponts de galgues extensomètriques, resulta convenient utilitzar galgues amb doble graella. Aquestes galgues disposen en una mateixa làmina de dos graelles de mesura de deformacions. Amb aquestes galgues es realitza un pont de mesura per a la mesura d'una component del moment flector, un pont per a l'altra component del moment flector i dos ponts per a l'esforç axial, amb una mesura redundant en aquest últim cas.

En l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, que ha estat el primer en ser desenvolupat, s'ha optat per un disseny basat en utilitzar les configuracions més senzilles per a la mesura de les components en la secció d'estudi, on s'utilitzen dues graelles de mesura per pont. Així, es realitzen dos ponts diagonals per a la mesura de l'esforç axial (Figura 8.13) i dos mitjos ponts per a la mesura de les components del moment flector (Figura 8.10).

En canvi, per als enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella s'han elegit configuracions en pont complet. En aquests enganxalls s'han realitzat configuracions en pont complet amb l'objectiu d'augmentar la sensibilitat dels ponts de mesura, i obtenir un senyal del pont més elevat pels mateixos valors de deformació. Així, per a cada enganxall dinamomètric, s'utilitzen dos configuracions en pont complet per a la mesura de l'esforç axial (Figura 8.14) i dos ponts complets per a la mesura de les dos components del moment flector en la secció (Figura 8.11).

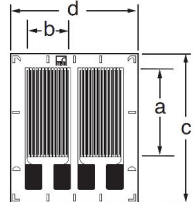
8.4.2.2. Característiques de les galgues extensomètriques

Les galgues amb doble graella utilitzades en els ponts de mesura depenen del tipus de configuració a realitzar. Per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats s'utilitza, tant per als mitjos ponts per a la mesura de la flexió com per als ponts diagonals per a la mesura de l'axial, galgues amb doble graella de mesura en paral·lel. Les mateixes galgues s'utilitzen per als ponts complets de mesura de flexió en els enganxalls de bola amb base de 8 forats i d'anella. En aquests enganxalls, per als ponts complets de mesura de l'axial, s'utilitzen galgues amb graelles de mesura disposades a 90° l'una de l'altra.

Les galgues utilitzades són galgues extensomètriques de característiques i propietats bàsiques de la marca HBM®, ja que aquestes són adequades per garantir els requeriments. Referent a les resistències elèctriques de les galgues s'ha elegit l'opció de 350 Ω , ja que si es compara amb l'altra opció estàndard de 120 Ω , les galgues de major resistència permeten realitzar configuracions que treballen a una tensió superior i eliminen en major grau l'efecte dels sorolls en la mesura. Cal destacar que les galgues de 350 Ω són les que normalment s'utilitzen a l'hora de desenvolupar equips per a la mesura de forces.

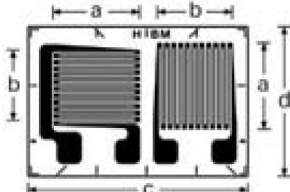
Per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, per a la formació dels ponts de mesura, s'han utilitzat un total de 4 galgues extensomètriques de doble graella en paral·lel, del tipus 3/350DY41. Les característiques principals es mostren a la Taula 8.3, on per aquestes el factor de galga k és de 2,05, informació facilitada pel fabricant en el lot de fabricació.

Taula 8.3: Característiques de les galgues extensomètriques de doble graella en paral·lel

	Tipus	3/350DY41
	Resistència	$350 \Omega \pm 0,30\%$
	Sensibilitat transversal	0,1%
	Tensió màx. per al pont	8,5 V
	Dimensions	a=3 mm b=2,7 mm c=8,2 mm d=8 mm

Per a la mesura de l'esforç axial en els enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats s'utilitzen galgues extensomètriques de doble graella disposades a 90° (en forma de T). Aquestes són del tipus 3/350XY31 i s'utilitzen un total de 4 galgues per formar els dos ponts complets en cada enganxall dinamomètric. Les característiques es mostren a la Taula 8.4. El factor de galga k d'aquestes és de 1,99.

Taula 8.4: Característiques de les galgues extensomètriques de doble graella en forma de T

	Tipus	3/350XY31
	Resistència	$350 \Omega \pm 0,30\%$
	Sensibilitat transversal	0,5%
	Tensió màx. per al pont	10 V
	Dimensions	a=3 mm b=3,3 mm c=10,9 mm d=7,6 mm

Finalment, per a la mesura de les components del moment flector en els enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats s'utilitzen les mateixes galgues que en el de bola amb base de 12 forats. Aquestes són les del tipus 3/350DY41 i s'utilitzen per formar dos ponts complets, un per a la mesura de cada component del moment flector sobre la secció d'estudi. Les característiques d'aquestes galgues són les exposades a la Taula 8.3, i en aquest cas el factor de galga k és de 2,06.

Per últim, la tensió d'alimentació en tots els ponts de mesura serà de 5 V. S'ha elegit aquest valor perquè la targeta d'adquisició de dades on es preveu connectar aquests enganxalls dinamomètrics permet automàticament alimentar els ponts a aquesta tensió (Apartat 12.2.3).

8.4.2.3. Configuració dels ponts de mesura per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

En l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, les configuracions es basen en utilitzar galgues extensomètriques amb dos graelles de mesura per pont i completar-les amb resistències de precisió. Així, per aquest cas, s'ha utilitzat un total de 4 galgues extensomètriques (un total de 8 graelles de mesura), cada una d'elles situada a cada una de les 4 cares de la llança de l'enganxall.

La disposició de les diferents graelles de mesura i els ponts formats amb aquestes es mostra a la Figura 8.23. Per a la mesura de l'esforç axial s'utilitzen dos ponts diagonals, l'un amb les galgues superior i inferior (pont A), i l'altre amb les dues galgues laterals (pont B). En aquest cas es completen els ponts amb un parell de resistències de precisió a cada pont. Per a la mesura de la component del moment flector en la direcció y s'utilitza un mig pont format per les galgues superior i inferior (Pont C). Es realitza una

configuració equivalent amb les dues galgues laterals per a la mesura de la component del moment flector en la direcció z (Pont D).

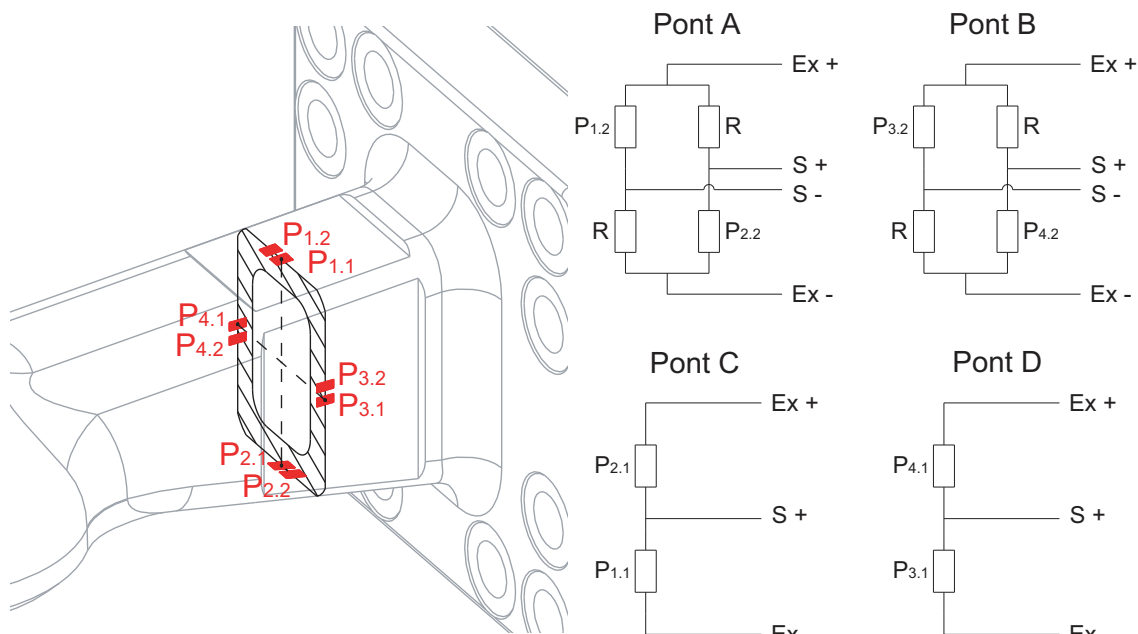


Figura 8.23: Disposició de les graelles de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola de base de 12 forats i connexions per als ponts de mesura

Per a la disposició de les galgues, l'opció plantejada ha estat situar cada galga de tal forma que una de les graelles de mesura quedi perfectament alineada amb el punt central de cada aresta de la secció d'estudi (graelles de mesura $P_{1.1}$, $P_{2.1}$, $P_{3.1}$ i $P_{4.1}$) mentre que l'altra graella quedi desplaçada (graelles de mesura $P_{1.2}$, $P_{2.2}$, $P_{3.2}$ i $P_{4.2}$). Les graelles descentrades, a més d'estar afectades per l'esforç axial i la component de flexió que es mesuraria en el punt central, també estan lleugerament afectades per la component del moment flector en l'altra direcció. En aquestes graelles de mesura, al estar a banda i banda de l'eix central de la secció, les deformacions provocades per aquesta component són iguals i de signe contrari. Per compensar-les, cal sumar l'efecte d'aquestes, que és el que s'aconsegueix amb els dos ponts per a la mesura de l'esforç axial. Per tant, els mitjos ponts de mesura del moment flector (pont C i D) es realitzen amb les graelles que queden centrades, per tal de que no es vegin afectades per la deformació de la component del moment perpendicular a la de mesura, i amb les 4 graelles descentrades s'han realitzat les connexions en pont diagonal per a la mesura de l'esforç axial (Pont A i B), ja que en aquests ponts de mesura l'efecte es compensa.

8.4.2.4. Configuració dels ponts de mesura per als enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats

Per al cas dels enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella, s'ha utilitzat un total de 8 galgues extensomètriques, de les quals 4 són del tipus de doble graella en paral·lel i les altres 4 són del tipus de doble graella en disposició T (disposades a 90° l'una de l'altra). Les primeres s'utilitzen en els ponts de mesura de les components del moment flector mentre que les altres s'utilitzen en els ponts de mesura de l'esforç axial. A la Figura 8.24 es mostra la disposició de cada graella de mesura amb les corresponents connexions per formar els ponts de mesura.

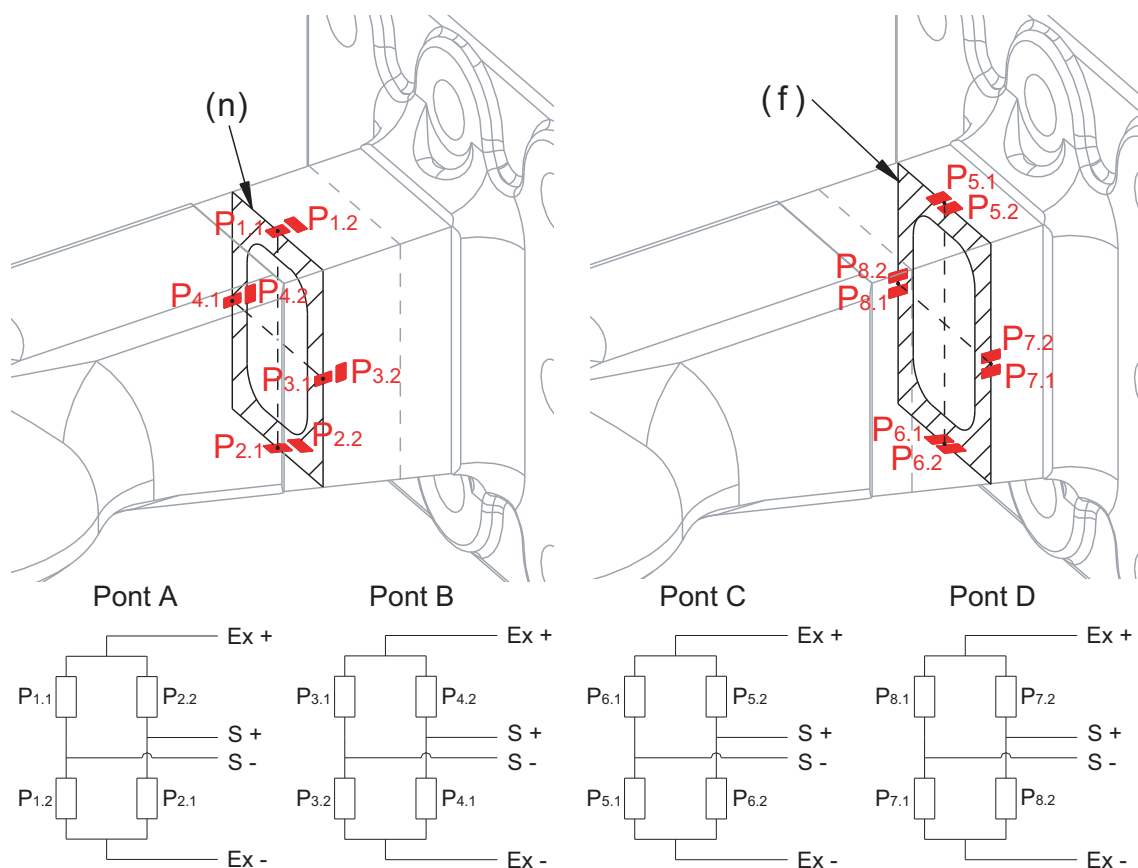


Figura 8.24: Disposició de les graelles de mesura en els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella i connexions per als ponts de mesura

En aquests enganxalls dinamomètrics, els ponts de mesura de flexió i d'axial estan en seccions paral·leles donada la impossibilitat de posar totes les galgues a la mateixa secció. A la secció més pròxima al punt d'unió de l'enganxall és on s'han situat els ponts de mesura d'axial (secció n). La secció més pròxima a la base de l'enganxall és la secció on s'instal·len els ponts per a la mesura del moment flector (secció f). La secció per als ponts de mesura d'axial té una àrea inferior a la secció dels ponts de mesura de flexió, i per tant s'obté una deformació més gran per a aquesta component. En la secció dels ponts per a la mesura de la flexió, com que està més allunyada del punt d'aplicació de la força, es tenen components del moment flector més elevades i en definitiva més senyal, ja que l'augment del moment d'inèrcia de la secció no és tan important com l'increment de distància al punt d'unió, aspecte que s'ha validat en les simulacions per elements finits realitzades.

Per a la mesura de l'esforç axial s'utilitzen dos ponts complets amb galgues amb graelles disposades a 90°, de les quals unes mesuren en la direcció longitudinal i les altres mesuren en la direcció transversal. Així, es realitza una configuració que utilitza les dues graelles superiors i les dues inferiors per a un pont de mesura de l'esforç axial (Pont A). Una configuració equivalent es realitza amb les dues galgues laterals (Pont B). A més d'augmentar la sensibilitat per l'efecte de la mesura de la deformació transversal, aquestes configuracions en pont complet compensen els efectes de la temperatura.

Per als ponts de mesura del moment flector s'utilitzen les galgues amb doble graella de mesura en paral·lel. Per a la component del moment flector en la direcció y s'ha realitzat un pont complet amb les dues graelles de mesura superiors i les dues inferiors (Pont C).

Per a la mesura de la component del moment flector en la direcció z s'ha utilitzat un pont complet format per les quatre galgues de mesura laterals (Pont D). A diferència del cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, les galgues extensomètriques no s'han instal·lat desplaçades sinó amb la galga centrada, ja que la pròpia connexió en pont complet permet compensar l'efecte del moment en l'altra direcció.

8.4.2.5. Procediment en la instal·lació de les galgues extensomètriques

En aquest últim apartat es descriu el procediment seguit per a la instal·lació de les galgues i la connexió dels diferents ponts de mesura per als enganxalls dinamomètrics [101].

El primer pas correspon a la preparació de les superfícies on s'enganxen les galgues. A les cares de la llança de l'enganxall on s'hi han d'instal·lar les galgues, primerament es netegen amb una tovalloleta impregnada amb dissolvent. Un cop netes, es poleixen les superfícies amb un tros de paper de vidre. Per tal d'indicar els punts on s'han de situar les galgues extensomètriques, es marquen sobre la superfície unes línies de guia. Per al marcatge d'aquestes línies s'utilitza un calibre d'altures sobre una taula de marbre de referència per marcar la posició de cada galga amb precisió (Figura 8.25).

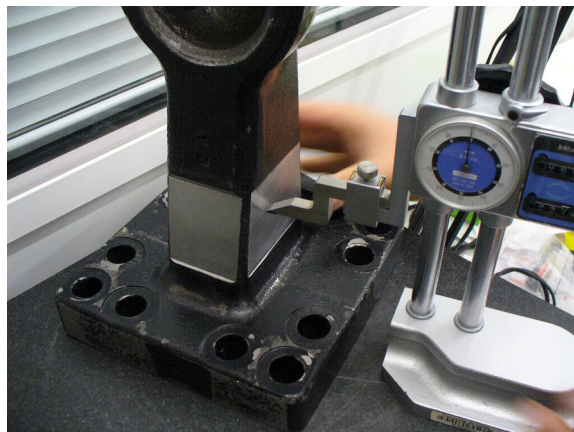


Figura 8.25: Marcatge de les línies d'alineació per a la instal·lació de les galgues extensomètriques

Abans d'enganxar les galgues s'han de soldar els cables que permeten formar els ponts de mesura. S'ha utilitzat una peça de suport on es fixa la galga mitjançant cinta adhesiva deixant els contactes per soldar al descobert, per tal de poder soldar mitjançant un soldador d'estany els cables als contactes de les galgues. Abans de l'enganxat de les galgues, es neteja amb una tovalloleta impregnada amb dissolvent la superfície on s'instal·larà la galga, per tal de retirar qualsevol impuresa que es pugui haver dipositat a sobre. Mitjançant unes pinces es situa la galga sobre la superfície on s'ha d'instal·lar alineant-la amb les marques realitzades, i amb un tros de cinta adhesiva, es fixa el cable a una zona pròxima a la galga. Amb aquesta disposició s'utilitza el propi cable de frontissa per aixecar i abaixar la galga per comprovar-ne la correcta alineació amb les marques. Amb la galga aixecada es disposen dues gotes de pegament de cianocrilat i amb un tros de tefló es distribueix uniformement. A continuació, amb l'ajuda d'un tros de film de tefló, es pressiona la galga amb la superfície. Després, es manté la galga pressionada durant dos minuts per tal que el pegament s'assequi i la galga quedi perfectament enganxada.



Figura 8.26: Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats amb les galgues extensomètriques

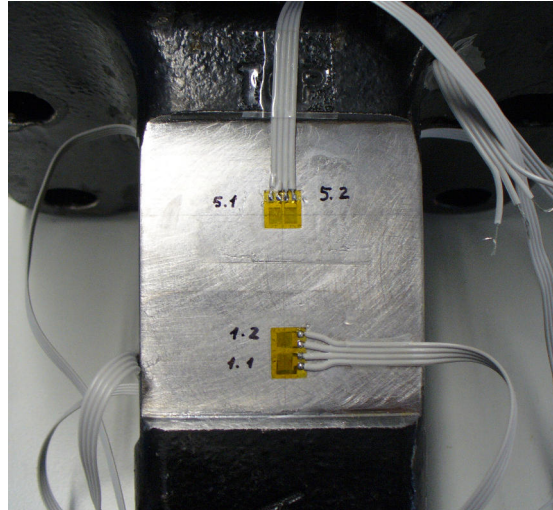


Figura 8.27: Detall de la disposició de les galgues extensomètriques

Per tal de poder connectar els ponts de galgues a la targeta d'adquisició de dades, s'ha utilitzat un cable de 8 conductors trenats dos a dos amb apantallament, on per una banda s'ha grimpat el connector per a la connexió a la targeta d'adquisició i per l'altra s'ha soldat cada conductor amb els corresponents conductors de les galgues per formar els ponts de mesura. Les diferents connexions es protegeixen amb tub termoretràctil i cinta aïllant. També es fixa amb un parell de brides de plàstic els quatre cables dels ponts a un suport instal·lat a la base de l'enganxall dinamomètric. Durant aquest procediment es comprova la correcta connexió de les galgues mitjançant un multímetre per mesurar les resistències de les galgues, les resistències dels ponts i l'aïllament de les galgues amb la massa de l'enganxall. Per últim, per protegir les galgues dels agents exteriors, es recobreix cada galga amb massilla protectora per evitar l'entrada d'humitat i un tros de lona tallada a mida que cobreix totes les cares de la llança de l'enganxall.

9. MODELITZACIÓ MECÀNICA DELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS

En aquest capítol es desenvolupen les equacions teòriques que permeten determinar les components longitudinal, vertical i transversal de força en els enganxalls dinamomètrics a partir de les mesures del conjunt de ponts de galgues extensomètriques. Per a la validació d'aquests models es realitza un estudi mitjançant simulacions per elements finits.

9.1. Model teòric per al càlcul de les forces a partir dels senyals dels ponts de mesura

En aquest apartat es presenten les equacions que permeten relacionar els senyals dels ponts de mesura amb les components de la força aplicada al punt d'unió en cada un dels enganxalls dinamomètrics desenvolupats, de manera que s'obté el model teòric per al càlcul de les components de força en cada enganxall dinamomètric.

9.1.1. Descripció del model teòric

Les equacions que es plantegen consisteixen en determinar les components de la força aplicada al punt d'unió de l'enganxall a partir dels senyals obtinguts dels diferents ponts de mesura de galgues extensomètriques. Amb els senyals que es mesuren en cada pont de galgues, es determinen les deformacions provocades per a cada component d'esforç en la secció d'estudi on hi ha instal·lades les galgues. Amb aquestes mesures de deformacions, es determinen les components de l'esforç axial i del moment flector al que està sotmesa la secció d'estudi, i amb aquestes s'obtenen les components de força aplicades al punt d'unió de l'enganxall (Figura 9.1).

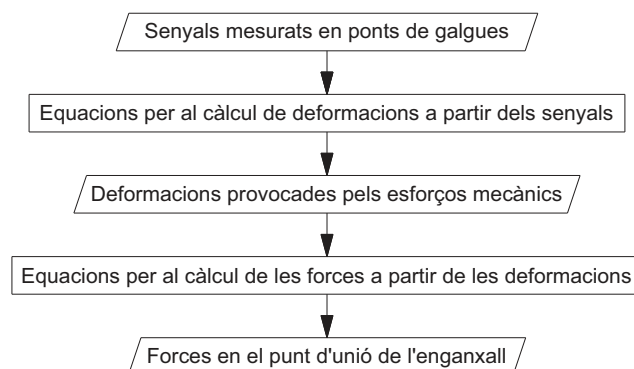


Figura 9.1: Procediment per al càlcul de les components de força al punt d'unió de l'enganxall a partir dels senyals mesurats

Per a la modelització matemàtica dels enganxalls dinamomètrics, a la Figura 9.2 es mostren les cotes principals que intervenen en el càlcul i a la Taula 9.1 es mostren els valors d'aquestes, juntament amb les dades d'àrees i moments d'inèrcia de les seccions per a cada un dels enganxalls dinamomètrics. Aquests valors s'han obtingut a partir del model en CAD-3D de cada un dels enganxalls (Apartat 8.3.2).

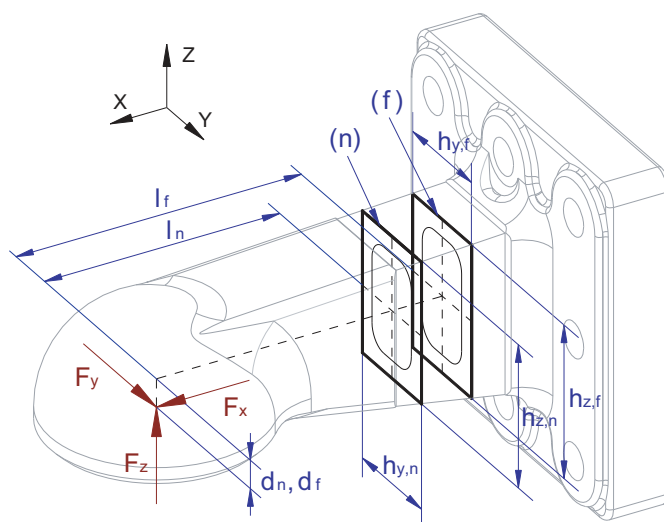


Figura 9.2: Esquema de les dimensions dels enganxalls dinamomètrics

Taula 9.1: Paràmetres dels enganxalls dinamomètrics

	Eng. din. bola base 12 forats	Eng. din. bola base 8 forats Secció (n)	Eng. din. bola base 8 forats Secció (f)	Eng. din. anella Secció (n)	Eng. din. anella Secció (f)
$A \text{ (mm}^2\text{)}$	2667	2748	2895	2526	2780
$I_y \text{ (mm}^4\text{)}$	$2,214 \cdot 10^6$	$2,329 \cdot 10^6$	$2,868 \cdot 10^6$	$1,596 \cdot 10^6$	$2,392 \cdot 10^6$
$I_z \text{ (mm}^4\text{)}$	$1,289 \cdot 10^6$	$1,303 \cdot 10^6$	$1,398 \cdot 10^6$	$1,168 \cdot 10^6$	$1,336 \cdot 10^6$
$h_y \text{ (mm)}$	61,95	61,07	61,07	61,5	61,5
$h_z \text{ (mm)}$	84,26	84,52	91,48	72,95	85,06
$l \text{ (mm)}$	150	140	170	130	160
$d \text{ (mm)}$	16,72	18,87	16,92	6,26	6,93

Per a aquest model teòric, de la mateixa manera que en la fase de desenvolupament d'aquests enganxalls dinamomètrics (Capítol 8), s'ha considerat que l'acer té un mòdul elàstic de 210 GPa i un coeficient de Poisson de 0,3.

9.1.2. Consideracions i simplificacions en el model teòric

Donada la geometria de la llançà de l'enganxall, on la secció varia al llarg de la llançà, les equacions habitualment utilitzades en resistència de materials per a perfils de secció constant poden no representar amb exactitud la situació real [102]. Tot i això, la hipòtesi que es planteja és que les equacions per al càlcul dels esforços en elements de secció constant són suficientment vàlides per al cas d'estudi en aquesta tesi, i permet obtenir una estimació de les components de força al punt d'unió de cada enganxall amb una precisió adequada per a aquests dinamòmetres.

En base a tots aquells factors que podrien provocar diferències entre el comportament del model proposat i la realitat, a continuació s'exposen el conjunt de consideracions admeses en el desenvolupament de les equacions per al model teòric per a la mesura de les components de força als punts d'unió de l'enganxall a partir dels senyals mesurats:

- Les mesures de les graelles superior i inferior són en cares inclinades però es considera que aquestes tenen el mateix valor que es tindria si les cares fossin paral·leles.

- La línia directriu de la llança no coincideix amb la direcció longitudinal, definida per l'eix x. Tot i això es pren com si aquesta ho fos de manera que la secció d'estudi és paral·lela al pla y-z.
- A cada punt d'estudi de la secció es redueix a la direcció x l'anàlisi de tensions i deformacions. Aquesta consideració s'admet suficient per a la correcta determinació dels esforços en la secció.
- Com a conseqüència de l'anàlisi de tensions només en la direcció longitudinal, es considera que la deformació en la direcció transversal en cada punt d'estudi és atribuïble únicament a l'efecte Poisson, i és l'única deformació que mesuraran les graelles transversals.
- Atesa la geometria dels enganxalls, es dona la situació que la línia d'actuació de la component transversal de força està per sota del pla mig horitzontal de les seccions d'estudi, de forma que provoca un moment torsor en aquesta. Aquest moment torsor no es té en consideració ja que els ponts de mesura no es veuran afectats per aquesta component. A més, tenint en compte que la secció té un moment resistent a torsió molt gran i que el moment torsor és molt petit, es preveu que l'efecte de la torsió sigui negligible.
- En el cas de les galgues amb dos graelles situades a 90° , la graella que mesura la deformació transversal està desplaçada 4,5 mm en la direcció longitudinal respecte la graella que mesura la deformació longitudinal, a causa de la pròpia geometria de la galga. Es considera però, que la mesura de la graella transversal correspon al punt on es mesura la deformació longitudinal i s'omet el canvi en la deformació transversal al llarg de la cota longitudinal.

A l'Apartat 9.2 es realitza una comparativa entre els resultats obtinguts amb el model teòric desenvolupat en aquest apartat i els resultats obtinguts mitjançant simulació per elements finits. Amb aquesta comparativa es valora si els factors esmentats condicionen la viabilitat del model teòric desenvolupat.

9.1.3. Equacions per a la determinació de les deformacions a partir dels senyals

En base a les configuracions dels ponts de mesura exposades en l'Apartat 8.4.2, per a cada un dels enganxalls dinamomètrics, en aquest apartat es relaciona el senyal mesurat per cada pont amb la deformació mesurada i utilitzada per al càlcul de les components de força al punt d'unió de l'enganxall. Atès que les configuracions en pont de galgues de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats són diferents a la dels altres dos, les equacions en cada cas es tracten de forma separada.

Cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

Per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, a la Figura 9.3 es mostren els ponts de mesura amb les graelles de mesura utilitzades en cada un.

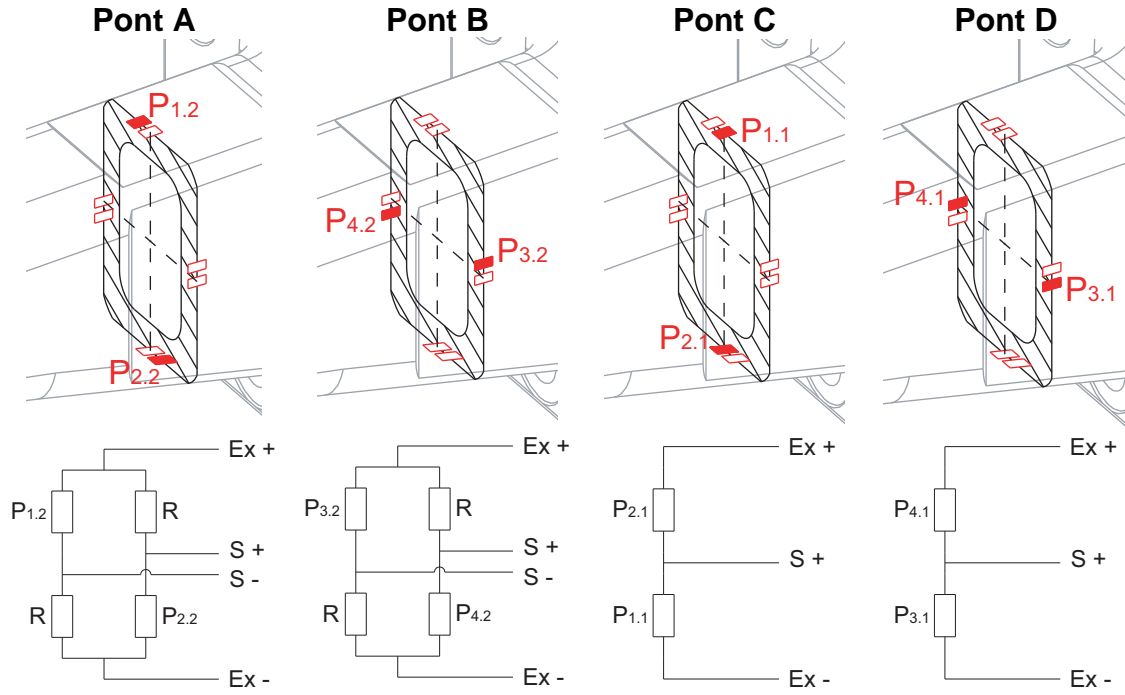


Figura 9.3: Configuració dels ponts de mesura per a l'enganxall de bola amb base de 12 forats

Amb les configuracions en pont diagonal (ponts A i B) s'obté la deformació corresponent a l'esforç axial. En aquesta configuració, l'efecte de les deformacions provocades per les components del moment flector es cancel·len, de manera que en resulta un senyal de sortida del pont proporcional a l'esforç axial (ε_{FNx}) (Equacions 9.1 i 9.2).

$$S_A = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P1.2} + \varepsilon_{P2.2}) = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{FNx,A} \quad 9.1$$

$$S_B = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P3.2} + \varepsilon_{P4.2}) = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{FNx,B} \quad 9.2$$

Per a la mesura de les components del moment flector, s'utilitzen les configuracions en mig pont (ponts C i D). En aquestes configuracions, l'efecte de les deformacions provocades per l'esforç axial es compensa i s'obté un senyal a la sortida del pont proporcional a la component del moment flector. El pont C mesura la deformació provocada per la component en y del moment flector MF_y (ε_{MFy}) segons l'Equació 9.3. De la mateixa manera, el pont D mesura la deformació provocada per la component en z del moment flector MF_z (ε_{MFz}) segons l'Equació 9.4. El signe negatiu en l'equació del pont D ajusta els signes per a que una mesura de deformació positiva correspongui a una component del moment flector positiva.

$$S_C = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P1.1} - \varepsilon_{P2.1}) = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{MFy} \quad 9.3$$

$$S_D = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P3.1} - \varepsilon_{P4.1}) = -\frac{k}{2} \cdot \varepsilon_{MFz} \quad 9.4$$

Cas dels enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats

Per al cas dels enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats, a la Figura 9.4 es mostra cada pont de mesura amb les graelles de mesura utilitzades en cada un d'ells.

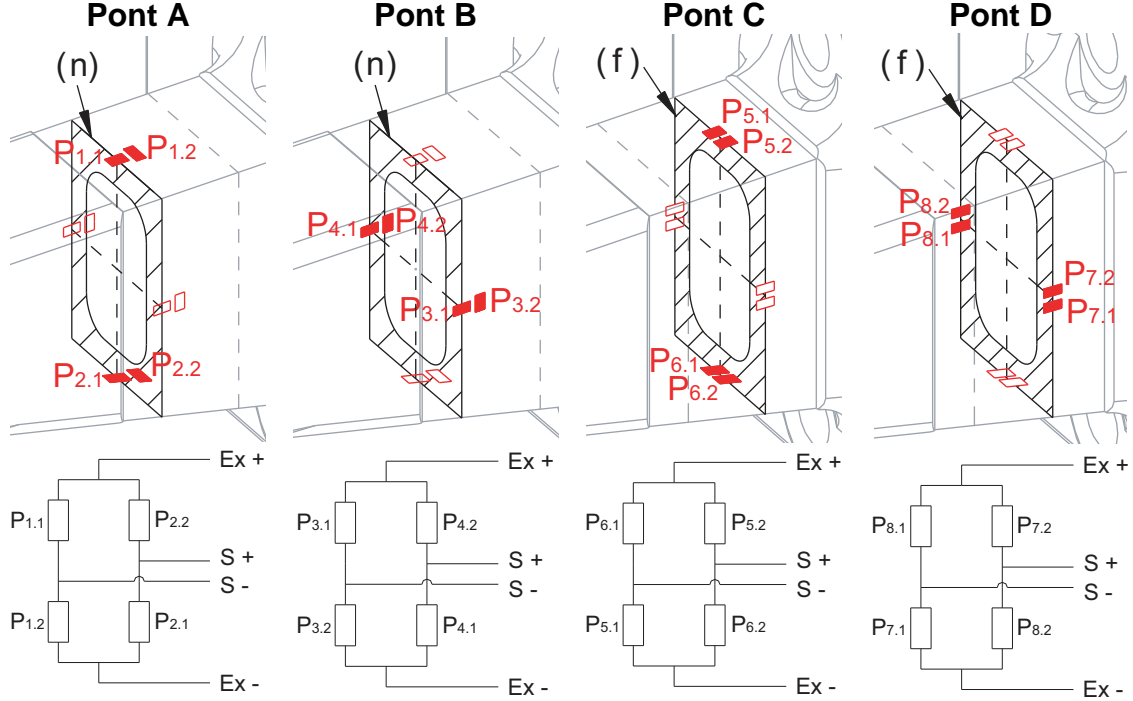


Figura 9.4: Configuració dels ponts de mesura per a l'enganxall de bola amb base de 8 forats i l'enganxall d'anella

Per a la mesura de l'esforç axial s'utilitzen els ponts complets A i B, que utilitzen per a cada pont dos graelles de mesura disposades en la direcció longitudinal i dos disposades en la direcció transversal. Considerant que el valor de la deformació en cada graella transversal és igual a la deformació de la corresponent graella longitudinal multiplicada pel coeficient de Poisson i de signe contrari, l'expressió es pot deixar en funció de les dos deformacions longitudinals de les galgues superiors i inferiors. La configuració del pont permet compensar l'efecte de les components del moment flector i obtenir un senyal proporcional a l'esforç axial FN_x (ϵ_{FNx}). Així, per als ponts A i B es tenen les Equacions 9.5 i 9.6 respectivament.

$$S_A = \frac{k}{4} \cdot (\epsilon_{P1.1} - \epsilon_{P1.2} + \epsilon_{P2.1} - \epsilon_{P2.2}) = \frac{k}{2} \cdot (1 + \nu) \cdot \epsilon_{FNx,A} \quad 9.5$$

$$S_B = \frac{k}{4} \cdot (\epsilon_{P3.1} - \epsilon_{P3.2} + \epsilon_{P4.1} - \epsilon_{P4.2}) = \frac{k}{2} \cdot (1 + \nu) \cdot \epsilon_{FNx,B} \quad 9.6$$

Per a la mesura de les components del moment flector, en els ponts C i D s'utilitzen també configuracions en pont complet amb 4 graelles de mesura per pont. Amb aquesta configuració es compensa l'efecte de la deformació provocada per l'esforç axial i s'obté un senyal proporcional a la deformació provocada per la component del moment flector. A l'Equació 9.7, corresponent al pont C de mesura de la deformació provocada per la

component en y del moment flector MF_y (ε_{MF_y}), s'introdueix un signe negatiu per a que la deformació mesurada positiva correspongui a una component del moment positiva en la secció. El pont D mesura la deformació provocada per la component en z del moment flector MF_z (ε_{MF_z}), i s'obté aquest valor en funció del senyal segons l'Equació 9.8.

$$S_C = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P6.1} - \varepsilon_{P5.1} + \varepsilon_{P6.2} - \varepsilon_{P5.2}) = -k \cdot \varepsilon_{MF_y} \quad 9.7$$

$$S_D = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{P8.1} - \varepsilon_{P7.1} + \varepsilon_{P8.2} - \varepsilon_{P7.2}) = k \cdot \varepsilon_{MF_z} \quad 9.8$$

9.1.4. Equacions per a la determinació de les components de força

Un cop obtingudes les mesures de deformació, el següent pas és relacionar aquestes amb els esforços en la secció. El plantejament en aquest apartat és equivalent a l'exposat a l'Apartat 8.2. Els punts d'estudi de la secció P_1 i P_2 estan afectats per l'esforç axial FN_x i la component del moment flector MF_y , mentre que els punts P_3 i P_4 estan afectats per l'esforç axial i la component del moment flector MF_z (Figura 9.5). Com s'ha comentat a l'Apartat 8.2, si es realitza la suma dels valors de tensió dels punts P_1 i P_2 i es divideix per dos, i també entre les tensions dels punts P_3 i P_4 , s'obté la tensió provocada per l'esforç axial FN_x . Si es realitza la diferència dels valors de tensions dels punts P_1 i P_2 i es divideix per dos s'obté el valor de tensió provocada per la component del moment flector MF_y , i amb les tensions dels punts P_3 i P_4 , la tensió provocada per la component del moment flector MF_z .

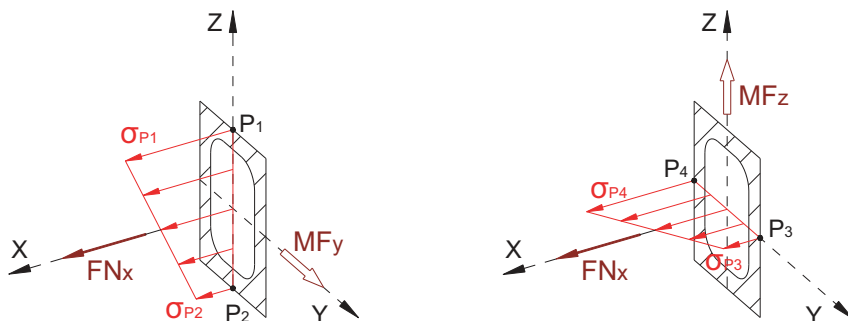


Figura 9.5: Distribució de tensions en la secció d'estudi amb els corresponents esforços

Les equacions presentades a continuació són vàlides per a tots els enganxalls dinamomètrics desenvolupats. Cal tenir present que per al cas de l'enganxall dinamomètric d'anella i de bola amb base de 8 forats, per a la determinació de les components del moment flector, les tensions correspondrien als punts P_5 , P_6 , P_7 i P_8 en comptes dels punts P_1 , P_2 , P_3 i P_4 , ja que en aquests la mesura de la flexió es realitza en una secció diferent a la de l'esforç axial, tal i com s'ha indicat a l'Apartat 8.4.2. També per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats no cal fer distinció entre les seccions d'estudi, corresponents als subíndex n i f dels paràmetres dels enganxalls, ja que totes les mesures es realitzen en la mateixa secció d'estudi.

Component longitudinal de força

La component longitudinal de força es calcula a partir de les tensions dels punts P_1 i P_2 , corresponents als punts superior i inferior de la secció d'estudi mesurades mitjançant el pont A. Atès que es redueix l'anàlisi de tensions i deformacions a la direcció longitudinal, la component longitudinal de força en el punt d'unió de l'enganxall es pot expressar en funció de la deformació mesurada amb el pont A (Equació 9.9).

$$F_{x,A} = FN_x \approx \left(\frac{\sigma_{P1} + \sigma_{P2}}{2} \right) \cdot A_n \approx \sigma_{FNx,A} \cdot A_n \approx E \cdot \varepsilon_{FNx,A} \cdot A_n \quad 9.9$$

De la mateixa manera, es pot determinar la component longitudinal de força a partir de les deformacions de les cares laterals de la secció, corresponents als punts P_3 i P_4 i mesurades a partir del pont B de galgues. (Equació 9.10).

$$F_{x,B} = FN_x \approx \left(\frac{\sigma_{P3} + \sigma_{P4}}{2} \right) \cdot A_n \approx \sigma_{FNx,B} \cdot A_n \approx E \cdot \varepsilon_{FNx,B} \cdot A_n \quad 9.10$$

Component transversal de força

La component transversal de força provoca un moment flector sobre la secció d'estudi en la direcció z, i per tant, deformacions a les cares dreta i esquerra de la llança de l'enganxall. Aquest moment flector es determina a partir de les mesures de deformació en els punts P_3 i P_4 , equivalents als punts P_7 i P_8 en els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella (Equació 9.11).

$$MF_z \approx \left(\frac{-\sigma_{P3} + \sigma_{P4}}{2} \right) \cdot \frac{I_{z,f} \cdot 2}{h_{y,f}} \approx \sigma_{MFz} \cdot \frac{I_{z,f} \cdot 2}{h_{y,f}} \approx E \cdot \varepsilon_{MFz} \cdot \frac{I_{z,f} \cdot 2}{h_{y,f}} \quad 9.11$$

La component transversal F_y es determina directament a partir d'aquesta component del moment mitjançant l'Equació 9.12 (equivalent a l'Equació 8.2).

$$F_y = \frac{MF_z}{l_f} \quad 9.12$$

Component vertical de força

Per al càlcul de la component vertical de força es determina primerament la component del moment flector en la direcció y mitjançant les mesures de deformació als punts P_1 i P_2 , corresponents als punts P_5 i P_6 per als enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella (Equació 9.13).

$$MF_y \approx \left(\frac{\sigma_{P1} - \sigma_{P2}}{2} \right) \cdot \frac{I_{y,f} \cdot 2}{h_{z,f}} \approx \sigma_{MFy} \cdot \frac{I_{y,f} \cdot 2}{h_{z,f}} \approx E \cdot \varepsilon_{MFy} \cdot \frac{I_{y,f} \cdot 2}{h_{z,f}} \quad 9.13$$

Aquesta component del moment flector és la que en resulta dels moments provocats per la component vertical F_z i la component longitudinal F_x , ja que aquesta última es troba

desviada respecte el punt central de la secció. Per a determinar la component vertical s'utilitza l'Equació 9.14 (equivalent a l'Equació 8.3).

$$F_z = -\frac{MF_y}{l_f} - \frac{F_{x,A} \cdot d_f}{l_f} \quad 9.14$$

En aquesta equació, es pren la mesura de $F_{x,A}$ i no de $F_{x,B}$ en el càlcul de F_z perquè així s'utilitzen els mateixos valors de deformació unitària que per a la mesura de MF_y . En concret, per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats els valors de deformació mesurats en cada graella coincideixen, mentre que en els altres dos, les mesures utilitzades corresponen a les mateixes cares de la llança de l'enganxall.

9.1.5. Model teòric per al càlcul de les forces sobre l'enganxall

Si es substitueixen les equacions per al càlcul de les components de força i les equacions de les deformacions a partir dels senyals en el pont, juntament amb els valors corresponents de cotes, propietats del material i característiques de les galgues, s'obtenen les equacions teòriques per al càlcul de les components de força al punt d'unió de l'enganxall. Aquestes equacions, per a cada un dels enganxalls dinamomètrics desenvolupats, es resumeixen a la Taula 9.2

Taula 9.2: Equacions del model teòric per al càlcul de les components de força en els enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)

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

Els coeficients de les equacions per a les components longitudinals $F_{x,A}$ i $F_{x,B}$ són significativament més grans que els coeficients de les equacions per a la mesura de les components vertical i transversal. Aquest aspecte es deu a que les deformacions provocades per la component de força F_x són considerablement inferiors a les deformacions provocades per les components F_y i F_z , aspecte que ja s'ha identificat a l'Apartat 8.3.

Si s'analitzen els coeficients dels enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats, els coeficients obtinguts són més petits que en el cas del de bola amb base de 12 forats. Això es deu a que els senyals en aquest últim són més reduïts que en els altres, ja que les configuracions en pont utilitzen dues graelles de mesura en comptes de quatre. En els enganxalls dinamomètrics amb pont complet (amb 4 graelles de mesura per pont) l'increment és aproximadament del 30% en els ponts de mesura de l'esforç axial (ponts A i B) i del doble en els ponts de mesura de les components del moment flector (ponts C i D).

9.2. Validació del model teòric mitjançant simulació per elements finits

L'objectiu en aquesta secció és validar si les consideracions exposades a l'Apartat 9.1.2 són adequades per al model desenvolupat. Atès que els efectes de la geometria no regular i les desviacions entre les graelles de mesura i els punts utilitzats en el càlcul de les deformacions sí que es valoren en la simulació per elements finits, es vol comprovar si les consideracions per al desenvolupament de les equacions del model teòric afecten significativament a l'estimació de les components de força.

Per fer-ho, es realitzen un conjunt de simulacions per elements finits amb els models dels enganxalls desenvolupats a l'Apartat 8.3.2, per obtenir les deformacions de cada graella de mesura en diferents casos de força aplicada a l'enganxall dinamomètric i comprovar el correcte comportament del model teòric.

9.2.1. Procediment per a la validació del model teòric mitjançant simulació

El procediment per a l'anàlisi es mostra a la Figura 9.6 on es representa un diagrama de blocs de la seqüència utilitzada en la comprovació. En aquest diagrama, a partir d'un enganxall dinamomètric i d'un estat de càrrega concret, definit pels valors de F_x , F_y i F_z al punt d'unió de l'enganxall, s'executa la simulació per elements finits per determinar les deformacions unitàries que hi hauria en cada una de les graelles de mesura. Amb aquestes dades de deformació es calculen els senyals que mesurarien els ponts de galgues, i amb aquests valors, mitjançant les equacions del model teòric, es calculen les forces que es mesurarien amb l'enganxall dinamomètric. Per validar el model teòric, es comparen les components de força obtingudes amb les equacions teòriques amb les que s'han aplicat al model per a la simulació, per tal d'identificar les desviacions més significatives.

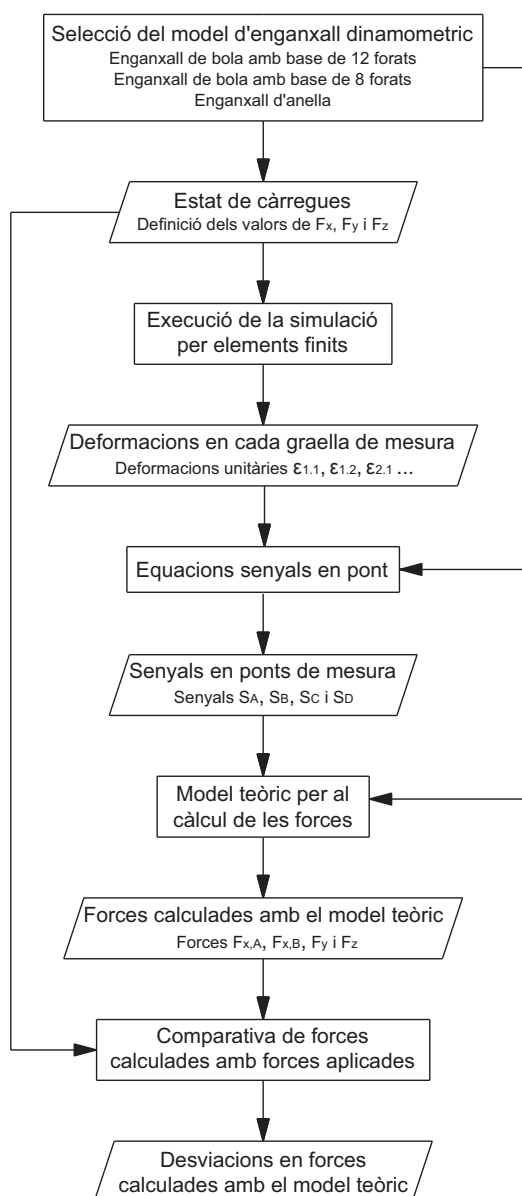


Figura 9.6: Seqüència per a la validació del model dels enganxalls dinamomètrics mitjançant simulació per elements finits

9.2.2. Definició del model i simulacions realitzades

Els models per a la realització de les simulacions per elements finits són els mateixos que s'han desenvolupat a l'Apartat 8.3.2, on s'analitza els valors de deformació estimats en la llança dels enganxalls. Les característiques de la simulació són iguals als dels models exposats, amb l'única diferència que s'han definit les mesures de deformació unitària en els punts i direccions corresponents a cada una de les graelles de mesura, de manera que coincideixin amb el posicionament final de les galgues extensomètriques en els enganxalls dinamomètrics exposats a l'Apartat 8.4.2.

S'han realitzat simulacions per a totes les combinacions possibles a força màxima o nul·la en cada component. Així, s'han realitzat combinacions amb component longitudinal de 100 kN tant a tracció com a compressió, component transversal de 25 kN en les dues direccions i component vertical de 50 kN, aquesta només en sentit

cap amunt. Amb totes les combinacions possibles s'ha realitzat un total de 17 simulacions per a cada enganxall dinamomètric.

9.2.3. Valors de deformació obtinguts en les simulacions

Abans de comparar els resultats de les forces aplicades en la simulació per elements finits i les corresponents mesures estimades amb els valors de deformació, es convenient analitzar primerament els valors obtinguts en la deformació unitària mesurada per cada graella de mesura.

Es comprova, un cop realitzats tots els casos de simulació, que existeix superposició d'efectes en els valors obtinguts de deformació unitària provocades per les components de força. L'única diferència significativa es troba en les deformacions amb força longitudinal, on els valors amb força positiva (tracció) i amb força negativa (compressió) són lleugerament diferents. Per al cas de la component transversal de força aquest efecte no succeeix.

A la Taula 9.3 es mostren per a cada enganxall dinamomètric i per les tres simulacions amb el valor màxim de les tres components de força a mesurar, els valors de deformació unitària en cada graella de mesura.

Taula 9.3: Deformacions unitàries corresponents a les graelles de mesura obtingudes en les simulacions per elements finits en cada un dels enganxalls dinamomètrics i per al valor màxim de les tres components de força a mesurar (Deformacions en $\mu\text{m/m}$)

Graella de mesura	Eng. din. de bola amb base de 12 forats			Eng. din. de bola amb base de 8 forats			Eng. din. d'anella		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
	100 kN	25 kN	50 kN	100 kN	25 kN	50 kN	100 kN	25 kN	50 kN
P _{1,1}	24,13	3,82	-689,01	9,85	-0,04	-617,77	128,05	-0,05	-737,31
P _{1,2}	24,43	46,07	-688,78	-23,09	0,19	183,67	-54,14	0,02	231,40
P _{2,1}	331,15	3,39	704,89	344,12	0,09	643,57	263,10	-0,05	731,06
P _{2,2}	330,47	-33,70	704,93	-107,81	0,13	-192,76	-91,67	0,03	-230,36
P _{3,1}	171,65	-395,50	0,90	175,96	-369,08	-5,17	173,31	-380,35	-4,94
P _{3,2}	160,78	-397,52	-45,22	-50,67	92,55	9,42	-69,39	152,21	2,30
P _{4,1}	177,80	395,31	0,82	175,87	368,80	-5,13	173,00	380,60	-4,88
P _{4,2}	188,44	393,93	46,67	-50,51	-92,52	9,41	-69,18	-152,35	2,28
P _{5,1}				21,70	20,08	-617,96	110,60	18,62	-684,21
P _{5,2}				21,69	-20,32	-618,38	110,70	-18,73	-684,20
P _{6,1}				265,76	16,71	613,37	225,42	19,17	688,00
P _{6,2}				265,78	-17,15	613,36	225,06	-19,02	687,96
P _{7,1}				162,92	-419,67	35,86	166,27	-418,65	14,36
P _{7,2}				154,40	-420,44	1,39	162,25	-418,24	-31,98
P _{8,1}				162,80	419,87	35,85	165,66	418,54	14,26
P _{8,2}				154,28	420,63	1,33	161,47	418,33	-32,23

Com ja s'ha identificat en l'estudi inicial de les deformacions en la llança de l'enganxall (Apartat 8.3), es comprova que els valors de deformació per a la component longitudinal són significativament inferiors als provocats per les components transversal i vertical.

Si s'analitzen les mesures de les graelles transversals, en els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i l'enganxall d'anella, es comprova que la relació entre la deformació transversal i la longitudinal no correspon exactament al coeficient de Poisson. Aquest efecte es pot atribuir a dos factors. L'un és que el desplaçament de 4,5 mm entre les graelles de mesura longitudinal i transversal provoca part d'aquesta desviació. L'altre és que, tot i ser molt petites, també apareixen tensions en la direcció transversal de mesura, i que la consideració de reduir l'estudi de tensions i deformacions només a la direcció longitudinal a cada punt de mesura no és del tot adequada. Tot i això, els casos on les desviacions són majors són els casos on la deformació tant longitudinal com transversal és petita, i per tant, no afecten significativament en la mesura.

9.2.4. Resultats de força mesurada a partir de les dades de les simulacions

En aquest apartat es presenten els resultats per a la validació del model teòric mitjançant les dades obtingudes en els estudis per elements finits. A la Taula 9.4 es mostren els resultats de senyal del pont i de força calculada a partir de les dades de simulació per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats. S'exposen en aquesta taula tots els casos analitzats en simulació. A la Taula 9.5 es mostren els resultats per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats i a la Taula 9.6 es mostren els resultats per a l'enganxall dinamomètric d'anella.

Taula 9.4: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats

Força aplicada en simulació (kN)			Senyals estimats en ponts de mesura mitjançant simulació ($\mu\text{V/V}$)				Força estimada segons el model teòric mitjançant simulació (kN)			
F_x	F_y	F_z	S_A	S_B	S_C	S_D	$F_{x,A}$	$F_{x,B}$	F_y	F_z
-100	0	0	-180,42	-179,82	157,06	2,93	-98,59	-98,26	-0,17	-0,29
-100	-25	0	-186,89	-178,01	156,83	408,34	-102,12	-97,27	-23,21	0,12
-100	-25	50	-178,58	-177,29	-557,61	408,40	-97,58	-96,88	-23,21	50,90
-100	25	0	-174,11	-181,62	157,24	-402,40	-95,14	-99,24	22,87	-0,68
-100	25	50	-165,80	-180,87	-557,18	-402,37	-90,60	-98,83	22,87	50,09
-100	0	50	-172,10	-179,10	-557,37	2,97	-94,04	-97,87	-0,17	50,49
100	0	0	181,89	178,98	-157,35	3,15	99,39	97,80	0,18	0,22
100	-25	0	175,52	180,72	-157,41	402,36	95,91	98,75	-22,87	0,61
100	-25	50	183,72	181,44	-871,81	402,33	100,39	99,15	-22,87	51,39
100	25	0	188,35	177,05	-156,99	-408,42	102,92	96,75	23,21	-0,20
100	25	50	196,55	177,86	-871,38	-408,46	107,40	97,19	23,22	50,58
100	0	50	190,15	179,80	-871,59	-3,11	103,90	98,25	0,18	50,99
0	-25	0	-6,44	1,77	-0,21	405,40	-3,52	0,97	-23,04	0,41
0	-25	50	1,77	2,50	-714,63	405,44	0,97	1,37	-23,04	51,19
0	25	0	6,34	-1,84	0,22	-405,29	3,47	-1,00	23,03	-0,40
0	25	50	14,65	-1,11	-714,20	-405,35	8,00	-0,60	23,04	50,37
0	0	50	8,28	0,74	-714,37	0,04	4,52	0,40	0,00	50,78

Referent als senyals, s'observa que en els ponts A i B s'obtenen mesures de deformacions pràcticament idèntiques, com és d'esperar. El pont C, per a mesura de la component vertical, és el pont on s'obtenen els senyals més grans, seguit després pels senyals del pont D.

En l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats es comprova que en la mesura de la component $F_{x,A}$ hi ha canvis significatius depenent del cas analitzat, que en alguns casos arriben al 10% (cas de F_x negativa, F_y positiva i F_z). Si s'analitzen els casos amb una única component de força aplicada, s'observa que l'error en la mesura de $F_{x,A}$ és atribuïble més a les components transversal i vertical que no pas a la pròpia component longitudinal. Per exemple, en el cas de F_y positiva i F_z , es mesuren 8 kN per a la component longitudinal, quan aquesta hauria de ser zero. Aquest efecte posa de manifest que apareix sensibilitat creuada. També s'observa que, comparant la mesura de la component longitudinal per al cas d'aplicació de força longitudinal positiva i negativa s'obtenen valors diferents, amb un comportament diferenciat a tracció i a compressió.

Per a la component $F_{x,B}$, els errors són inferiors al cas de $F_{x,A}$ i en aquest cas no s'identifiquen sensibilitats creuades importants, però sí disminucions del voltant del 3% aproximadament en la mesura de la pròpia component longitudinal. Per a la component transversal F_y es detecta també una lleu disminució de 2 kN aproximadament en tots els casos, corresponent a un 8% d'error. Aquest error pot ser atribuïble als desajustos en la distribució de les tensions al llarg de la llança, donada la forma no regular. Per a la component F_z , en general s'obté una mesura pròxima al valor de la simulació, inclús lleugerament superior, sense sobrepassar el 3% d'error.

Taula 9.5: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats

Força aplicada en simulació (kN)			Senyals estimats en ponts de mesura mitjançant simulació ($\mu V/V$)				Força estimada segons el model teòric mitjançant simulació (kN)			
F_x	F_y	F_z	S_A	S_B	S_C	S_D	$F_{x,A}$	$F_{x,B}$	F_y	F_z
-100	0	0	-237,50	-225,93	-251,17	-0,03	-105,97	-100,81	0,00	1,10
-100	-25	0	-237,63	-226,06	-251,11	-866,20	-106,03	-100,87	-23,77	1,11
-100	-25	50	-220,30	-240,53	1017,17	-865,53	-98,30	-107,33	-23,76	48,03
-100	25	0	-237,62	-226,04	-251,23	865,49	-106,03	-100,86	23,75	1,11
-100	25	50	-220,29	-240,55	1017,09	865,55	-98,29	-107,33	23,76	48,03
-100	0	50	-220,16	-240,39	1017,16	0,03	-98,24	-107,26	0,00	48,02
100	0	0	241,22	225,37	251,40	-0,12	107,63	100,56	0,00	-1,26
100	-25	0	241,13	225,13	251,42	-865,64	107,59	100,45	-23,76	-1,26
100	-25	50	258,44	210,65	1519,65	-865,85	115,32	93,99	-23,76	45,66
100	25	0	241,13	225,08	251,39	865,47	107,59	100,43	23,75	-1,26
100	25	50	258,43	210,62	1519,72	865,45	115,31	93,98	23,75	45,66
100	0	50	258,69	210,86	1519,89	-0,15	115,43	94,09	0,00	45,66
0	-25	0	-0,12	-0,17	0,05	-865,52	-0,05	-0,07	-23,76	0,01
0	-25	50	17,19	-14,69	1268,30	-865,47	7,67	-6,55	-23,75	46,92
0	25	0	-0,14	-0,16	-0,10	865,51	-0,06	-0,07	23,76	0,00
0	25	50	17,16	-14,66	1268,27	865,58	7,66	-6,54	23,76	46,92
0	0	50	17,36	-14,49	1268,47	-0,04	7,74	-6,47	0,00	46,92

Per al cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats, donades les configuracions dels ponts de mesura en aquest cas, es comprova que s'aconsegueix augmentar el senyal en els ponts de mesura respecte al cas anterior. Per als ponts A i B l'augment és aproximadament del 30% i per als ponts C i D ho és del doble.

Referent a les components de força calculades amb el model teòric, per al cas de $F_{x,A}$ s'obtenen en general valors més grans de força que els aplicats a la simulació. Per als casos únicament de component longitudinal de força, l'increment és del 6% a compressió i del 7,6% a tracció. En alguns casos, fins i tot l'increment és del 15%,

donada la sensibilitat creuada provocada per la component vertical de força al pont de mesura A.

Per a la component $F_{x,B}$ els valors s'ajusten més als valors de la component longitudinal de força aplicada a la simulació, però es visualitzen més desviacions que en el cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats. Per als casos amb únicament component longitudinal l'error és reduït, però també es detecta sensibilitat creuada provocada per la component vertical, amb errors que en alguns casos arriben al 7% (cas F_x negativa i F_z).

Per a la component transversal F_y s'obté una disminució de 1,25 kN en l'estimació, corresponent a un 5% d'error en la mesura. Per a la component vertical F_z s'obtenen valors lleugerament inferiors als esperats, amb una disminució del 6% per al cas on només actua aquesta component. En aquesta mesura també s'experimenta sensibilitat creuada provocada per la component longitudinal, amb increments i disminucions del 2,5% segons el sentit d'aquesta.

Taula 9.6: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric d'anella

Força aplicada en simulació (kN)			Senyals estimats en ponts de mesura mitjançant simulació ($\mu V/V$)				Força estimada segons el model teòric mitjançant simulació (kN)			
F_x	F_y	F_z	S_A	S_B	S_C	S_D	$F_{x,A}$	$F_{x,B}$	F_y	F_z
-100	0	0	-264,61	-243,38	-117,40	0,50	-108,51	-99,81	0,01	0,49
-100	-25	0	-264,72	-243,12	-117,36	-861,57	-108,56	-99,70	-23,85	0,50
-100	-25	50	-268,29	-250,46	1296,50	-862,02	-110,02	-102,71	-23,86	51,22
-100	25	0	-264,71	-243,06	-117,24	862,75	-108,55	-99,68	23,88	0,50
-100	25	50	-268,34	-250,19	1296,37	862,49	-110,04	-102,60	23,88	51,22
-100	0	50	-268,23	-250,52	1296,16	0,18	-110,00	-102,74	0,00	51,21
100	0	0	267,14	241,23	118,03	-0,71	109,55	98,92	-0,02	-0,52
100	-25	0	266,98	241,18	118,00	-862,65	109,49	98,90	-23,88	-0,51
100	-25	50	263,19	234,03	1531,89	-862,98	107,93	95,97	-23,89	50,22
100	25	0	266,98	241,20	118,02	861,69	109,49	98,91	23,86	-0,51
100	25	50	263,24	234,33	1532,24	861,60	107,95	96,10	23,85	50,23
100	0	50	263,29	234,03	1531,99	-1,03	107,97	95,97	-0,03	50,22
0	-25	0	-0,09	0,17	-0,19	-862,04	-0,04	0,07	-23,86	-0,01
0	-25	50	-3,77	-7,05	1413,32	-862,29	-1,55	-2,89	-23,87	50,71
0	25	0	-0,07	0,19	0,14	861,98	-0,03	0,08	23,86	0,01
0	25	50	-3,75	-6,91	1413,65	862,03	-1,54	-2,84	23,86	50,72
0	0	50	-3,63	-7,16	1413,35	-0,18	-1,49	-2,94	-0,01	50,71

Per a l'enganxall dinamomètric d'anella, per a les mesures de $F_{x,A}$ i $F_{x,B}$, s'observen les mateixes desviacions que en el cas del de bola amb base de 8 forats, però aquestes són en general menors. En concret, per a la mesura de $F_{x,A}$ a compressió apareix un error del 8,5% mentre que a tracció és del 10%. També apareix una lleu sensibilitat creuada provocada per la component vertical de força de l'1,5%. Per a la mesura de $F_{x,B}$ l'error més important és deu a la sensibilitat creuada provocada per la component vertical de força, amb una disminució del 3%.

Per a la mesura de F_y s'obtenen valors lleugerament inferiors als esperats amb disminucions del 4,5%. Per a la mesura de F_z apareix un error de l'1,5% en la pròpia mesura de la component i un 1% atribuïble a la sensibilitat creuada provocada per la component longitudinal de força.

9.2.5. Conclusions en la validació del model teòric mitjançant simulació per elements finits

En la validació de les equacions per al càlcul de les components de força en els enganxalls dinamomètrics mitjançant simulació s'han detectat alguns aspectes que condicionen la correcta mesura.

Els errors observats en la mesura de la component longitudinal de força mitjançant el pont A poden ser atribuïts en bona part a la inclinació de les cares de la llança de l'enganxall on es realitzen les mesures de deformació. Per al cas de la component longitudinal mesurada a partir del pont B, on les dues cares laterals són paral·leles, les desviacions són considerablement més petites que les del pont A. També, en els enganxalls dinamomètrics d'anella i bola amb base de 8 forats, els errors en el pont A són lleugerament superiors al de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats, que utilitza la configuració en pont diagonal, i és un indicatiu de que els ponts de mesura complets amb les graelles de mesura transversals poden no comportar-se segons l'esperat. La consideració admesa per a les graelles transversals, on no es té en compte el desplaçament d'aquestes graelles respecte al punt de mesura de les graelles longitudinals, i la consideració de reduir l'anàlisi de tensions i deformacions en la direcció longitudinal poden no ser suficientment vàlides. Això s'observa amb els valors de deformació unitària a cada graella obtinguts en la simulació, on es comprova que la relació entre la deformació transversal i la longitudinal no correspon exactament al valor del coeficient de Poisson.

Per a la mesura de la component transversal F_y es detecta una lleu disminució respecte a la mesura esperada, on el cas més significatiu és el de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats. Per a la component vertical F_z , les desviacions en la mesura són en general reduïdes, on les més grans apareixen en el cas de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats.

En aquesta validació mitjançant simulacions per elements finits també s'han identificat casos on apareix sensibilitat creuada. En els ponts de mesura A i B hi apareix un senyal provocat per la component vertical de força. També la mesura de la component vertical es veu afectada per la component longitudinal de força. En la mesura de la component transversal F_y no apareixen sensibilitats creuades significatives.

Si s'admet que en els ponts de mesura amb galgues extensomètriques els errors poden arribar al 10% degut a factors com l'enganxat de les galgues, les dimensions de referència en el càlcul o les característiques del material, el model desenvolupat es dona com a vàlid, tot i les consideracions admeses en el desenvolupament del model teòric. Tot i la validació mitjançant simulació, és convenient analitzar el comportament real dels ponts per a la mesura de les components de força aplicades al punt d'unió de l'enganxall. Per això, en els Capítols 10 i 11 es realitzen assajos experimentals d'aplicació de força en els enganxalls dinamomètrics per validar-ne el correcte funcionament i ajustar-ne els models per a la mesura de la força al punt d'unió.