



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.

## **2. ESTAT DE L'ART EN EQUIPS PER A LA MESURA DE FORCES EN TRACTORS I ORMEJOS AGRÍCOLES**

En aquest estat de l'art es realitza una revisió de les tecnologies i dels equips dinamomètrics per a la mesura de les forces entre tractors i ormejos agrícoles i dels diferents estudis que es poden realitzar. Primerament, es fa una revisió dels diversos elements utilitzats en la mesura d'esforços. A continuació es descriuen els diferents equips i mètodes per a la mesura d'esforços en aplicacions agrícoles, ja sigui en l'enganxall de tres punts del tractor, en l'enganxall d'un punt o en l'eina de treball del sòl. En aquest apartat s'analitzen en detall els aspectes del disseny i de la construcció d'aquests dinamòmetres, així com els avantatges i els inconvenients de cada tipus. Per últim, s'exposen les aplicacions dels dinamòmetres per a diferents tipus d'assajos en camp i es descriu l'equipament complementari utilitzat.

### **2.1. Elements utilitzats en el desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles**

Els elements de mesura utilitzats en els equips per a la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles es poden distingir en dos grans grups. L'un correspon a tots aquells elements basats en la utilització de galgues extensomètriques, que corresponen a equips de mesura de forces de fabricació pròpia desenvolupats per diferents investigadors. L'altre grup correspon als equips dinamomètrics que utilitzen cèl·lules de càrrega comercials com a elements de mesura de forces.

#### **2.1.1. Galgues extensomètriques en la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles**

Una galga extensomètrica és un sensor que mesura la deformació unitària en el punt i en la direcció en que està instal·lada sobre un element estructural. En aquests sensors el canvi de resistència elèctrica és proporcional a la deformació i mitjançant l'equip d'adquisició adequat es mesura aquest canvi. Normalment les galgues es connecten entre si formant ponts de mesura, per tal d'incrementar la resolució en la mesura i obtenir senyals que són proporcionals a un esforç axial o a un moment flector que suporta l'element.

L'ús de galgues extensomètriques instal·lades directament sobre l'element estructural que suporta l'esforç és poc habitual en el desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles. Tot i això es poden trobar exemples en la bibliografia que utilitzen aquest mètode, com són els casos de Upadyaya et al. [1] i de Khan et al. [2], que instal·len ponts de galgues sobre barres del mecanisme d'enganxall de tres punts.

Normalment es dissenyen elements o blocs mecanitzats de diverses formes per mesurar components de força o moment mitjançant ponts de mesura amb galgues extensomètriques, i que formen part d'un equip dinamomètric. El que es busca amb

aquests dissenys és també augmentar la deformació unitària en les galgues per tal d'obtenir un senyal més nítid i minimitzar l'error en la mesura.

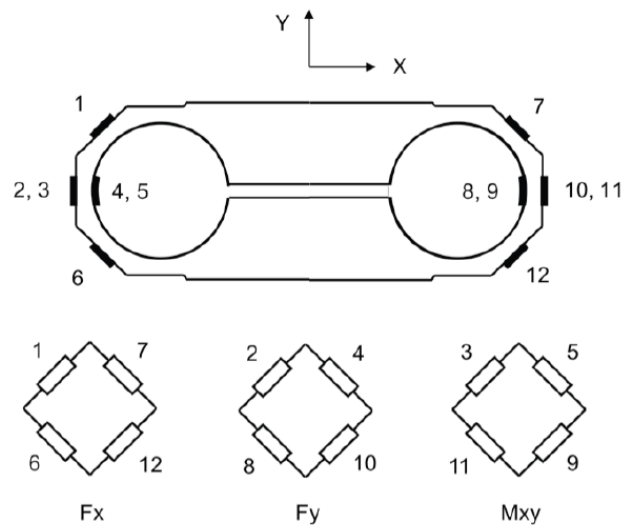
Un dels dissenys més senzills consisteix en utilitzar platines i instal·lar-hi galgues per tal de determinar els esforços a que estan sotmeses. Dissenys com el de Reid et al. [3], amb platina rectangular, o com el de Bowers [4], amb una platina en forma de U, utilitzen aquesta solució. També es dissenyen elements en forma de bloc i amb altres formes més complexes, com elements en forma de L o de U, on s'hi situen les galgues extensomètriques. Mitjançant diferents ponts de mesura i amb els paràmetres característics de l'element, es determinen les components de força sobre aquest. Exemples d'aquests sistemes són Scholtz [5], que utilitza elements en forma de L, i Al-Jalil et al. [6], que utilitzen elements en forma de U, on mitjançant aquests elements es determinen els valors de les components longitudinal i vertical de força aplicada.

Un altre mètode consisteix en instal·lar galgues sobre la superfície cilíndrica d'un element en forma de boló, i que està sotmès a càrregues a flexió. Un exemple d'aquest mètode correspon a Alimardani et al. [7], que amb un conjunt de galgues mesuren la flexió en els bolons en les dues components de força radial.

Un disseny singular és un plat de mesura desenvolupat per O'Dogherty [8], que consisteix en un equip de mesura en tres direccions, format per una part central i un marc que es connecten per quatre elements en forma de biga curta. Sobre aquests elements s'hi instal·len els ponts de galgues extensomètriques per aconseguir les mesures desitjades. Altres casos són els de Johnson i Voorhees [9] o Garner et al. [10], que instal·len els ponts de galgues en un tub que compleix una funció estructural en un dinamòmetre dissenyat per ser instal·lat entre el tractor i l'ormeig.

### Anells octagonals eixamplats

Els anells octagonals eixamplats (Extended Octagonal Rings, EOR) són elements especialment dissenyats per mesurar diferents components de força i moment. Aquests dispositius es dissenyen generalment per mesurar dos components de força i la component de moment perpendicular a aquestes (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Esquema d'un EOR. Disposa de 3 punts de mesura amb galgues extensomètriques per determinar dues components de força i una component de moment [11]

El gran avantatge d'aquests dissenys és que es poden ajustar els gruixos i la llargada de l'element per a ajustar-se als valors màxims de mesura per a cada una de les components de força i moment. En general, el que es busca en un EOR és augmentar la resistència a flexió del conjunt sense reduir excessivament la deformació provocada per les dues components de força. Un dels inconvenients és que el posicionament de les galgues i la determinació de les components de força a partir dels senyals del pont requereix d'un tractament matemàtic important. Tot i això, el fet de que aquests elements es puguin dissenyar per tal d'ajustar-se segons els requeriments fa que s'utilitzin enormement en el desenvolupament d'equips per a la mesura de forces i moments.

Exemples d'aplicació dels EOR són molt nombrosos i recurrents en els dissenys tant en equips de mesura de construcció complexa com en la utilització d'aquests elements de forma individualitzada. O'Dogherty [12] desenvolupa un equip per a la mesura de les components longitudinal i vertical de la força que rep una cisalla per tallar les fulles de remolatxes sucreres. Khan et al. [13] dissenyen un EOR per a la mesura de les forces entre el tractor i l'ormeig, i realitzen nombrosos estudis del comportament d'aquest. Abbaspour et al. [14] dissenyen tres EOR per a la mesura de les forces entre tractors i ormejos, realitzen un estudi d'optimització de la geometria d'aquests per elements finits i determinen també les posicions de cada una de les galgues per evitar sensibilitats creuades entre els diferents ponts de mesura. Finalment, realitzen un calibratge de cada un dels elements, on obtenen una bona linealitat i una sensibilitat creuada pràcticament negligible. Godwin [15] desenvolupa també un EOR concebut per a ser utilitzat en eines de llaurar per determinar la força sobre el terra. Pitla et al. [16] utilitzen un sistema similar però per un disc de llaurar. Chen et al. [17] utilitzen un dinamòmetre per a ormejos remolcats amb dos EOR muntats en paral·lel. Al-Janobi i Al-Suhaibani [18] instal·len aquests elements a les barres inferiors d'un enganxall de tres punts per a la mesura de les components longitudinal i vertical de força. Per últim, Kheiralla et al. [19] utilitzen 3 EOR per al disseny d'un dinamòmetre tripuntal.

Goldwin et al. [20] desenvolupen un equip basat en un doble EOR, anomenat "double extended octagonal ring" (DEOR), que consisteix en dos EOR units i girats 90° l'un respecte l'altre. Amb aquesta disposició s'aconsegueix mesurar les tres components de la força i dos components del moment. Un muntatge similar és el desenvolupat per Nalavade et al. [21] per a realitzar assajos en laboratori amb discos de llaurar. Mitjançant simulació per elements finits s'identifiquen els millors punts del DEOR per instal·lar les diferents galgues i evitar sensibilitats creuades. Durant el procés de calibratge s'identifica que el comportament del DEOR és considerablement diferent segons l'estructura de suport en que es munta, la qual cosa posa de manifest la importància de calibrar tot el conjunt i no l'element de mesura de força individualment. Per últim, McLaughlin [22] desenvolupa i amplia les equacions plantejades per altres autors per al càlcul de les components de força i moment en EOR. McLaughlin et al. [11] també estudien l'efecte dels punts de fixació del EOR a l'estructura. La conclusió és que hi poden haver reduccions importants en el senyal si els punts de fixació es troben molt distanciats del centre de l'EOR. Per aquest motiu, l'autor recomana un calibratge de tot l'equip de mesura i no un calibratge individual de l'EOR.

### **2.1.2. Cèl·lules de càrrega en la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles**

Les cèl·lules de càrrega comercials també són molt utilitzades, ja sigui per mesurar directament una component de força com per instal·lar-les en un equip més complex per a la mesura de múltiples components. Les cèl·lules de càrrega aporten més avantatges que els dissenys fets artesanalment utilitzant galgues extensomètriques. Les tècniques automatitzades de fabricació de cèl·lules de càrrega eviten els defectes provocats durant la instal·lació de les galgues, per tal de garantir que la mesura d'aquests equips sigui més precisa. A més, a part de la utilització de 4 galgues extensomètriques disposades en pont complet per a la mesura de la força, s'hi afegeixen un conjunt d'elements al circuit per al balanç i la compensació d'efectes indesitjats per millorar la qualitat de la mesura.

Existeixen gran varietat de formes de cèl·lules de càrrega depenent dels valors de força màxima a mesurar i de les aplicacions en les que s'han d'utilitzar. A continuació s'exposen els tipus més utilitzats en el disseny d'equips per a la mesura d'esforços en assajos en camp.

Les cèl·lules de càrrega en forma de plat són les més habituals en la utilització d'equips de mesura d'esforços en tractors i ormejos, ja que hi ha una gran varietat de fabricants i capacitats de càrrega. Aquestes es caracteritzen per ser especialment robustes i preparades per a condicions extremes, adequades per al seu ús en el camp. Un exemple d'aplicació d'aquest tipus de cèl·lules de càrrega és el de Chaplin et al. [23], on s'utilitzen cèl·lules de càrrega de plat amb un muntatge amb ròtules als extrems per garantir només la càrrega en la direcció de mesura d'aquestes. Un sistema similar és el de Smith i Barker [24]. Aquestes cèl·lules de càrrega també són molt utilitzades en dissenys on es modifica l'enganxall de tres punts del tractor, com són els casos de McLaughlin et al. [25], Bentaher et al. [26] i Cupera et al. [27]. Turner et al. [28] utilitzen una cèl·lula de càrrega en forma de plat per a la mesura de la component longitudinal de força en ormejos remolcats. En alguns casos també s'utilitzen cèl·lules de càrrega en forma de S en dinamòmetres per a aplicacions agrícoles, com és el cas d'Askari et al. [29] i d'Andrade et al. [30].

Les cèl·lules de càrrega en forma de boló són un altre tipus de cèl·lules de càrrega freqüentment utilitzades. L'avantatge principal de les cèl·lules de càrrega en forma de boló és la seva forma, ja que aquesta permet en molts casos substituir els bolons originals per aquests elements. Principalment, se'n poden distingir dos tipus, les unidireccionals, que mesuren una component de força en una direcció radial, i les bidireccionals, que mesuren les dues components perpendiculars de força radial. L'avantatge d'aquestes últimes és que permeten disposar en un mateix element de la mesura de dos components de força, però tenen l'inconvenient de que experimenten una lleu sensibilitat creuada entre les dos mesures (una càrrega en una direcció provoca un senyal en la mesura de la direcció perpendicular). Thomson i Shinnars [31] utilitzen bolons de mesura unidireccionals per al seu dinamòmetre tripuntal. Collins [32] utilitza per muntar l'ormeig al tractor bolons de mesura bidireccionals. Pang [33] utilitza també bolons de mesura bidireccionals per unir al mecanisme de l'enganxall de tres punts del tractor un sistema d'acoblament ràpid per a ormejos, mentre que Singh i Singh [34] utilitzen bolons de mesura per connectar l'enganxall de tres punts del tractor i l'ormeig per a la mesura de la component longitudinal de força.

## 2.2. Dinamòmetres per a enganxalls de tres punts

En aquest apartat es realitza una revisió dels diferents dinamòmetres per a la mesura d'esforços en enganxalls tripuntals desenvolupats per diferents investigadors. S'analitza en detall els mètodes utilitzats per a la mesura de forces, des de l'ús de galgues extensomètriques fins a cèl·lules de càrrega, així com les components de força o moment que mesuren i els valors màxims d'aquestes. També es detalla el tipus de construcció i la geometria principal del dinamòmetre, així com el procés de validació i calibratge de l'equip.

El desenvolupament dels dinamòmetres per a enganxalls de tres punts per a la realització d'assajos en camp va fortament lligat a l'objectiu d'estudi que es pretén realitzar. Per exemple, en els assajos per a la mesura de la component longitudinal de força o de la potència desenvolupada pel tractor, els dinamòmetres utilitzats mesuren, mitjançant un element o varis, la component longitudinal de la força en l'enllaç, ja que les altres components de força no són necessàries per a l'estudi. En els casos on es busca un estudi més detallat de les forces entre tractor i ormeig, es dissenyen dinamòmetres que permeten la mesura de la gran majoria o de totes les components de força i moment que intervenen en la unió.

Bentaher et al. [26] proposen una classificació dels tipus de dinamòmetres utilitzats per a la mesura d'esforços en enganxalls de tres punts. La classificació consisteix en dos grups, l'un corresponent a equips que s'instal·len entre el tractor i l'ormeig i l'altre corresponent als dinamòmetres basats en instal·lar al propi enganxall de tres punts del tractor els elements de mesura de forces. En aquesta tesi es proposa també una classificació similar, però dividint els diferents tipus de dinamòmetres que s'instal·len entre tractor i ormeig segons la seva construcció entre dinamòmetres amb un marc i amb doble marc.

### 2.2.1. Dinamòmetres amb un marc

Els dinamòmetres amb un marc consisteixen en un marc preparat per muntar-lo a l'enganxall de tres punts del tractor, i on s'instal·len els elements per a la mesura d'esforços i que disposen dels corresponents ancoratges per muntar-hi l'ormeig. Aquest tipus de dinamòmetres es basen en dissenys constructius senzills i pensats per a ser utilitzats en tractors i ormejos de dimensions reduïdes.

Scholtz [5] desenvolupa un dinamòmetre en forma de U invertida que permet la mesura de les components longitudinal i vertical de força als punts d'unió de l'enganxall (Figura 2.2). Els elements de mesura, on s'hi han instal·lat galgues extensomètriques, estan fixats a l'estructura del dinamòmetre i permeten acoblar-hi l'ormeig. Per a la mesura de la força als enganxalls inferiors s'utilitza un element en forma de L on s'hi instal·len dos punts complets de mesura amb galgues extensomètriques, que permeten mesurar la component longitudinal i vertical de la força a cada un dels punts inferiors. A la part superior s'utilitza un element en forma de U que permet mesurar la component longitudinal de la força en aquest punt. Cal destacar que durant el procés de calibratge apareix sensibilitat creuada, de forma que quan s'aplica una força en una direcció, el pont que mesura en la direcció transversal experimenta un lleu senyal.

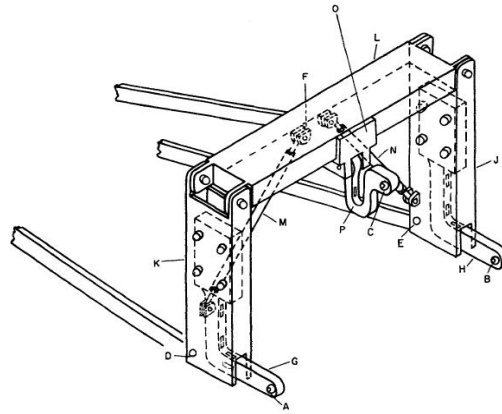


Figura 2.2: Dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Scholtz [5]

Reid et al. [3] desenvolupen un dinamòmetre dissenyat per a tractors de fins a 90 kW, ajustable a diferents amplades i alçades d'ormejos i construït per determinar la component longitudinal de la força en l'enllaç (Figura 2.3). Els ancoratges d'unió a l'ormeig són unes platines rectangulars on s'hi han instal·lat galgues extensomètriques. Aquestes estan muntades a l'estructura principal del dinamòmetre de tal forma que amb una força longitudinal aquests elements estan sotmesos a flexió. Les galgues extensomètriques estan connectades de tal forma que permeten obtenir la component longitudinal de la força a l'enllaç, a la vegada que es cancel·len els efectes de les altres components de força i moment.

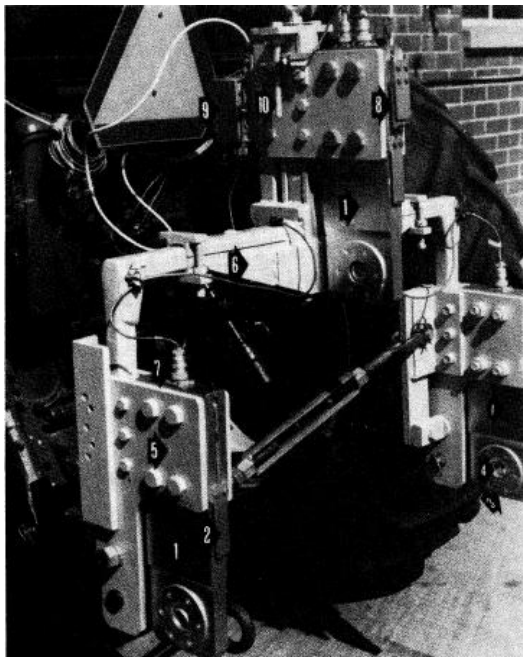


Figura 2.3: Dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Reid et al. [3]

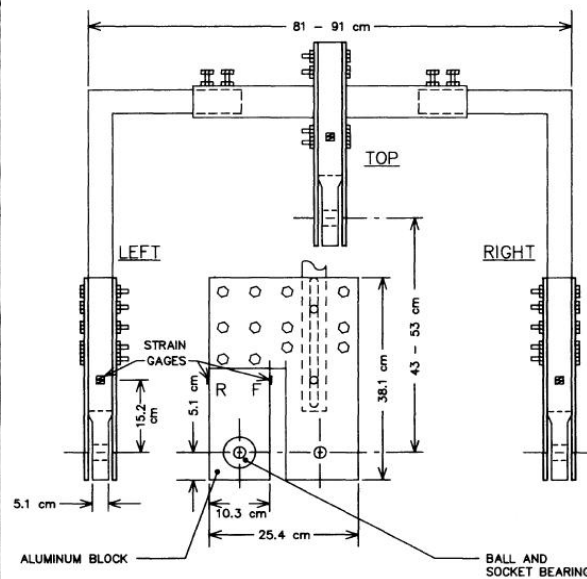


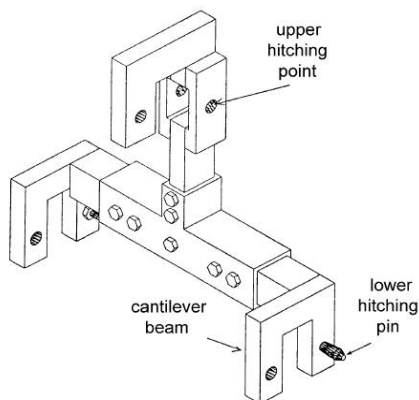
Figura 2.4: Esquema del dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Bowers et al. [4]

Bowers [4] desenvolupa un dinamòmetre per a enganxalls tripuntals per a l'estudi dels requeriments de potència en el procés de llaurat en diferents condicions d'operació. Aquest dinamòmetre consisteix en una estructura de tubs rectangulars en forma de U invertida, i que permet ajustar l'amplada i l'alçada per adaptar-se a diferents ormejos (Figura 2.4). Els elements de mesura són unes platines d'alumini en forma de U les quals un costat es fixa a l'estructura i a l'altre s'hi insereix el boló corresponent per fixar l'ormeig. Amb un total de 12 galgues a tot el dinamòmetre (4 a cada element de

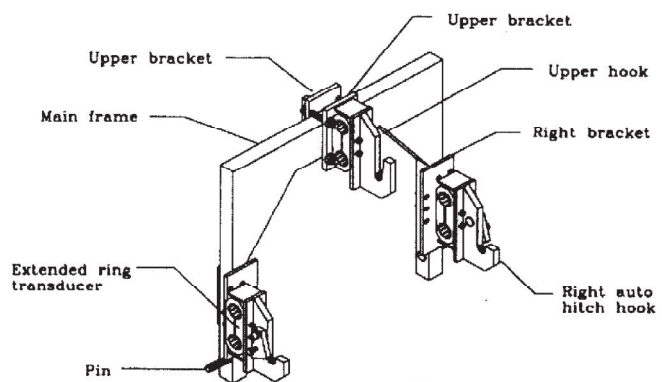
mesura), es munta una configuració en pont complet que permet obtenir el valor de la component longitudinal de força en l'enllaç i compensar els efectes de les altres components de força i moment.

Al-Jalil et al. [6] desenvolupen un dinamòmetre per a la mesura de la component longitudinal de força en l'enllaç, amb una capacitat màxima de 35 kN en aquesta direcció, per determinar els requeriments de força longitudinal en diferents condicions de velocitat i profunditat de treball d'un cultivador (Figura 2.5). El disseny s'ha realitzat de tal forma que sigui ajustable tant en amplada com en alçada per adaptar-se a les dimensions de diferents ormejos. Per a la mesura de les forces s'han instal·lat 3 elements en forma de U invertida fixats sobre l'estructura del dinamòmetre. A cada un d'aquests elements s'hi instal·len dos galgues extensomètriques i es connecten de tal forma que només es mesura la component de la força longitudinal en l'enllaç.

Kheiralla et al. [19] desenvolupen un dinamòmetre que mesura les components longitudinal i vertical de força en cada un dels tres punts de l'enganxall tripuntal (Figura 2.6). El dinamòmetre té una estructura en forma de U invertida que es fixa a l'enganxall del tractor i disposa de tres EOR a cada un dels ancoratges per acoblar-hi l'ormeig. Cada EOR permet mesurar 25 kN de component longitudinal de força i 10 kN de component vertical de força. Els autors realitzen un estudi exhaustiu del disseny dels EOR tenint en compte la posició de cada galga i les configuracions en pont de mesura per tal d'obtenir una mesura que elimini l'efecte de la sensibilitat creuada.



**Figura 2.5: Esquema del dinamòmetre desenvolupat per Al-Jalil et al. [6]**



**Figura 2.6: Esquema del dinamòmetre desenvolupat per Kheiralla et al. [19]**

Alimardani et al. [7] desenvolupen un dinamòmetre per a tractors de fins a 50 kW, format per una estructura principal en forma de U invertida i amb una massa total de 49 kg (Figura 2.7). Disposa d'uns bolons en voladís muntats a l'estructura del dinamòmetre i que serveixen per a fixar-hi l'ormeig, de forma que aquests estan sotmesos a flexió. A cadascun dels bolons inferiors s'hi ha instal·lat un total de 8 galgues formant 2 ponts de mesura, i en el boló superior 4 galgues formant un pont de mesura. Amb aquesta configuració es poden determinar les components longitudinal i vertical de força en els bolons inferiors i la component longitudinal de força en el boló superior.

Pang [33] adapta un enganxall ràpid (marc que s'instal·la a l'enganxall de tres punts del tractor per facilitar l'acoblament dels ormejos) per transformar-lo en un dinamòmetre per a enganxalls de tres punts (Figura 2.8). Per a aquesta adaptació s'instal·len tres cèl·lules de càrrega en forma de boló als punts d'unió de l'enganxall ràpid amb



l'enganxall de tres punts del tractor. Amb aquest sistema s'evita modificar els elements de l'enganxall del tractor i haver de dissenyar expressament el marc del dinamòmetre. Amb aquest mètode l'única modificació consisteix en canviar les ròtules de connexió de l'enganxall de tres punts del tractor per a que es puguin muntar els bolons de mesura. Aquests bolons de mesura són bidireccionals, amb una capacitat de 33 kN en cada direcció. Per al calibratge del sistema de mesura s'utilitza una bancada d'assajos, on s'hi fixa el tractor i s'apliquen forces sobre el dinamòmetre amb un cilindre hidràulic amb una cèl·lula de càrrega per a la mesura de la força aplicada. Davant la impossibilitat d'aplicar força en la direcció vertical, s'ha realitzat un assaig de força en direcció horitzontal i un assaig de força en direcció diagonal per a cada un dels punts d'unió de l'enganxall.



Figura 2.7: Dinamòmetre tripuntal d'Alimardani et al. [7]

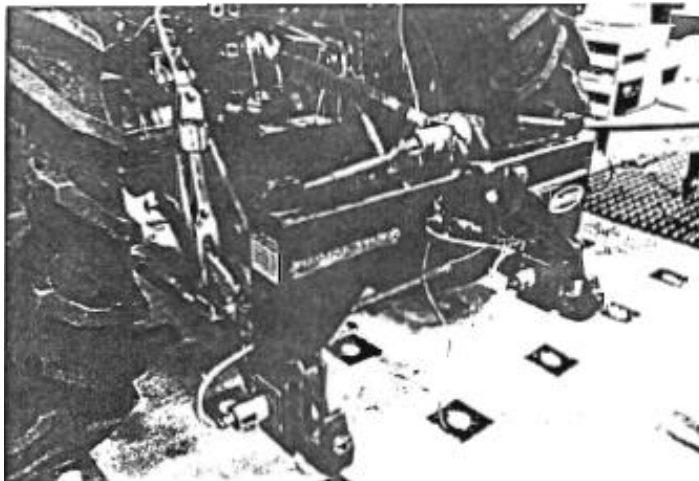


Figura 2.8: Dinamòmetre desenvolupat per Pang [33]

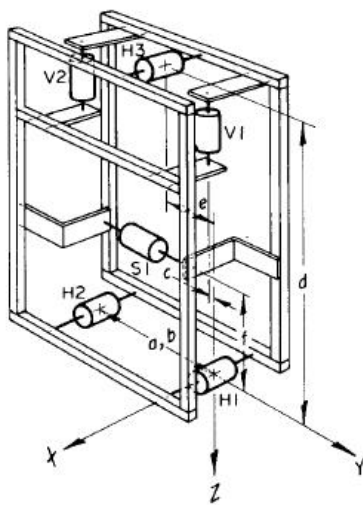
### 2.2.2. Dinamòmetres amb doble marc

Un altre tipus de dinamòmetre per a enganxalls tripuntals consisteix en dos marcs units per cèl·lules de càrrega que mesuren les forces entre ells, i cada un d'ells disposa dels corresponents ancoratges per unir-lo a l'enganxall del tractor i de l'ormeig. El principal avantatge d'aquest tipus de dinamòmetres és que permet utilitzar un nombre elevat de cèl·lules de càrrega, i per tant, obtenir més informació sobre l'estat de càrregues entre el tractor i l'ormeig, sent però, més voluminosos i pesats que no pas els dinamòmetres d'un marc.

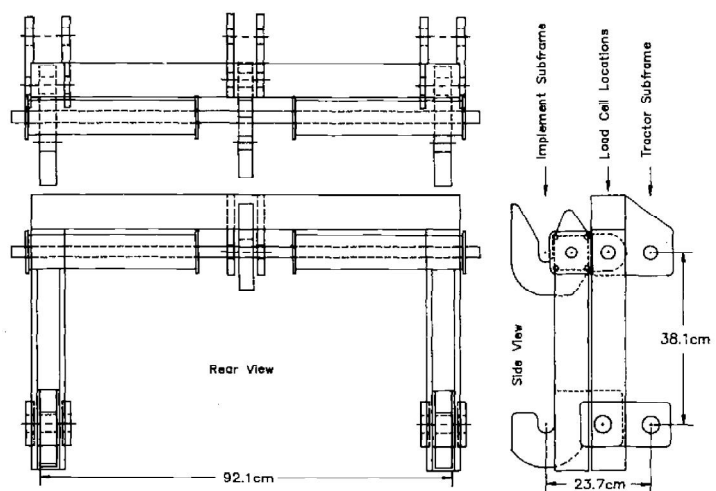
Chaplin et al. [23] desenvolupen un dinamòmetre de dos marcs amb 6 cèl·lules de càrrega, de les quals tres estan orientades per a la mesura en la direcció longitudinal, dos en la direcció vertical i l'altra en la direcció transversal (Figura 2.9). Cada una d'elles es connecta als dos marcs mitjançant un sistema amb ròtules per tal de garantir que cada cèl·lula de càrrega només rep força en la direcció de mesura. El fet d'utilitzar un total de 6 mesures de força independents permet, mitjançant una anàlisi d'estàtica, determinar completament l'estat de càrregues entre el tractor i l'ormeig. En concret, es determinen les components longitudinal, vertical i transversal de la força i les components de capcineig, balanceig i guinyada del moment. En el procés de validació i calibratge es comprova que els errors no superen el 5% dels valors en fons d'escala de les components de mesura, però es detecta que apareixen canvis del senyal a càrrega nul·la

després de deixar d'aplicar la força, atribuïbles, segons els autors, als desajustos a l'alineament de les cèl·lules de càrrega i la fricció en les ròtules.

Thomson i Shinnars [31] desenvolupen un dinamòmetre que està format per dos marcs en forma de U invertida, on s'utilitzen cèl·lules de càrrega en forma de boló que permeten la mesura de les dues components de força radial. Aquests bolons mesuren les components longitudinal i vertical de força en punts pròxims a cada un dels tres punts d'acoblament de l'enganxall (Figura 2.10). El procés de calibratge s'ha realitzat mitjançant l'aplicació de forces en els punts d'unió del dinamòmetre a l'ormeig, amb assajos per a cada una de les components de mesura de les cèl·lules de càrrega. En aquest procés es comprova que els errors màxims es troben al voltant del 5% del fons d'escala dels bolons de mesura, i s'observa també sensibilitat creuada atribuïble als desajustos en el muntatge.



**Figura 2.9:** Esquema del dinamòmetre de Chaplin et al. [23]

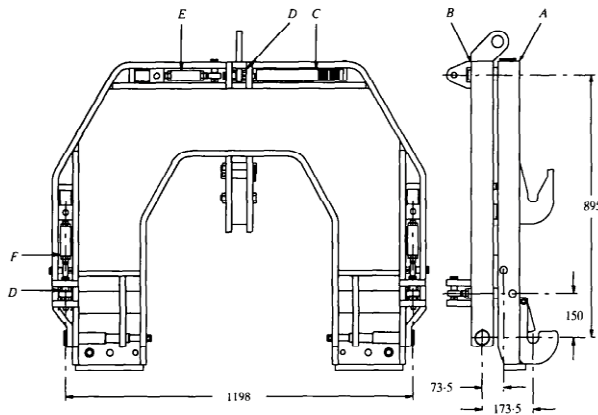


**Figura 2.10:** Dinamòmetre de Thomson i Shinnars [31]

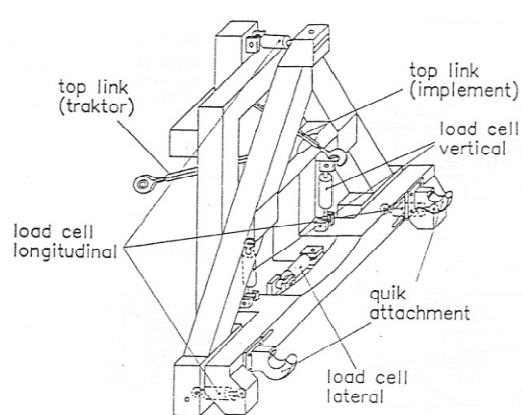
Smith i Barker [24] construeixen un senzill dinamòmetre de doble marc amb 6 cèl·lules de càrrega. El dinamòmetre està format per dos marcs de forma triangular, on s'hi instal·len les cèl·lules de càrrega entremig mitjançant un sistema de ròtules per garantir que aquestes reben la càrrega en la direcció de mesura. Tres cèl·lules de càrrega estan situades als vèrtexs del triangle i mesuren en la direcció longitudinal. Les altres tres estan situades a les arestes de tal forma que mesuren la força en la direcció d'aquestes.

Palmer [35] desenvolupa un dinamòmetre de doble marc en forma de U invertida. De la mateixa manera que en els altres casos comentats, també disposa d'un total de 6 cèl·lules de càrrega. El dinamòmetre s'ha dissenyat per a suportar 100 kN de força en la direcció longitudinal i també en la vertical, i 50 kN en la direcció transversal (Figura 2.11). En el procés de calibratge s'identifica que un dels inconvenients és la sensibilitat creuada, que s'atribueix als possibles desajustos en el muntatge de les ròtules de connexió de les cèl·lules de càrrega.

Knechtges [36] realitza un conjunt de propostes per a la mesura d'esforços entre tractors i ormejos. Per al cas d'enganxalls de tres punts proposa un sistema de doble marc i 6 cèl·lules de càrrega. Aquest disseny està concebut per a tractors de fins a 90 kW i deixa un espai interior que permet la utilització de la presa de força (Figura 2.12).



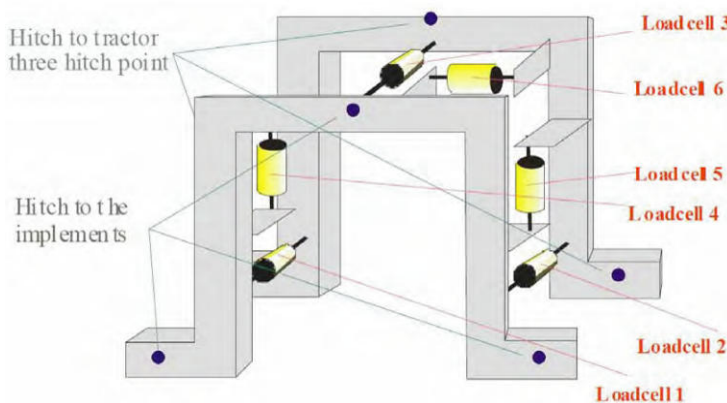
**Figura 2.11: Dinamòmetre per a enganxalls de tres punts de Palmer [35]**



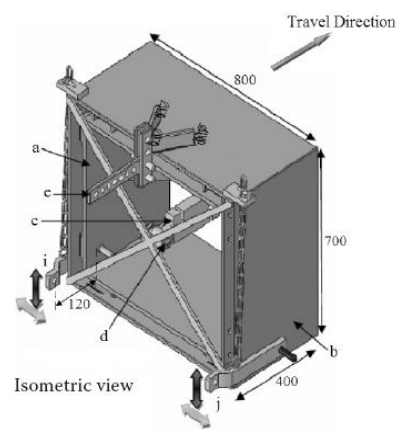
**Figura 2.12: Dinamòmetre tripuntal proposat per Knechtges [36]**

Tsiropoulos et al. [37] desenvolupen un dinamòmetre de doble marc en forma de U invertida. Aquest disposa de 6 cèl·lules de càrrega i d'espai per a la utilització de la presa de força del tractor (Figura 2.13). El calibratge s'ha realitzat individualment per a cada cèl·lula de càrrega. Les dades adquirides amb el dinamòmetre són enviades al bus CAN de comunicació del tractor, conjuntament amb les dades d'altres equips i sensors, on també, mitjançant un ordinador connectat a aquest bus, s'enregistra tota la informació.

Askari et al. [29] construeixen un dinamòmetre per a la mesura de la component longitudinal de força per a valors de fins a 50 kN. El disseny d'aquest dinamòmetre consisteix en dos marcs de forma rectangular, l'un muntat dins de l'altre i separats per uns rodets de tal forma que només es poden moure l'un respecte l'altre en la direcció d'avanç del tractor (Figura 2.14), i es restringeix aquest moviment mitjançant una cèl·lula de càrrega per a la mesura de la força. Un aspecte important sobre el procés de disseny d'aquest dinamòmetre és que s'ha utilitzat un programa de CAD-CAE per al procés de disseny de l'aparell i s'ha realitzat una optimització de l'estructura mitjançant mètodes de càlcul per elements finits.



**Figura 2.13: Dinamòmetre desenvolupat per Tsiropoulos et al. [37]**



**Figura 2.14: Dinamòmetre desenvolupat per Askari et al. [29]**

Un concepte diferent de dinamòmetre per a enganxalls tripuntals consisteix en un disseny basat en dos marcs que estan units per un tub on s'hi instal·len galgues extensomètriques. Un d'aquests dissenys és el desenvolupat per Johnson i Voorhees [9],

per a tractors de fins a 185 kW (Figura 2.15). En el tub s'hi instal·len un total de 16 galgues distribuïdes en 3 punts de mesura que permeten determinar les components longitudinal i vertical de força i la component de capcineig del moment. Un disseny força similar al desenvolupament anterior és el de Garner et al. [10] (Figura 2.16). En el primer cas, es realitza un calibratge per a cada una de les tres components que mesura el dinamòmetre, amb aquest muntat al tractor i aplicant càrregues amb un cilindre hidràulic, on s'observa una lleugera disminució de la sensibilitat en els punts respecte als valors teòrics esperats. En el segon cas, per al calibratge del dinamòmetre, aquest s'instal·la en una bancada d'assaig on s'hi apliquen forces a cada ancoratge amb un cilindre hidràulic en un conjunt de direccions, que van des de la direcció longitudinal fins a la vertical.

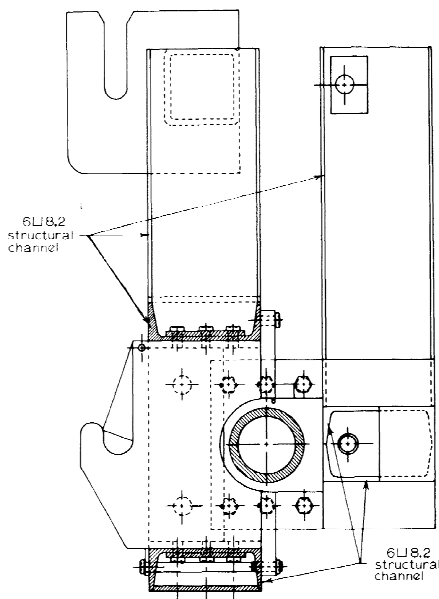


Figura 2.15: Dinamòmetre desenvolupat per Johnson i Voorhees [9]

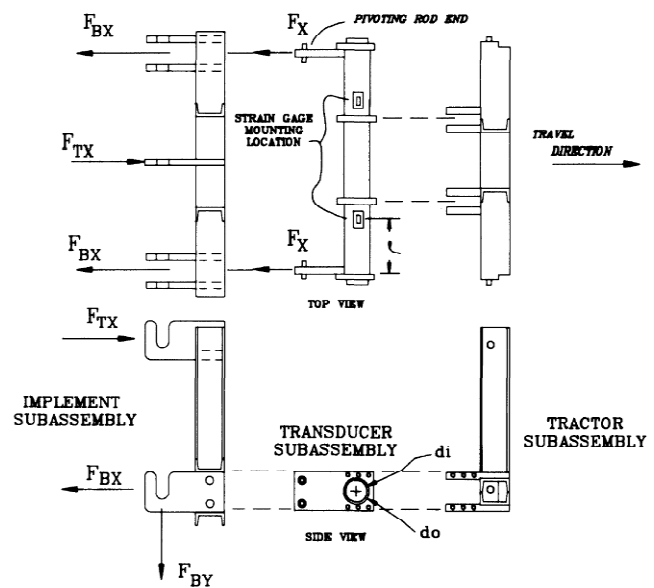


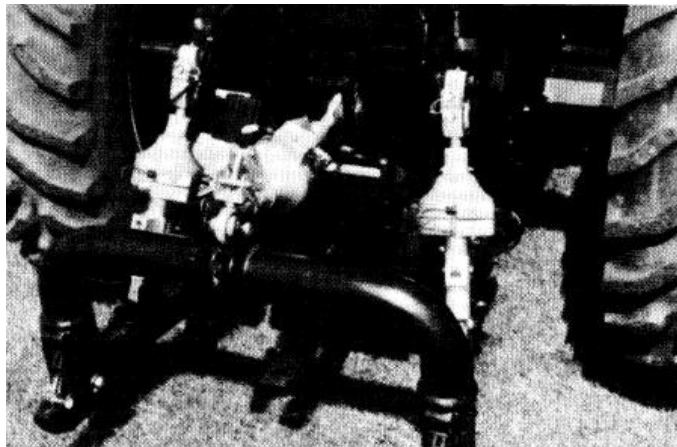
Figura 2.16: Dinamòmetre desenvolupat per Garner et al. [10]

### 2.2.3. Dinamòmetres basats en la modificació de l'enganxall tripuntal

Un concepte de dinamòmetre diferent als fins ara exposats per a la mesura dels esforços entre el tractor i l'ormeig consisteix en modificar el mecanisme d'enganxall de tres punts del tractor per instal·lar-hi els elements de mesura de forces. Aquests sistemes tenen l'avantatge que no s'afegeix cap element complementari entre tractor i ormeig, i eliminen així els possibles efectes que pugui produir el fet d'instal·lar-hi un dinamòmetre entremig. Tot i això, aquest sistema té l'inconvenient de que no permet realitzar assajos amb diferents tractors. A continuació s'exposa una revisió d'aquests tipus de dinamòmetres desenvolupats per diversos investigadors.

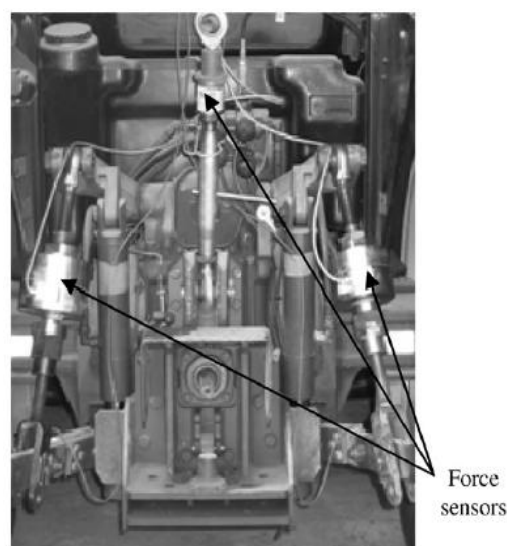
McLaughlin et al. [25] desenvolupen un tractor instrumentat per a la realització de diversos estudis. A part d'instal·lar sensors de mesura del consum de combustible, del parell i de la velocitat angular de les rodes entre altres, s'ha modificat l'enganxall de tres punts per instal·lar-hi cèl·lules de càrrega. S'han substituït per cèl·lules de càrrega la barra superior de l'enganxall i les barres d'elevació dels enganxalls inferiors, cada una d'elles amb una capacitat màxima de 220 kN (Figura 2.17). El sobredimensionament de

les cèl·lules de càrrega és considerable ja que es calcula que estaran entre el 10% i el 30% de la capacitat màxima en condicions d'operació normal. S'ha considerat aquest sobredimensionament, segons els autors, per poder suportar els impactes que poden aparèixer quan l'ormeig xoca amb algun element rígid o quan es circula amb l'ormeig elevat en un terreny irregular. En aquest disseny no es pot mesurar la component transversal de força ni la component de guinyada del moment, ja que els autors han considerat que sempre estudiaran ormejos simètrics i correctament ajustats, tot admetent que aquesta consideració no és sempre vàlida.



**Figura 2.17: Dinamòmetre desenvolupat per McLaughlin et al. [25]**

Bentaher et al. [26] també desenvolupen un enganxall de tres punts instrumentat amb cèl·lules de càrrega instal·lades a la barra superior de l'enganxall i a les dos barres d'elevació de les barres inferiors (Figura 2.18). Utilitza tres mesures de forces per tal de determinar la força entre el terra i l'ormeig. Les cèl·lules de càrrega utilitzades són de 200 kN cadascuna, i a més s'instal·la un sensor per mesurar la posició angular de les barres inferiors del mecanisme de tres punts. El calibratge del dinamòmetre s'ha realitzat utilitzant un marc per aplicar les forces amb un cilindre hidràulic en les direccions longitudinal, transversal i vertical.



**Figura 2.18: Dinamòmetre desenvolupat per Bentaher et al. [26]**

Cupera et al. [27] desenvolupen un model per escollir el llast adequat a cada eix del tractor tenint en compte les condicions d'operació d'un ormeig així com la disposició

que adopta l'enganxall de tres punts del tractor. Per a l'assaig experimental s'instal·la un total de 5 cèl·lules de càrrega al mecanisme d'enganxall de tres punts (Figura 2.19). Dos d'aquestes s'instal·len als enganxalls inferiors, dos a les barres d'elevació dels enganxalls inferiors i una a l'enganxall superior. En l'assaig experimental, el tractor està estirat per un altre, per mesurar la força necessària per moure tot el conjunt i així obtenir la component longitudinal de la força necessària per al treball de l'ormeig i per a superar la resta de resistències al tractor (coeficients de rodolament i rendiments mecànics del motor i la transmissió). Mitjançant les dades dels 6 sensors de força es desenvolupa un model matemàtic que permet obtenir les forces en les rodes posteriors dreta i esquerra i en l'eix davanter sobre el terra.



Figura 2.19: Dinamòmetre desenvolupat per Cupera et al. amb un ormeig muntat [27]

Upadhyaya [1] instrumenta un enganxall de tres punts d'un tractor instal·lant galgues extensomètriques a les barres d'aquest (Figura 2.20). En concret hi ha tres punts de mesura amb galgues extensomètriques a cada una de les barres inferiors, i també un altre punt a la barra superior. El model matemàtic permet determinar les components longitudinal, vertical i transversal de força, utilitzant també les mesures dels dos angles de cada barra de l'enganxall per determinar-ne la posició angular. En el calibratge s'obtenen uns errors en les mesures inferiors al 10%.

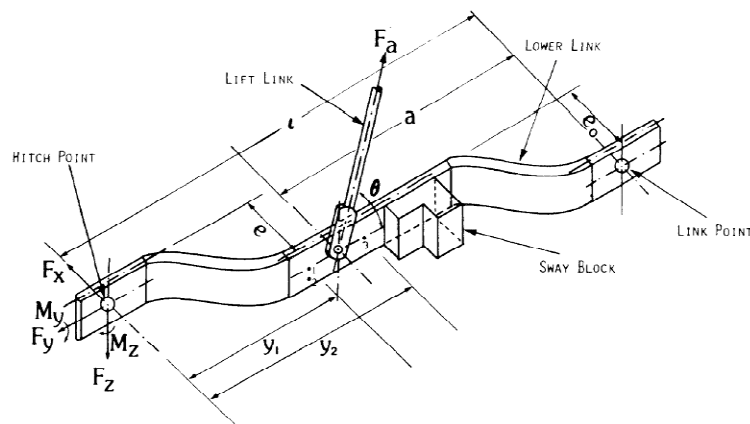
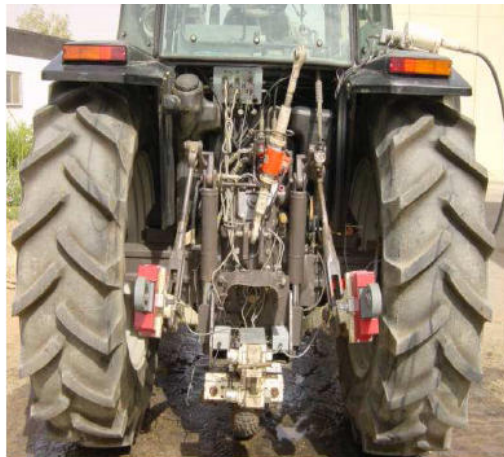


Figura 2.20: Esquema de la barra inferior del mecanisme d'enganxall de tres punts amb els punts de col·locació de les galgues [1]

Khan et al. [2] també instal·len directament sobre les barres inferiors de l'enganxall de tres punts un sistema de mesura amb galgues extensomètriques. Aquest sistema mesura per a cada barra la component longitudinal i vertical de força al punt d'enganxall. Es realitza un procés de calibratge on s'analitzen els efectes en la sensibilitat, la sensibilitat creuada, la histèresis, la linealitat i la repetibilitat. Els resultats mostren una bona correlació entre la càrrega aplicada i la mesurada, amb errors inferiors al 2%.

Al-Janobi i Al-Suhaibani [18] modifiquen les barres d'un tractor per a la mesura de les components longitudinal i vertical de força a l'enganxall tripuntal. El dinamòmetre consisteix en un EOR instal·lat a cada una de les barres inferiors de l'enganxall i en una cèl·lula de càrrega per a la barra de l'enganxall superior. Es parametritzen les dimensions de l'enganxall del tractor per després poder determinar les components de força, assumint que no existeix component en la direcció transversal. Els EOR s'han desenvolupat per mesurar 60 kN de component longitudinal i 30 kN de component vertical cadascun. La cèl·lula de càrrega de la barra superior és de 100 kN. En el procés de calibratge s'analitza individualment el comportament de cada EOR construït, on s'obtenen sensibilitats creuades reduïdes i una bona linealitat. De forma molt similar, Al-Suhaibani i Ghaly [38] desenvolupen també un dinamòmetre per a la mesura de les forces en l'enganxall de tres punts, disposant a les barres inferiors d'uns EOR que mesuren les components longitudinal i vertical de força i a la barra superior una cèl·lula de càrrega per a la mesura de la força en la direcció d'aquesta (Figura 2.21). En l'experimentació s'utilitza aquest dinamòmetre per a la determinació de les components longitudinal i vertical de força en l'enganxall.



**Figura 2.21: Dinamòmetre desenvolupat per Al-Suhaibani i Ghaly [38]**

Un altre mètode per realitzar mesures en els enganxalls de tres punts consisteix en utilitzar sensors en forma de boló per connectar l'ormeig a l'enganxall tripuntal del tractor. Aquest és el cas de Singh i Singh [34], que instal·len tres sensors de força, un a cada punt de l'enganxall de tres punts, per mesurar la component longitudinal de força. Utilitza per al punt superior un boló de mesura de 15 kN i per als punts inferiors bolons de mesura de 20 kN. També Collins [32], per una anàlisi de vibracions en el tractor, utilitza bolons de mesura bidireccionals per connectar el tractor amb l'ormeig i mesurar les forces en la unió.

### 2.3. Dinamòmetres per a enganxalls d'un punt per a ormejos remolcats

Existeixen dissenys de formes molt diferenciades per a la mesura dels esforços en ormejos remolcats. En aquest apartat s'exposen els diferents dissenys, fent referència a les seves capacitats de càrrega i les característiques tècniques principals.

O'Dogherty [8] desenvolupa un dinamòmetre per a la mesura de les components longitudinal, vertical i transversal de força en un enganxall. El dinamòmetre consisteix en un marc, que es fixa a la màquina remolcada, i una placa central, on s'hi instal·la l'enganxall de l'ormeig per unir-lo al tractor, unides aquestes dos parts per quatre barres que treballen a flexió i on s'hi instal·len les galgues extensomètriques. Es munten un total de 24 galgues formant 3 ponts de mesura (Figura 2.22). Les components longitudinal i vertical de força es mesuren directament i la transversal es determina indirectament pel moment generat per aquesta. En el calibratge es detecta certa sensibilitat creuada que arriba en alguns casos fins al 5%.

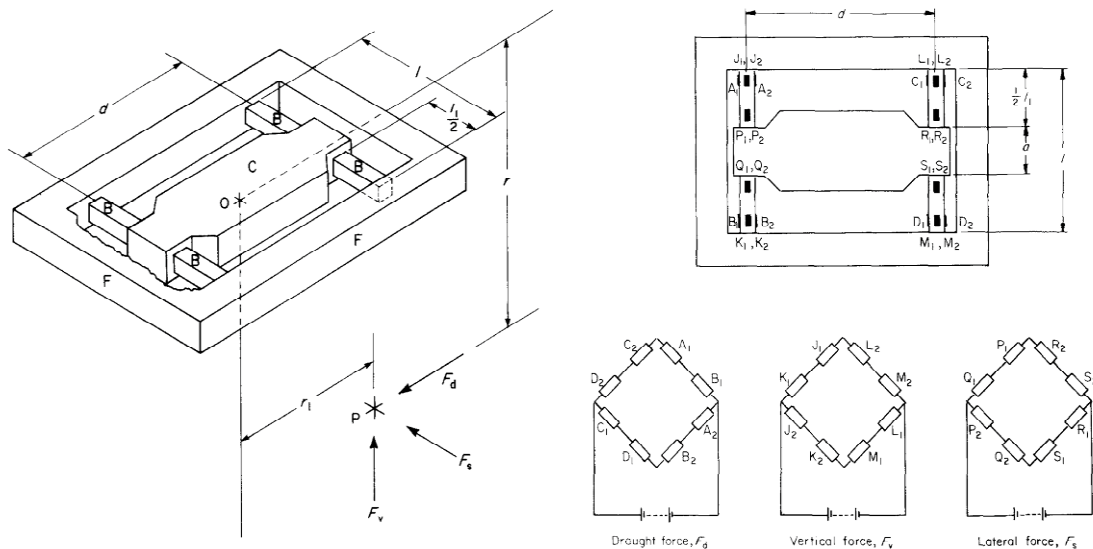


Figura 2.22: Sistema de mesura de forces desenvolupat per O'Dogherty [8]

Godwin et al. [20] desenvolupen un dinamòmetre per a equips remolcats per a la mesura de les tres components de força i les tres components de moment amb valors màxims de 100 kN per a les components de força i de 100 kN·m per a les components de moment (Figura 2.23). El disseny del dinamòmetre està format per un DEOR i un tram curt en forma de tub. De fet, el disseny consisteix en un sol bloc que s'ha mecanitzat amb la forma dels dos EOR situats a 90° i el tub, i amb les brides per al muntatge al tractor i a l'ormeig. Mitjançant un total de 32 galgues extensomètriques connectades en 8 ponts de mesura, aquest dinamòmetre és capaç de determinar les tres components de força i les tres components de moment que suporta l'enganxall, on la component longitudinal de força i la component de balanceig del moment es mesuren dues vegades. El procés de calibratge s'ha realitzat mitjançant l'aplicació de forces i moments al dinamòmetre en una bancada d'assaigs. En l'estudi de l'efecte d'histèresis i de sensibilitat creuada s'obtenen errors inferiors al 4%.



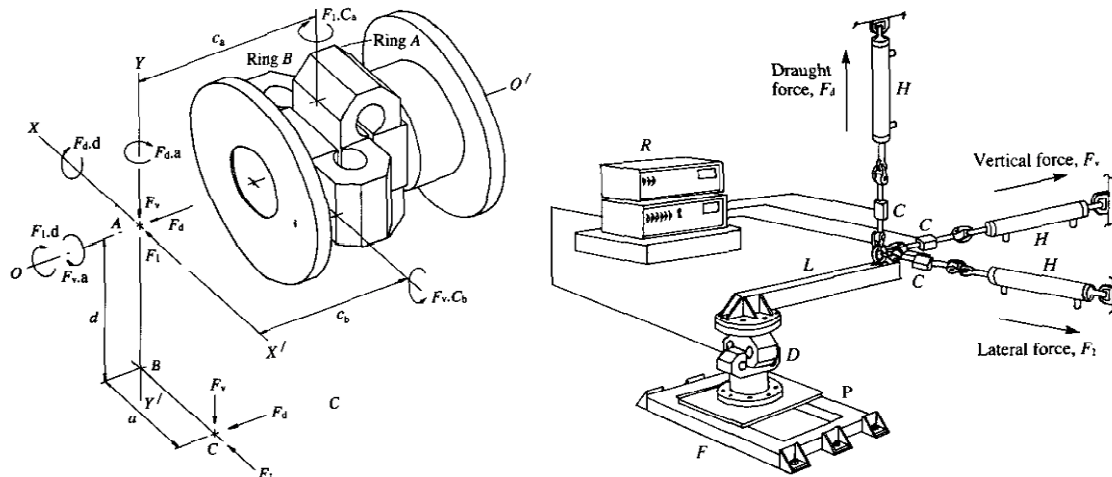


Figura 2.23: Dinamòmetre desenvolupat per Godwin et al. i sistema de calibratge utilitzat [20]

Chen et al. [17] desenvolupen un dinamòmetre per a ormejos remolcats mitjançant l'ús de dos EOR. Aquest dinamòmetre permet mesurar la component longitudinal de força fins a un valor de 180 kN i una component vertical de força de fins a 35 kN (Figura 2.24 i Figura 2.25). Cal destacar que en el procés de disseny d'aquest s'han realitzat simulacions estructurals per elements finits dels EOR per analitzar la distribució de les deformacions i estudiar les posicions a instal·lar les galgues extensomètriques. El calibratge realitzat mostra una bona relació entre els resultats experimentals i les simulacions per elements finits realitzades.

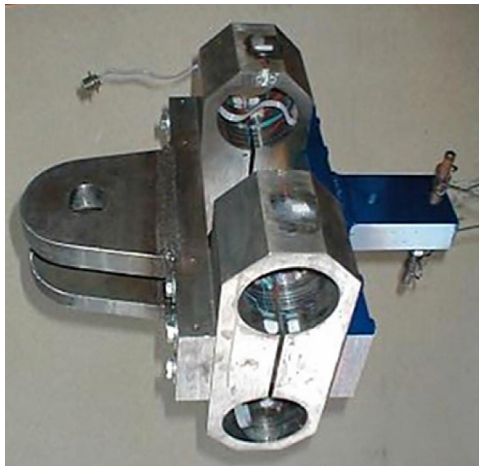


Figura 2.24: Dinamòmetre desenvolupat per Chen et al. [17]



Figura 2.25: Dinamòmetre desenvolupat per Chen et al. en un assaig en camp [17]

Turner [28], per tal de mesurar la component longitudinal de força requerida per un ormeig remolcat amb tractor, utilitza una cèl·lula de càrrega comercial (Figura 2.26). Per muntar aquest sistema són necessaris utilitatges auxiliars entre la cèl·lula de càrrega i l'enganxall del tractor per un costat i entre la cèl·lula de càrrega i l'enganxall de l'ormeig per l'altre. Això implica augmentar la cota longitudinal total del conjunt tractor-remolc i també tenir una doble articulació que fa que la direcció de mesura de la cèl·lula no correspongui exactament a les direccions d'avanç del tractor o del remolc.

Al-Suhaibani i Ghaly [38] implementen en un tractor instrumentat una barra de tir dinamomètrica. La component longitudinal de força es determina utilitzant dos bolons

de mesura que mesuren les forces en les orelles per a la fixació del passador de connexió entre el tractor i l'ormeig (Figura 2.27).



Figura 2.26: Cèl·lula de càrrega instal·lada entre tractor i remolc per a la mesura de la força de tracció utilitzada per Turner [28]



Figura 2.27: Barra de tir dinamomètrica desenvolupada per Al-Suhaibani i Ghaly [38]

## 2.4. Sistemes per a la mesura d'esforços en eines de treball del sòl

Els sistemes de mesura en eines de treball consisteixen en instrumentar aquestes mitjançant la instal·lació de galgues extensomètriques o cèl·lules de càrrega per determinar les forces que suporten. Aquests equips s'utilitzen generalment per a la caracterització del sòl i la mesura de les forces sobre l'eina de treball en diferents condicions d'operació.

Un exemple d'eina específica per a la caracterització del sòl és la desenvolupada per Andrade et al. [30] que realitzen un estudi de la variabilitat de la força longitudinal requerida per al llaurat en diferents tipus de sòls mitjançant una arada instrumentada (Figura 2.28). Aquest element disposa d'un total de 8 de cèl·lules de càrrega en forma de S distribuïdes al llarg de l'eina i permet obtenir la força requerida en funció de la profunditat.



Figura 2.28: Equip per a la mesura de la compactació del sòl desenvolupat per Andrade et al. [30]

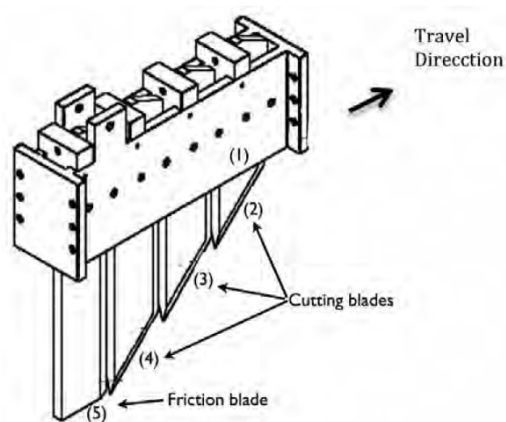


Figura 2.29: Dispositiu per a la mesura de la compactació del sòl desenvolupat per Agüera et al. [39]

Agüera et al. [39] desenvolupen un equip per a la mesura de la compactació del sòl. Aquest element consisteix en 4 fulles de diferents longituds que van muntades a l'estructura principal mitjançant un mecanisme de 4 barres (Figura 2.29). A la part superior de cada fulla s'hi instal·la una cèl·lula de càrrega que restringeix el moviment de la fulla i mesura la força que rep aquesta. Mitjançant els càlculs corresponents es determina la compactació del sòl a diferents profunditats.

Girma [40] desenvolupa una arada instrumentada per a la mesura de les forces que apareixen en aquesta. Utilitza un total de 5 EOR situats en diferents punts de l'arada per determinar les components de força en diferents parts del conjunt (Figura 2.30). Mitjançant un estudi detallat per elements finits i un exhaustiu calibratge s'aconsegueix obtenir un equip de mesura amb desviacions que no superen l'1,5% entre les dades de simulació i les mesures experimentals.

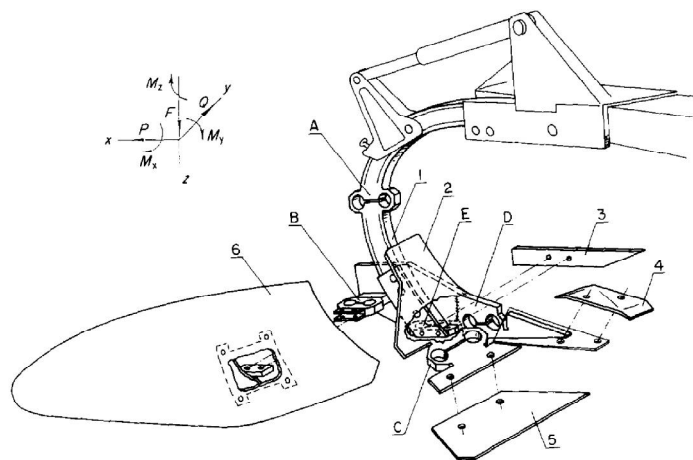


Figura 2.30: Arada instrumentada per a la mesura de forces desenvolupada per Girma [40]

Owende i Ward [41] estudien en un contenidor de terra en laboratori les forces que intervenen en una arada de volteig. L'equipament per a l'assaig consisteix en una cèl·lula de càrrega que mesura la component longitudinal de força i un EOR que mesura la component vertical de força i la component de capcineig del moment en l'arada. També disposa d'un sistema d'ajust de la profunditat de treball i de la mesura de la velocitat d'avanç (Figura 2.31).

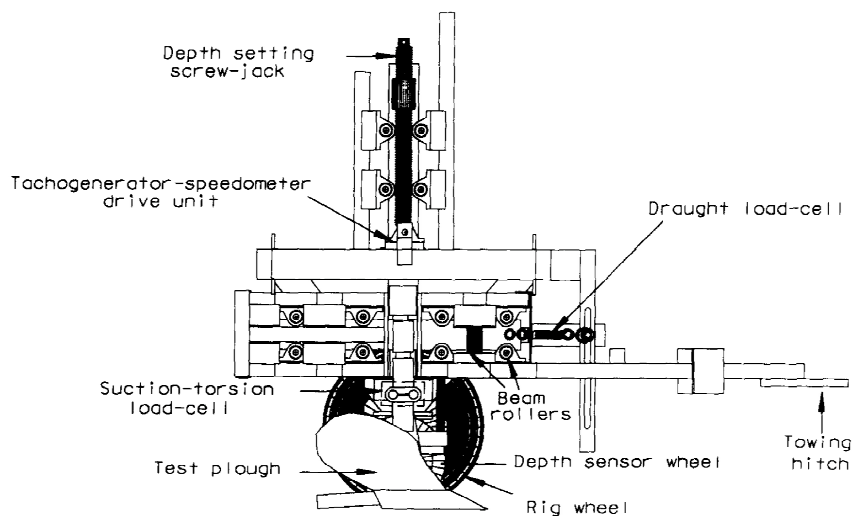
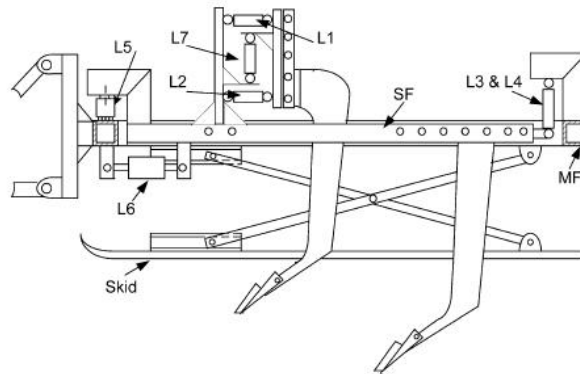


Figura 2.31: Equip per a l'assaig d'arades d'Owende i Ward en un contenidor de terra [41]

Godwin et al. [42] desenvolupen dos relles per a la mesura de les forces i els moments que intervenen en el procés de llaurat del sòl. Una de les relles disposa de dos EOR i l'altra d'un EOR i un element amb galgues per a la mesura de forces, i es dissenyen per a realitzar assajos de laboratori en un contenidor de terra. Conjuntament, per al banc d'assaig s'instal·len sensors de posició longitudinal, vertical i angular per a l'eina d'estudi. Amb aquest conjunt s'estudia l'efecte dinàmic que provoquen les ondulacions en el terreny.

Kasisira i du Plessis [43] desenvolupen una estructura basada en dos marcs per assajar un conjunt de dos relles subsoladores a diferents profunditats de treball (Figura 2.32). Un dels marcs es fixa a l'enganxall de tres punts del tractor i a l'altre s'hi instal·len les eines a assajar. Disposa a més d'uns patins a la part inferior per tal d'ajustar adequadament la profunditat de treball. Per a la mesura de les forces s'utilitzen un total de 7 cèl·lules de càrrega situades en diferents posicions i direccions que uneixen els dos marcs del conjunt. Amb aquest equip, els autors realitzen un estudi de sensibilitat amb l'objectiu d'optimitzar en quina combinació de profunditats de treball de les relles s'aconsegueix una millor utilització de l'energia.



**Figura 2.32: Ormeig dinamomètric per a l'assaig d'eines de treball del sòl desenvolupat per Kasisira i du Plessis [43]**

Un equip similar a l'anterior és el desenvolupat per Owen et al. [44] que consisteix en un ormeig semiremolcat amb sensors on s'hi poden instal·lar diferents eines de treball del sòl. Hi ha instal·lats un EOR que mesura les components longitudinal i vertical de força i la component de capcineig del moment a l'eina, dos sensors de velocitat angular de les rodes, un sistema que mesura la profunditat de treball i una cèl·lula de càrrega en forma de boló que s'encarrega de mesurar la força en la direcció longitudinal realitzada pel tractor.

Hann i Giessibl [45] desenvolupen un equip per assajar en un contenidor de terra en laboratori, les forces que actuen en un disc de llaurar accionat, on s'analitza l'efecte de la velocitat d'avanç, la profunditat de treball i els angles d'inclinació del disc. La mesura de les forces es realitza amb el dinamòmetre desenvolupat per Godwin et al. [20].

Pitla et al. [16] desenvolupen un equip per mesurar les components longitudinal i vertical de força en un disc de llaurar. La mesura de les forces es realitza amb un EOR i disposa d'un accionament per ajustar la profunditat de treball. Aquest equip, que s'acobla a l'enganxall de tres punts del tractor, s'utilitza per mesurar de forma ràpida la compactació del sòl.

Nalavade et al. [46] també estudien les forces que actuen sobre discs de llaurar tant lliures com accionats. Els experiments es realitzen també en un contenidor de terra en laboratori. Per a la mesura de les forces s'utilitza un DEOR per mesurar les tres components de força que actuen en el disc. S'utilitza també un sensor de parell a l'eix del disc per a la mesura d'aquest. Els resultats mostren que els discos accionats actuen millor a l'hora de remoure el sòl i reben unes càrregues inferiors als discos lliures.

Per últim, Herral et al. [47] instrumenten un rotocultivador horitzontal accionat per la presa de força del tractor. S'han realitzat des d'assajos en camp fins a assajos en bancada per determinar-ne la durabilitat. La instrumentació ha consistit en instal·lar galgues extensomètriques al rotor del rotocultivador i les mesures de les forces en els punts d'ancoratge de l'ormeig s'han realitzat amb el dinamòmetre per a enganxalls de tres punts desenvolupat per Scholtz [5].

### **2.5. Aplicacions i tipus d'assajos realitzats amb dinamòmetres per a enganxalls entre tractors i ormejos agrícoles**

Un cop comentats els diferents tipus de dinamòmetres es procedeix a fer una revisió dels diferents tipus d'assajos realitzats amb aquests i la descripció de la instrumentació complementària requerida. Els dinamòmetres per a enganxalls de tractors tenen múltiples aplicacions, moltes de les quals tenen com a objectiu l'estudi del comportament del tractor-ormeig en diverses situacions. També és objecte d'estudi per part de molts investigadors el balanç d'energia i els fluxos de potència de les tasques i operacions del tractor. A més, donades les possibilitats dels sistemes de posicionament per satèl·lit, cada cop més es tendeix a mostrar molts dels paràmetres representats en parcel·la, per tal de visualitzar així la variabilitat espacial de les magnituds d'estudi.

#### **2.5.1. Estudi del comportament del conjunt tractor-ormeig**

L'aplicació principal dels dinamòmetres que s'han exposat en aquest capítol és l'estudi de les forces que apareixen entre el tractor i l'ormeig per valorar el comportament del conjunt. A part de la component longitudinal de força, les components vertical i transversal de força o les components del moment que apareixen en la unió entre el tractor i l'ormeig afecten en última instància a l'eficiència en la tracció i al correcte comportament en la conducció del tractor. En aquest apartat s'exposen els principals assajos que es realitzen per a l'estudi del comportament del conjunt tractor-ormeig.

##### **2.5.1.1. Estudi dels requeriments de força i eficiència en la tracció**

Els requeriments de força en l'arrossegament de l'ormeig és objecte d'estudi per part de molts investigadors. Aquesta força depèn de múltiples factors com són les condicions d'operació de l'ormeig, la profunditat de treball, les característiques del sòl, etc. La determinació d'aquesta, conjuntament amb la velocitat d'avanç, permet determinar la potència útil requerida per accionar l'ormeig.

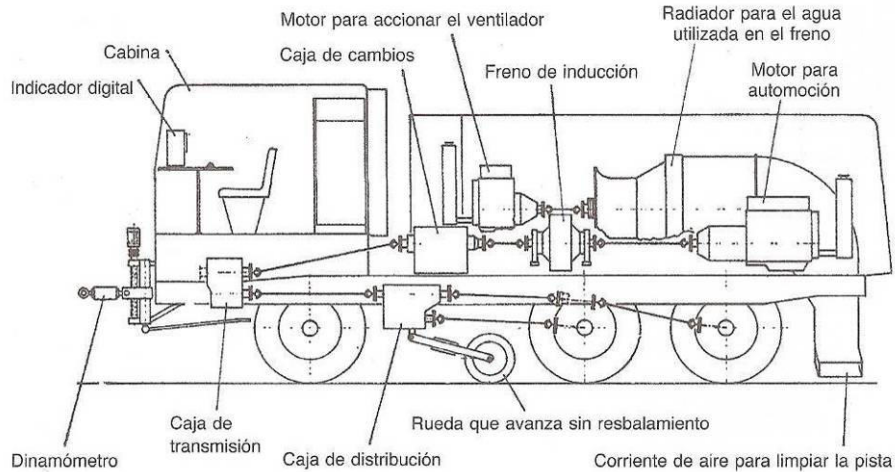
Existeixen nombrosos casos de desenvolupament d'equips dinamomètrics utilitzats en assajos en camp per a la determinació de la component longitudinal de força requerida

en l'accionament d'ormejos. Alguns exemples d'aquests equips són els de Pang [33], Smith i Barker [24], Thomson i Shinnars [31] o Bentaher et al. [26]. En canvi, altres autors realitzen experiments en contenidors de terra en laboratori per tal de mesurar la força longitudinal requerida en diferents tipus d'eines, com són els casos de Sahu i Raheman [48], Owende i Ward [41] o Godwin et al. [42].

Per als estudi en camp, molts investigadors utilitzen tractors instrumentats que permeten realitzar múltiples assajos en condicions i ormejos diferents. Un exemple és el de Al-Suhaibani i Al-Janobi [49] i també el de Al-Janobi [50], que utilitzen un tractor Massey Ferguson 3090 instrumentat amb una cèl·lula de càrrega per a mesurar la força longitudinal a l'enganxall i un sensor per a mesurar el parell i velocitat de la PTO. També instal·len sensors de velocitat a cada roda, una cinquena roda per mesurar la velocitat d'avanç del tractor, un sensor de consum de combustible i sensors de temperatura per als fluids. L'objectiu és estudiar el comportament del tractor-ormeig en diferents tipus de terreny. Amb aquest tractor Al-Suhaibani i Al-Janobi [51] també estudien l'efecte de la velocitat i la profunditat de treball en la força longitudinal requerida. L'estudi es realitza per a diferents ormejos: un cultivador de cisells, una grada d'arades i una grada de discos. Al-Suhaibani et al. [52] amplien la instrumentació d'aquest tractor afegint sensors de parell a les rodes i sensors de la càrrega en els eixos del tractor. Al-Suhaibani et al. [53] també afegeixen millores en alguns sensors i al sistema d'adquisició de dades. Al-Janobi [54] utilitza aquest tractor instrumentat amb un dinamòmetre tripuntal per comparar tres cultivadors diferents de característiques molts similars excepte per l'eina de treball del sòl, amb relles rectes, semi-corbades i corbades. Al-Suhaibani i Ghaly [38] utilitzen el tractor esmentat per a assajos del comportament de diferents tipus d'ormejos per a la preparació del sòl. Es realitza un assaig amb un cultivador de cisells per determinar els requeriments de força longitudinal en diferents condicions de profunditat de treball i velocitat. Per últim, Al-Suhaibani et al. [55], amb la mateixa instrumentació, realitzen el mateix assaig amb un cultivador de cisells de grans dimensions.

Un dels aspectes més importants en el funcionament del conjunt tractor-ormeig és l'eficiència en la tracció, ja que aquesta condiona el rendiment del tractor, i per tant afecta al consum de combustible i als costos d'operació. L'eficiència en la tracció és defineix com la relació entre la potència útil en l'avanç (corresponent al producte de la força tangencial del terra sobre la roda i la velocitat d'avanç) i la potència a l'eix de la roda (corresponent al producte del parell i la velocitat angular a l'eix de la roda).

La determinació la component longitudinal de força és de tal importància que existeixen estacions d'assaig gestionades per organismes públics que realitzen assajos normalitzats per a l'estudi de la capacitat de tracció i la potència desenvolupada pel tractor. Els equipaments utilitzats per aquests centres van des de bancs d'assaig per als tractors fins a vehicles instrumentats preparats per simular una resistència a la barra de tir del tractor, com és el cas del vehicle dinamomètric del centre d'assaig de tractors DLG a Alemanya [56] (Figura 2.33).



**Figura 2.33: Vehicle dinamomètric per a l'assaig de la potència en tractors [56]**

Molts investigadors desenvolupen la instrumentació necessària per a la mesura de la potència útil a la barra de tir i l'eficiència en la tracció. És el cas de Turner [28], que desenvolupa un sistema d'adquisició per a determinar mitjançant càlculs senzills l'eficiència en la tracció. La instrumentació consisteix en una cèl·lula de càrrega per mesurar la força longitudinal a la barra de tir i un sistema de mesura de la velocitat a cada roda i de l'avanç del tractor. Keen et al. [57] desenvolupen un sistema que controla la profunditat de treball a partir de la mesura de les components longitudinal i vertical de la força en l'enganxall de tres punts, amb l'objectiu de maximitzar l'eficiència en la tracció. Younis et al. [58] desenvolupen un conjunt de sensors que s'instal·len al tractor per analitzar-ne el funcionament. Aquests són sensors per a la mesura de la força en l'accionament hidràulic de l'enganxall tripuntal, de la força a la barra de tir, del parell i de la velocitat de la PTO, de la velocitat d'avanç del tractor i del consum de combustible. Amb aquesta instrumentació s'analitza la capacitat de tracció en les diferents marxes del tractor.

### **2.5.1.2. Estudi de la distribució de càrrega en els eixos i del llast**

La distribució de la càrrega entre els diferents eixos del tractor és un factor de gran rellevància a l'hora d'analitzar el comportament del tractor i de l'ormeig, ja que està directament lligat amb la capacitat de tracció del tractor. El llast permet augmentar la càrrega que es recolza sobre els eixos del vehicle per aconseguir una millor tracció. Una tècnica habitual és situar pesos, generalment a la part frontal del tractor, per augmentar l'adherència de les rodes frontals. Una altra tècnica és el llast hidràulic, que consisteix en introduir aigua a l'interior dels pneumàtics del tractor, per tal d'augmentar el pes total i la capacitat de tracció del tractor [59]. Un llast insuficient provoca lliscament excessiu i un major desgast del pneumàtic. Un llast excessiu implica una sobrecàrrega en els pneumàtics, un augment de la resistència al rodolament i la compactació del sòl [60]. El llast adequat és, per tant, aquell que ofereix una millor eficiència en la tracció i minimitza l'efecte combinat del lliscament i la resistència al rodolament.

Amb l'objectiu d'analitzar en detall l'afectació del llast en el comportament del conjunt tractor-ormeig, Zhang i Chancellor [61] instrumenten un tractor amb un sistema de llast desplaçable pels laterals del tractor i accionat per motors hidràulics. Mitjançant galgues extensomètriques en els eixos del tractor i una cèl·lula de càrrega a la barra de tir,

s'aconsegueix ajustar la distribució de pesos òptima entre els eixos, i que permeten aconseguir estalvis de combustible de fins al 20% respecte condicions sense llast. Gee-Clough et al. [62] desenvolupen un model empíric amb l'objectiu de determinar la relació entre la component longitudinal de força màxima desenvolupada pel tractor i el lliscament i el llast hidràulic a les rodes, per tal de maximitzar la potència útil. Per als assajos en camp es mesura la component longitudinal de força, la velocitat d'avanç del tractor i les càrregues de cada eix en repòs, per tal d'estimar després la càrrega dinàmica a cada eix. També en la mateixa línia, Evans et al. [63] desenvolupen un model per tal de facilitar la selecció del llast adequat i optimitzar l'eficiència en la tracció. Mitjançant assajos realitzats en un terreny amb herba, es validen i s'ajusten els paràmetres de les equacions del model. Pranav i Pandey [64] desenvolupen un programa informàtic per a la selecció del llast més adequat per a cada situació. El programa determina també la tracció útil, el lliscament i el consum de combustible.

Cupera et al. [27] instrumenten un tractor amb un enganxall de tres punts modificat per a la mesura de les components de força i moment en la unió. Les dades obtingudes s'utilitzen per estimar, mitjançant un model mecànic del tractor, les càrregues als eixos davanter i posterior durant l'operació del tractor.

Per últim, no només el llast afecta a la capacitat de tracció, sinó també el tipus de contacte entre el tractor i el terreny. Per això, Molari et al. [65] analitzen els canvis de la força de tracció màxima que pot desenvolupar un tractor equipat amb rodes normals sense llast i amb llast, amb cadenes de goma a l'eix posterior i totalment equipat amb cadenes de goma. Aquest assaig es realitza amb una barra de tir equipada amb una cèl·lula de càrrega de 200 kN.

### ***2.5.1.3. Anàlisi de les vibracions i resposta dinàmica en tractors i ormejos***

L'anàlisi de vibracions en tractors també és un camp on molts investigadors hi han dedicat nombrosos estudis, com també l'estudi del comportament dinàmic de les forces en la unió entre el tractor i l'ormeig.

Un exemple és el treball de Cowell [66], que estudia el comportament dinàmic d'un conjunt tractor-ormeig en un terreny ondulat. Es comprova que la profunditat de treball efectiva varia considerablement durant l'operació a causa de l'ondulació del terreny i també per l'actuació del sistema de control de la profunditat de treball de l'enganxall de tres punts. L'estudi s'ha realitzat experimentalment amb diferents arades i s'ha desenvolupat un model matemàtic per determinar l'amplitud del moviment de l'ormeig a partir del moviment del tractor en un terreny de perfil sinusoidal. Cowell [67] estudia també el comportament dinàmic d'una arada durant la fase de penetració al terreny, mitjançant l'estudi de la trajectòria de l'arada mentre s'introdueix en el terreny fins que s'estabilitza a la profunditat de treball d'equilibri.

Crolla i Pearson [68] estudien el comportament del control de profunditat de l'enganxall de tres punts del tractor en terrenys irregulars, on s'observa que en determinades situacions el sistema de control de profunditat de l'enganxall del tractor actua de forma inestable. Crolla [69] estudia també amb un model matemàtic i experiments en camp l'efecte en els cultivadors de les vibracions del conjunt i l'efecte que aquestes tenen en el control de profunditat.



Kocher i Summers [70] realitzen un estudi teòric per analitzar l'efecte de la freqüència de mostreig dels equips de mesura d'esforços per al cas concret d'aplicació en tractors i ormejos agrícoles, i analitzen els errors en les mesures que poden aparèixer si no s'ajusta correctament aquesta freqüència. Freeland et al. [71] instal·len acceleròmetres en un tractor de jardí per estudiar la resposta del tractor a impactes. L'experimentació consisteix en la mesura de la resposta freqüencial del xassís del tractor, mitjançant l'elevació de la part posterior del tractor amb un cable i deixar-lo caure. A la part posterior del tractor s'enregistren les acceleracions del xassís en les tres direccions per determinar la resposta freqüencial.

Un dels treballs més detallats en el camp de les vibracions en el conjunt tractor-ormeig és el de Collins [32], que desenvolupa un model matemàtic per preveure les vibracions al que estarà sotmès l'ormeig a partir d'una vibració definida a l'eix posterior del tractor. Per validar el model instal·la entre el tractor i l'ormeig cèl·lules de càrrega en forma de boló i acceleròmetres tant al tractor com a l'ormeig. Amb el tractor situat en una plataforma vibratòria, es comparen els resultats obtinguts experimentalment amb els del model matemàtic.

### **2.5.1.4. Estabilitat direccional i forces transversals**

En determinades situacions de l'operació de l'ormeig, la direcció de la força de tir no coincideix amb el pla mig del tractor, o bé hi ha ormejos que pel seu funcionament provoquen esforços transversals sobre el tractor. En aquests casos són les rodes del tractor les que s'encarreguen de compensar aquests esforços. Aquest efecte provoca un canvi en la direcció desitjada d'avanç del tractor, i el tractorista ha d'actuar sobre la direcció per mantenir la trajectòria [59].

Cowell i Makanjuola [72] estudien l'estabilitat direccional d'ormejos muntats en enganxalls de tres punts. Es planteja un estudi analític admetent que el comportament correspon a un sistema vibratori de  $2n$  ordre quan l'ormeig rep una càrrega transversal de distorsió i aquest retorna de forma natural a la línia d'avanç del tractor. Per validar el model es realitza un assaig en un contenidor de terra en laboratori amb una fulla metàl·lica com a ormeig simple. Els resultats mostren que el sistema es comporta com un sistema vibratori de  $2n$  ordre fortament esmorteït, i que validen el model teòric proposat. Reece et al. [73] també realitzen un estudi de l'estabilitat transversal en ormejos per a diferents tipus d'enganxalls. Després de validar el model amb estudis experimentals amb ormejos simples no simètrics, arriben a les mateixes conclusions que Cowell i Makanjuola [72].

Makanjuola i Cowell [74] amplien l'estudi del comportament dinàmic del tractor, i en aquest cas, amb l'objectiu d'analitzar i reduir el temps d'estabilització a una pertorbació lateral. En concret es busca, per una velocitat d'avanç donada, la configuració de l'enganxall que fa que l'ormeig recuperi més ràpidament la posició normal de treball. També s'amplia l'estudi a les situacions de pendent lateral i de negociació d'una corba. Per últim, Jönsson [75] estudia la desviació lateral i el comportament dinàmic d'ormejos asimètrics i afectats per una inclinació lateral. En l'estudi s'analitzen el cas d'un enganxall d'un punt i el cas d'un enganxall de tres punts.

### **2.5.2. Estudi de les característiques del sòl i la qualitat del llaurat**

El mètode tradicional per a la determinació de les propietats mecàniques del sòl consisteix en utilitzar penetròmetres, que són equips per mesurar les característiques geotècniques del sòl utilitzant una punta de forma cònica que s'introdueix al terreny mitjançant l'aplicació d'una força coneguda. El principal inconvenient d'aquest mètode és que s'han de realitzar mitjançant mesures puntuals al llarg d'una parcel·la, cosa que fa que sigui necessari molt de temps per conèixer la variabilitat espacial en la parcel·la. Amb l'objectiu de facilitar aquests assajos, Tekin et al. [76] implementen un penetròmetre a l'enganxall de tres punts del tractor per realitzar els assajos més ràpidament. Un sistema similar és utilitzar una placa per aplicar diferents pressions sobre el terreny i mesurar la deformació d'aquest. Un altre mètode utilitzat és la mesura de l'esforç tallant necessari per trencar la cohesió del sòl. Aquest assaig es realitza amb una placa amb ressalts recolzada sobre el terra en el qual s'hi disposen uns pesos coneguts i es mesura la força longitudinal necessària per a que s'iniciï el moviment [56].

Atès que tots aquests mètodes són força lents en la seva realització, una alternativa proposada per diversos investigadors consisteix en una arada o rella equipades amb elements per a la mesura de forces. Mitjançant la mesura de la component longitudinal de força necessària per moure l'eina s'estimen paràmetres com la compactació del sòl, com són els casos de Andrade et al. [30] o Agüera et al. [39]. Pitla et al. [16] utilitzen, per determinar les característiques del sòl, un equip format per un disc de llaurar muntat sobre un EOR i que s'instal·la a l'enganxall tripuntal del tractor.

A part dels assajos en camp, per a l'estudi de la qualitat del llaurat i dels paràmetres que hi intervenen, com la forma de l'eina, la velocitat o la profunditat de treball, també es realitzen assajos en laboratori amb contenidor de terra i un dispositiu d'arrossegament de l'eina estudiada. Exemples d'aquest cas són els de Godwin et al. [42], Owende i Ward [41], Hann i Giessibl [45] o Nalavade et al. [46], ja descrits a l'Apartat 2.4.

### **2.5.3. Estudis per al balanç d'energia i els fluxos de potència**

Un dels principals reptes en el món de l'agricultura és augmentar el rendiment econòmic de les explotacions agràries. El consum energètic en els processos de preparació del sòl és un dels factors que més incideixen en els costos de producció. Els processos de llaurat primari (per al treball de descompactació i volteig de la terra) i secundari (preparació del llit de sembra) cada cop més queden desplaçats per sistemes de sembra directa sense preparació prèvia del sòl. Això és degut a que en el procediment de sembra tradicional (llaurat primari, secundari i sembra) s'estimen uns consums de 45 a 75 l/ha, mentre que per a la sembra directa aquests són de 7 a 15 l/ha [77].

A part dels mètodes utilitzats, també tenen una notable importància les condicions de treball del conjunt tractor-ormeig, des de la profunditat de treball fins al règim del motor o el grau de lliscament. Si s'ajusten correctament aquests factors, es poden aconseguir per una tasca concreta de preparació del sòl reduccions del consum de combustible de fins al 30% [77]. És per això que els autors que realitzen aquests estudis instrumenten els tractors amb un gran nombre de sensors per a poder realitzar anàlisis conclouents.

Un exemple de tractor instrumentat per a la realització d'aquests estudis és el desenvolupat per Green et al. [78], que implementen la instrumentació en un tractor John Deere 4440. Els sensors utilitzats són sensors per mesurar la velocitat de les rodes, la velocitat d'avanç del tractor, la velocitat del motor, el consum de combustible, la component longitudinal de força a la barra de tir i el parell en els eixos del tractor. La instrumentació s'ha utilitzat per estudiar l'efecte de les diferents marxes del canvi del tractor en la capacitat de tracció i el consum de combustible accionant una grada de discos. Koertner et al. [79] instrumenten un tractor amb un sensor de velocitat del motor, un sensor d'obertura de la vàlvula de combustible i sensors de temperatura dels fluids. Amb aquesta instrumentació i mitjançant proves experimentals es determinen les equacions per estimar els valors de la potència útil del tractor i del consum de combustible.

Tompkins i Wilhelm [80] instrumenten un tractor per a la mesura de diferents paràmetres per analitzar els requeriments energètics. Els sensors utilitzats són sensors per a la mesura de la velocitat del motor, de la velocitat d'avanç, de la força a la barra de tir, del consum de combustible, del lliscament a les rodes i de la velocitat i del parell a les rodes. A partir del treball dels autors anteriors, Freeland et al. [81] descriuen un tractor instrumentat per a la mesura dels requeriments energètics en ormejos remolcats i accionats per la presa de força. El tractor permet mesurar la velocitat de les rodes posteriors, disposa d'eixos instrumentats per a la mesura del parell a les rodes, de sensor de parell a la PTO, de mesura del consum de combustible, una cèl·lula de càrrega per a la mesura de la força longitudinal i sensor per a la velocitat del motor (Figura 2.34). La particularitat d'aquesta instrumentació és que a més afegeix a aquest tractor instrumentat un sistema de telemetria per a la transmissió de dades. Freeland et al. [82] també dissenyen un sistema d'instrumentació portàtil per a tractors petits, de tal manera que els sensors es poden instal·lar fàcilment en diferents tractors. Els sensors utilitzats mesuren la distància recorreguda, la rotació dels eixos, la força a la barra de tir i els angles de balanceig i capcineig del tractor, tot connectat a un ordinador que s'encarrega de monitoritzar en temps real i guardar les dades (Figura 2.35).

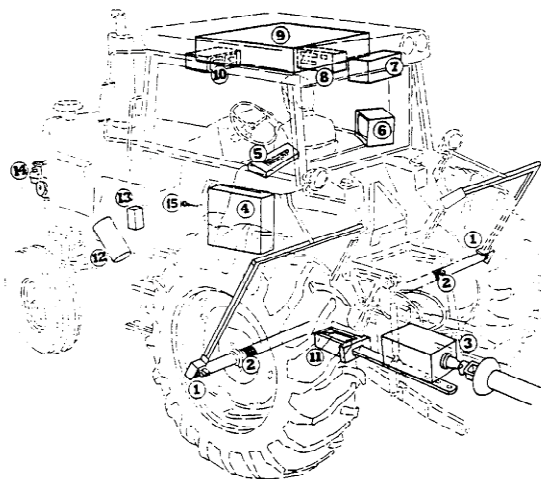


Figura 2.34: Tractor instrumentat utilitzat per Freeland et al. [81]

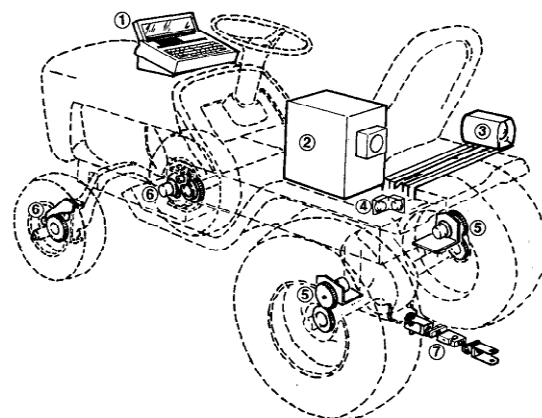


Figura 2.35: Instrumentació desenvolupada per a petits tractors per Freeland et al. [82]

Bowers [4] instrumenta un tractor amb un dinamòmetre per a enganxalls tripuntals per a la mesura de la component longitudinal de força i amb sensors per a la mesura de la

velocitat d'avanç i el consum de combustible. L'objectiu de l'estudi és determinar les necessitats energètiques en diferents processos de llaurat i de preparació del sòl.

Un altre tractor instrumentat per a la realització d'aquests estudis és el desenvolupat per McLaughlin et al. [25]. Hi instal·len sensors de mesura del consum de combustible, de la velocitat del vehicle i de les rodes, de la càrrega i del parell a cada eix i per a la mesura de les forces a l'enganxall tripuntal. També es desenvolupa un sistema d'enregistrament i de visualització de les dades en temps real on tot l'equipament es situa a una zona ampliada de la cabina del tractor. El mateix tractor instrumentat ha estat utilitzat per McLaughlin et al. [83] per estudiar els requeriments energètics de 8 ormejos amb diferents eines de treball, des de cultivadors de relles fins a cultivadors de discos. Es mesura la força longitudinal necessària, el consum de combustible per hectàrea i el consum específic de combustible (litres de combustible per energia requerida en l'arrossegament de l'ormeig) com a paràmetre que determina l'eficiència del conjunt tractor-ormeig.

Serrano et al. [84] també desenvolupen un tractor instrumentat per a la realització d'assajos en camp per a l'estudi de la relació entre la força longitudinal desenvolupada pel tractor i el consum de combustible. Els sensors que utilitzen són sensors per a la mesura de la velocitat de les rodes, de l'avanç del tractor, de la velocitat del motor, del consum de combustible i una cèl·lula de càrrega per mesurar la força a la barra de tir.

Singh i Singh [34] instrumenten un tractor de 50 kW per mesurar el comportament del tractor i un ormeig. El sistema mesura les forces a l'enganxall de tres punts, la velocitat d'avanç del tractor, la profunditat de treball, el consum de combustible, el lliscament, la velocitat del motor, la pressió del circuit hidràulic i les temperatures dels fluids. Amb aquesta instrumentació analitzen, en funció de la profunditat de treball, els requeriments de força per accionar una màquina sembradora.

Watts i Longstaff [85] instal·len a un tractor un conjunt de sensors que permeten mesurar les forces a l'enganxall tripuntal i a la barra de tir, la velocitat i el parell de la PTO, la velocitat d'avanç, el lliscament de les rodes, el consum de combustible i la profunditat de treball. Les dades adquirides es transmeten mitjançant telemetria a un furgó amb els equips per al tractament i l'enregistrament de les dades. Per a la validació de tot l'equipament es realitza un assaig amb un cultivador.

#### **2.5.4. Caracterització espacial de paràmetres en parcel·la**

L'obtenció de mapes d'informació en parcel·la és una tècnica cada cop més utilitzada en el món de l'agricultura. Les variables que es poden visualitzar són molt nombroses, des del contingut de diferents compostos químics en el sòl, el contingut d'aigua, les característiques mecàniques del sòl, els requeriments de força en el llaurat, el comportament i l'eficiència del tractor, i fins i tot la producció. Aquests mapes s'utilitzen en la presa de decisions i per estimar els costos i la producció de la collita. En aquests estudis són imprescindibles els sistemes de posicionament per satèl·lit GNSS, per determinar en tot moment la posició en parcel·la. Per al tractament de les dades i la creació de mapes s'utilitzen mètodes estadístics geogràfics, com el "kriging" [86], per estimar adequadament les mesures en tot el mapa a partir de les dades adquirides. Exemples de tractors instrumentats i la seva aplicació en la realització de mapes en

parcel·la són molt nombrosos, i per tant, s'exposen aquí els que es focalitzen en les mesures dels requeriments de força i les característiques del terreny.

Van Bergeijk et al. [87] proposen un nou mètode per al tractament de les dades espacials per tal de corregir les variacions temporals de les característiques del sòl a partir de l'adquisició de les dades obtingudes durant un procés de llaurat habitual. L'estudi s'ha dut a terme mitjançant dos tractadors instrumentats. En aquests es mesuren les forces a les unions inferiors de l'enganxall de tres punts, es mesura la velocitat d'avanç i de les rodes i s'utilitza un sistema de posicionament RTK (que utilitza una antena receptora al tractor i una altra fixa en la parcel·la) per a la determinació de la posició en parcel·la. Els resultats mostren que amb la tècnica utilitzada es redueix el número de mostres necessàries per estimar les propietats del terreny sense obtenir desviacions importants respecte els mètodes de mesura tradicionals de caracterització del terreny.

Tekin et al. [76], mitjançant un equip implementat en un tractor que mesura la força requerida per introduir un penetròmetre en el terreny en funció de la profunditat, aconsegueixen obtenir mapes de les característiques del sòl en parcel·les. El posicionament en parcel·la es realitza amb un equip GNSS. Amb tota aquesta instrumentació s'aconsegueix obtenir mapes de la compactació del sòl en 2 i 3 dimensions, de manera que es determina la compactació del sòl no només en funció de la posició en la parcel·la sinó també en funció de la profunditat.

Yahya et al. [88] instal·len en un tractor Massey Ferguson 3060 un conjunt de sensors per a poder realitzar mapes del comportament del tractor i l'ormeig. Els sensors utilitzats són sensors per a la mesura de força a la barra de tir i a l'enganxall tripuntal, del parell i de la velocitat a les rodes posteriors i a la presa de força, de la velocitat d'avanç del tractor, del consum de combustible, de la profunditat de treball i del pendent del terreny. Per al posicionament espacial del conjunt tractor-ormeig s'utilitza un sistema de posicionament RTK, amb una antena sobre el tractor i l'altra a un punt fix de la parcel·la (Figura 2.36). Amb la instrumentació disponible i el corresponent tractament de les dades es realitzen mapes en parcel·la de variables com la força longitudinal requerida, la profunditat de treball efectiva, la velocitat d'avanç del tractor, el lliscament de les rodes, el parell a les rodes, el consum de combustible, l'angle del pendent en la direcció d'avanç i l'eficiència en la tracció.

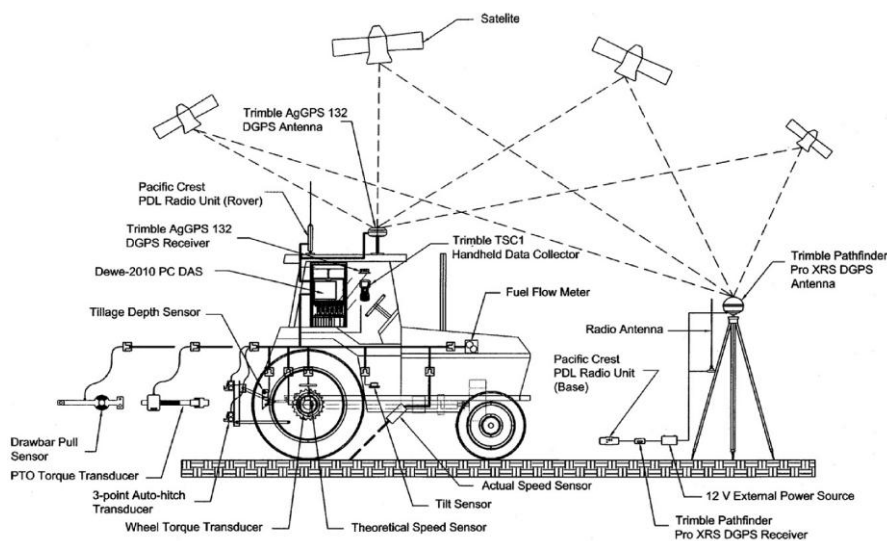


Figura 2.36: Tractor instrumentat de Yahya et al. [88]

Per últim, Tsiropoulos et al. [37] instrumenten un tractor per a realitzar mapes dels requeriments de tracció i del consum de combustible. Els equips utilitzats són un dinamòmetre per a l'enganxall de tres punts i un equip de posicionament GNSS, i s'adquireixen altres valors com les revolucions del motor, el consum de combustible i la velocitat d'avanç a partir del sistema de comunicació CAN del tractor. Es desenvolupa també un programa de tractament i visualització de les dades que permet determinar el règim de funcionament del motor que implica un menor cost en l'operació.

### **3. DESENVOLUPAMENT DEL DINAMÒMETRE PER A ENGANXALLS TRIPUNTALS**

Un dels equips analitzats en aquesta tesi és el dinamòmetre per a enganxalls de tres punts. Aquest dinamòmetre permet mesurar les forces i els moments implicats en la unió de l'ormeig agrícola amb el tractor mitjançant l'enganxall de tres punts. En aquest capítol se'n descriuen les consideracions prèvies i els requeriments del disseny i les característiques tècniques del dinamòmetre desenvolupat. Una part important del contingut d'aquest capítol deriva del treball realitzat per Berga [89] referent a l'estudi preliminar dels requeriments i a la fase de disseny mecànic d'aquest dinamòmetre.

#### **3.1. Consideracions i requeriments del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals**

En aquest apartat es descriuen els requeriments a que respon el dinamòmetre per a enganxalls tripuntals que aquí es presenta, juntament amb les consideracions i criteris de disseny adoptats per al desenvolupament d'aquest equip.

##### **3.1.1. Tipologia del dinamòmetre**

Al capítol de l'estat de l'art s'han descrit les diferents tipologies de dinamòmetres per a enganxalls de tres punts (Apartat 2.2), comentant per a cada cas els seus avantatges i inconvenients. En aquesta tesi es proposa un disseny tipus doble marc, que consisteix en dos marcs units mitjançant cèl·lules de càrrega, que s'instal·la entre el tractor i l'ormeig, i que mesura les forces en la unió entre aquests dos.

El principal motiu d'aquesta elecció és la versatilitat de poder realitzar assajos en diferents tractors. Molts investigadors proposen dissenys basats en la modificació del propi enganxall del tractor, tot argumentant que així no s'afecta a la mesura ni al comportament del conjunt tractor-ormeig. Aquests dinamòmetres, però, tenen l'inconvenient de que difícilment es poden adaptar a diferents models de tractor.

Si es compara amb la tipologia d'un sol marc, la utilització d'un doble marc permet que es puguin instal·lar en el dinamòmetre tots els elements de mesura requerits per definir completament l'estat de càrrega entre el tractor i l'ormeig, i permet també instal·lar més fàcilment cèl·lules de càrrega comercials.

Un dels inconvenients dels dinamòmetres de doble marc és l'efecte que aquests tenen comportament del conjunt tractor-ormeig, com a conseqüència del propi pes del dinamòmetre i de la posició més endarrerida de l'ormeig respecte a la que tindria sense el dinamòmetre. Això afecta principalment a les forces en el contacte entre les rodes i el terra, però no afecta a les forces necessàries per accionar l'ormeig, que depenen únicament de la seva interacció amb el terra i del seu comportament inercial.

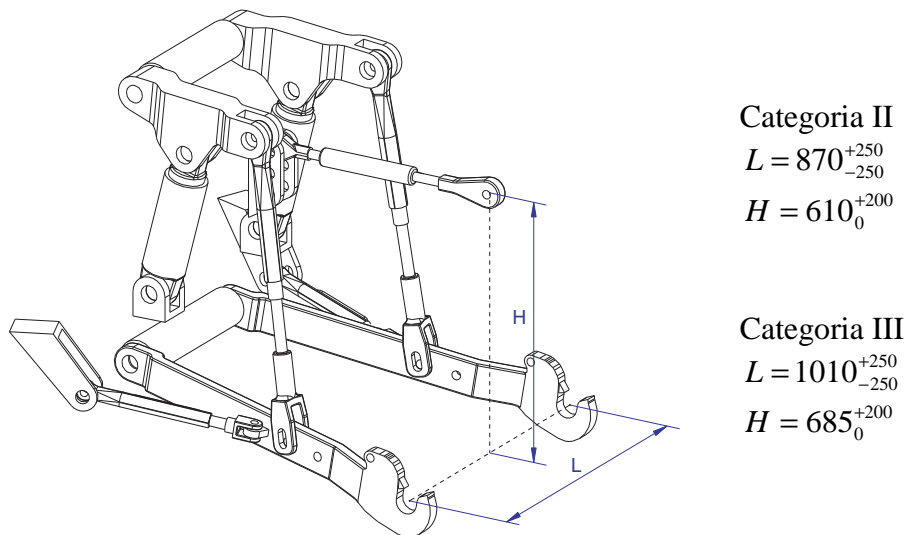
Per aquest motiu, en el disseny d'aquest equip, és convenient minimitzar la dimensió longitudinal del dinamòmetre i també la seva massa, tot garantint la seva resistència i una rigidesa adequada de l'estructura.

Per una altra banda, un dels principals problemes a solucionar en els dinamòmetres amb múltiples components de mesura és que s'ha d'evitar l'aparició de sensibilitat creuada entre les diferents mesures. Cal evitar que es transmetin a les diferents cèl·lules de càrrega components de força que no corresponen a la seva direcció de mesura. El disseny del dinamòmetre i el muntatge dels components ha d'assegurar que la força que rep cada cèl·lula de càrrega correspon únicament a la direcció que està preparada per mesurar.

### 3.1.2. Tipus de tractors i ormejos on s'utilitza el dinamòmetre

Un condicionant important que ha de complir el dinamòmetre és que s'ha de poder instal·lar en una àmplia gamma de tractors i d'ormejos. Es pretén que el dinamòmetre pugui ser utilitzat en tractors de les categories II i III, definides per la norma UNE 68006-1 [90], que inclouen els tractors amb potència del motor a règim nominal de 48 kW a 185 kW. Aquestes categories de tractors són les més utilitzades pels agricultors, ja els tractors de categoria I no s'utilitzen habitualment per aplicacions que requereixen potència elevada (com és el cas del llaurat o la preparació del sòl) i els de categoria IV s'utilitzen normalment amb ormejos remolcats, no suspesos al tractor.

A la Figura 3.1 es mostra un esquema amb les dimensions possibles entre els punts dels enganxalls tripuntals segons la norma UNE 68006-1 [90], per a les categories de tractors II i III.



**Figura 3.1: Distàncies entre punts dels enganxalls tripuntals en tractors de categories II i III segons la norma UNE 68006-1 [90]**

En el dinamòmetre desenvolupat, pel costat d'acoblament d'aquest amb el tractor s'estableixen les dimensions de 865 mm per l'amplada  $L$  i de 742 mm o 642 mm (2 punts de muntatge diferents segons convingui) per l'alçada  $H$ . Amb aquestes dimensions, el dinamòmetre s'adapta, per la part del tractor, a les categories II i III, tenint en compte que les barres del tractor es poden regular dins dels intervals de



dimensions establerts per a cada categoria. Per al cas de l'alçada  $H$  s'han definit dos possibles cotes de muntatge, per tal que es puguin tenir dos geometries diferents de l'enganxall segons convingui, amb diferents inclinacions per a la barra superior.

Pel costat d'acoblament del dinamòmetre amb l'ormeig, les distàncies entre punts del dinamòmetre són regulables, per tal d'adaptar-se a una àmplia gamma d'ormejos, que tenen aquestes dimensions fixes i diferents per a cada model. Un estudi de diferents ormejos comercials determina les dimensions més habituals d'aquestes distàncies (Berga [89]). En base a aquest estudi s'estableix un interval d'ajust en amplada  $L$  de 650 mm a 960 mm i un interval d'ajust en alçada del 3r punt  $H$  de 540 mm a 740 mm.

### 3.1.3. Components de força i moment a mesurar pel dinamòmetre

El principal requeriment funcional d'aquest dinamòmetre és que ha de poder mesurar totes les components de força i moment en l'enllaç entre el tractor i l'ormeig. Aquestes són les components longitudinal, vertical i transversal de la força d'enllaç, i les components de capcineig, balanceig i guinyada del moment d'enllaç. Tota aquesta informació es pot aconseguir amb un dinamòmetre que mesuri 6 forces independents, i aquestes es poden obtenir amb 6 elements de mesura de força en una direcció, com poden ser unes cèl·lules de càrrega. A partir d'aquestes 6 forces i de la geometria del dinamòmetre, que defineix la línia d'actuació de totes elles, es pot determinar el torsor d'enllaç corresponent reduït al punt que interressi en cada cas.

En la definició dels intervals de valors de les components de força i moment a mesurar per aquest dinamòmetre es contemplen les capacitats dels tractors que es pretenen assajar. Per a la definició de la força longitudinal màxima a mesurar, s'ha calculat aquesta a partir de les capacitats d'un tractor de 185 kW i uns 12000 kg de massa, que correspondrien aproximadament als valors màxims en un tractor de categoria III. Es considera un rendiment de la transmissió de 0,8 i un coeficient d'adherència roda-terra de 0,6. Llavors es conclou que la força longitudinal màxima que pot exercir aquest tractor és de 80 kN.

En la majoria dels ormejos, les components longitudinals de força que actuen sobre l'ormeig a les barres inferiors tenen el sentit d'avanç del tractor, però la component longitudinal de força de l'enganxall superior és en sentit contrari. Per aquest motiu, s'assumeix que la força total de disseny dels dos ancoratges inferiors és de 160 kN (80 kN per a cada un) i per al superior s'assumeix que és de 80 kN.

La component vertical de força màxima prevista per al disseny d'aquest dinamòmetre és de 80 kN. Aquest valor correspon a les capacitats màximes d'elevació de l'enganxall de tres punts especificades pels fabricants de tractors de categoria III. En general la càrrega d'elevació oscil·la entre el 40% i el 90% de la massa del tractor [59].

La força transversal màxima que haurà de suportar l'enganxall de tres punts ve limitada per l'adherència lateral del tractor. Així, considerant un tractor de 12000 kg, una càrrega a l'eix posterior del 60% i un coeficient d'adherència de 0,6 en resulta una força transversal màxima aproximada de 43 kN.

Amb els resultats obtinguts, i admetent un marge de seguretat en els valors determinats, per tenir en consideració possibles efectes dinàmics, el disseny es realitza per tal que el dinamòmetre pugui suportar una component longitudinal de força d'enllaç de 100 kN, una component vertical de força de 100 kN i una component transversal de força de 50 kN.

### 3.2. Descripció del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals

Un cop definits els requeriments i les consideracions, en aquest apartat es descriu el disseny final desenvolupat per al dinamòmetre per a enganxalls de tres punts.

#### 3.2.1. Descripció conceptual del dinamòmetre

L'objectiu del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals és determinar el torsor d'enllaç format per les tres components de força i les tres components de moment en les direccions de l'espai, reduït al punt central del segment definit pels punts dels dos ancoratges inferiors (punt  $O_i$  de la Figura 3.2).

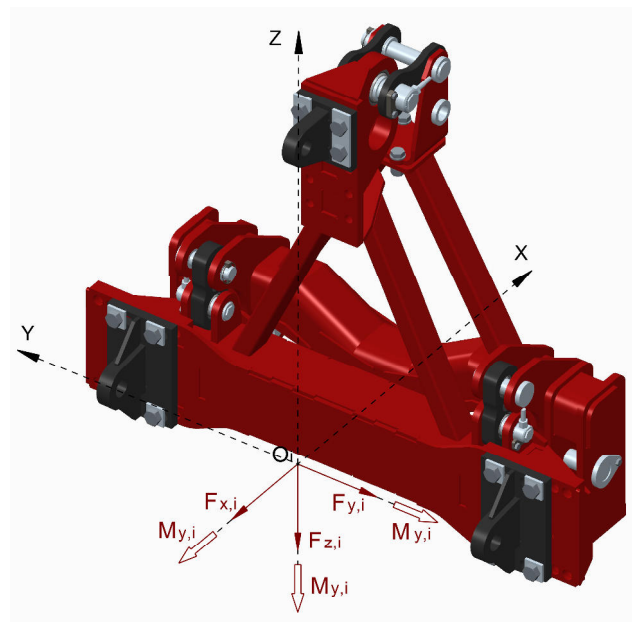


Figura 3.2: Imatge en CAD-3D del dinamòmetre tripuntal i torsor d'enllaç mesurat

Els valors màxims per a les components de força són de 100 kN per a la component longitudinal  $F_{x,i}$ , 50 kN per a la component transversal  $F_{y,i}$  i 100 kN per a la component vertical  $F_{z,i}$ . En relació a les components del moment, els valors màxims previstos per a la mesura són 20 kN·m per a la component de balanceig  $M_{x,i}$ , 80 kN·m per a la component de capcineig  $M_{y,i}$  i 40 kN·m per a la component de guinyada  $M_{z,i}$ . Tots aquests valors es mesuren tan en el sentit indicat a la Figura 3.2 com en el contrari.

El dinamòmetre proposat és del tipus de doble marc, on els elements de mesura de les forces s'instal·len entre aquests dos marcs. Un d'aquests marcs es fixa al tractor i l'altre a l'ormeig. ambdós marcs tenen forma triangular, on els vèrtexs segueixen la geometria de l'enganxall de tres punts, amb dos punts per a la part inferior i un per a la part

superior. A l'interior de la geometria triangular es deixa espai per a poder instal·lar la transmissió per a la presa de força del tractor (PTO) per als ormejos que ho requereixin.

Per a la mesura de les components de força s'utilitzen 6 cèl·lules de càrrega entre marc i marc. Aquestes són del tipus boló i mesuren únicament en una direcció radial. Aquests bolons de mesura connecten mitjançant unes bieles els dos marcs del dinamòmetre. Aquestes bieles, que consisteixen en una barra amb doble ròtula, garanteixen que l'única component de força que transmeten d'un marc a l'altre és a la vegada la que mesura el boló corresponent. Les bieles i els bolons de mesura es situen pròxims als punts d'ancoratge per obtenir una mesura representativa de les forces en aquests punts i per optimitzar la funcionalitat estructural del conjunt.

Per tal d'ajustar-se a l'àmplia gamma d'ormejos, en el marc de l'ormeig s'hi han instal·lat uns ancoratges que permeten ajustar les dimensions d'amplada i d'alçada. Ambdues dimensions es poden ajustar de forma contínua, sense discontinuïtats, gràcies a la fixació mitjançant cargols sobre forats colissos.

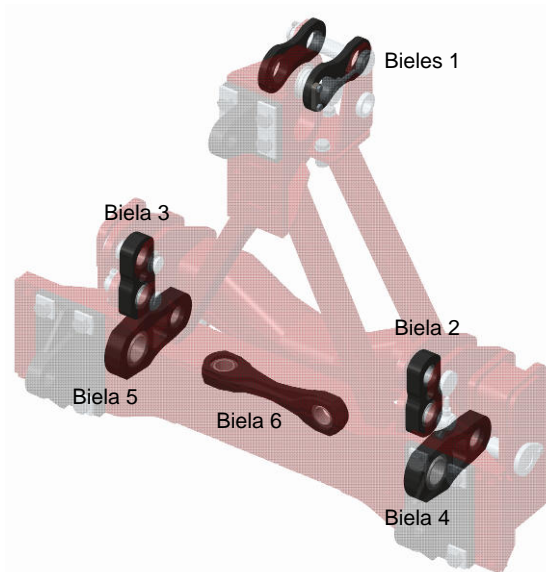
A la Figura 3.3 es mostra aquest dinamòmetre per a la mesura d'esforços en enganxalls de tres punts, un cop finalitzada la seva construcció.



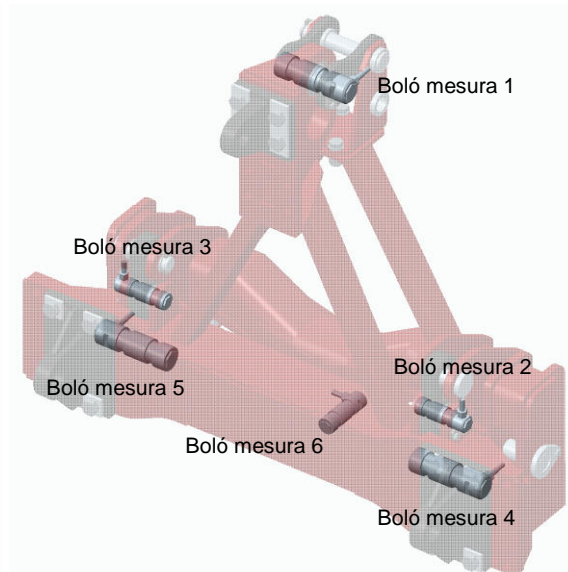
Figura 3.3: Imatge del dinamòmetre per a enganxalls de tres punts del tractor

### 3.2.2. Disposició de les bieles de connexió i dels bolons de mesura

Per tal d'assegurar que cada cèl·lula de càrrega únicament rebi la component de força que ha de mesurar, s'han dissenyat unes bieles per unir els dos marcs del dinamòmetre (Figura 3.4). Aquestes bieles consisteixen en una peça on s'hi munten als extrems unes ròtules que creen parells esfèrics en la unió entre la biela i el boló que la connecta al marc. Això assegura que la biela només treballa a tracció o compressió eliminant les altres components de força a les unions. Al tenir les 6 bieles disposades en l'orientació adequada, el moviment relatiu entre els dos marcs queda totalment restringit, però sense redundàncies, i s'obté així un sistema isostàtic.



**Figura 3.4: Bieles de connexió entre els dos marcs del dinamòmetre tripuntal**



**Figura 3.5: Disposició dels bolons de mesura d'esforços en el dinamòmetre tripuntal**

En aquest disseny s'han disposat els elements de mesura pròxims als punts d'unió del dinamòmetre amb el tractor i l'ormeig i en les direccions on aquestes forces actuen (Figura 3.5). Amb aquesta disposició es busca que la mesura de cada cèl·lula de càrrega sigui representativa de la força aplicada a cada punt d'unió de l'enganxall. Així, els bolons que mesuren en la direcció longitudinal (bolons de mesura 1, 4 i 5) estan pròxims a cada un dels ancoratges del dinamòmetre (al punt superior i als dos punts inferiors, dret i esquerra). Els dos bolons de mesura que mesuren en la component vertical (bolons de mesura 2 o 3) són pròxims als punts d'unió inferior dret i esquerra. Per últim, el boló de mesura de la component transversal de força (boló de mesura 6) s'ha situat a la part inferior del dinamòmetre de forma que està pròxim a la línia d'unió dels dos punts d'ancoratge inferiors.

Pel que fa a les orientacions dels elements de mesura de forces, aquest disseny és conceptualment similar als desenvolupats per Chaplin et al. [23], Palmer [35], o Tsiropoulos et al. [37], en el sentit que utilitzen tres elements de mesura per a la component longitudinal de força, dos per a la component vertical i un per a la component transversal. En aquests dinamòmetres, les disposicions dels elements de mesura de les forces longitudinals i verticals són també pròximes a les línies d'actuació de les forces en l'ancoratge, però la posició de la cèl·lula de càrrega que mesura la component transversal de força es situa a la part superior o central del dinamòmetre. En aquest aspecte es té una diferència important respecte a aquests dinamòmetres, doncs en el dinamòmetre que aquí es presenta aquesta mesura es realitza a la part inferior del dinamòmetre, pròxima als ancoratges inferiors.

En la construcció del dinamòmetre s'ha tingut especial cura amb les toleràncies de muntatge dels diferents components, per tal de garantir l'ajust adequat en els allotjaments dels bolons i les cotes precises per al correcte muntatge de tots els elements del dinamòmetre. Les toleràncies de muntatge són en principi un dels factors que condicionen l'aparició o no de sensibilitat creuada en les cèl·lules de càrrega d'un dinamòmetre. En el procés de soldadura de tots els components s'han garantit les precisions requerides en les cotes de muntatge, mitjançant la utilització dels utilitatges

necessaris, i per a les toleràncies de muntatge dels diferents components s'han utilitzat casquets en els allotjaments dels bolons de mesura.

### 3.2.3. Característiques dels bolons de mesura de forces

Les cèl·lules de càrrega instal·lades en el dinamòmetre són en forma de boló i mesuren la força en una única direcció radial i en els dos sentits. Els bolons utilitzats són els models LB 214 de càrrega nominal 50 kN i LB 216 de càrrega nominal 100 kN del fabricant Magtrol® (Figura 3.6). Aquests bolons de mesura disposen al seu interior d'un pont complet de galgues extensomètriques per a la mesura de l'esforç tallant a que està sotmès el boló obtenint un senyal proporcional a la càrrega aplicada.



Figura 3.6: Bolons de mesura de força Magtrol® de 50 kN i 100 kN

En el dinamòmetre s'utilitzen 3 bolons de mesura de 100 kN de força nominal ( $F_{nom}$ ) per a la mesura de la component longitudinal de força (bolons 1, 4 i 5 de la Figura 3.5). Per a la mesura de la component vertical hi ha muntats dos bolons de mesura de 50 kN i per mesurar la component transversal de força s'utilitza un altre boló de mesura de 50 kN (bolons 2, 3 i 6 de la Figura 3.5). Les característiques d'aquests bolons de mesura es mostren a la Taula 3.1.

Taula 3.1: Característiques de les cèl·lules de càrrega en forma de boló

Sobrecàrregues admissibles	150% $F_{nom}$ sense influència en la mesura 250% $F_{nom}$ requerint nou calibratge
Sobrecàrrega de ruptura	>500% $F_{nom}$
Classe de protecció	IP 66
Dimensions	LB 214: Diàmetre 35 mm; Longitud 112 mm LB 216: Diàmetre 50 mm; Longitud 161 mm
Toleràncies de muntatge	G7/h6
Impedància de pont	Entrada: 400 $\Omega$ Sortida: 350 $\Omega$
Tensió d'alimentació	de 5 a 12 V CC
Desviació del senyal a càrrega nul·la	$\pm 1\%$ FSO
Sensibilitat	1 mV/V $\pm 3\%$
Error de linealitat	< 0,25% FSO
Error de linealitat + histèresis	< 0,5% FSO
Error de repetibilitat	$\pm 0,1\%$ FSO

### 3.2.4. Optimització del disseny estructural

Una altra característica d'aquest dinamòmetre que el diferencia d'altres dissenys és que s'ha dedicat una especial atenció en l'optimització dels elements estructurals. El disseny del dinamòmetre s'ha optimitzat per tal de minimitzar la seva massa i per tal de reduir la dimensió longitudinal del dinamòmetre, amb l'objectiu de minimitzar l'efecte del propi dinamòmetre en el comportament del conjunt tractor-ormeig. En tot el procés de disseny s'han utilitzat eines CAD-3D i s'han optimitzat els components mitjançant estudis de simulació estructural per elements finits (FEM). Aquesta tasca s'ha dut a terme utilitzant el software de CAD-CAE Creo 2.0<sup>®</sup>. Aquests estudis per al desenvolupament i la optimització dels elements estructurals han estat desenvolupats per Berga [89].

Per tal de disminuir la cota longitudinal s'ha realitzat un disseny compacte de la part inferior del dinamòmetre. Aquest consisteix en disposar la biela de connexió longitudinal desplaçada respecte del punt de fixació de les barres inferiors de tractor. Amb aquesta disposició l'eix del boló per a la biela està alineat amb el boló per a fixar la barra del tractor (Figura 3.7). Aquesta disposició de les bieles desplaçades respecte al punt de fixació al tractor té l'inconvenient que cal un dimensionament estructural més reforçat que en altres dissenys exposats en l'estat de l'art i que utilitzen el disseny en forma de U invertida. De la mateixa manera, el boló superior de fixació de la barra del tercer punt és concèntric als casquets per fixar les bieles (Figura 3.8). Donat que per la part de l'ormeig hi ha els elements ajustables no s'ha pogut aplicar la mateixa solució en aquesta part.

En el procés d'optimització del disseny estructural del dinamòmetre s'han realitzat estudis per elements finits per als dos marcs i les bieles de connexió entre ells. L'acer utilitzat per construir el dinamòmetre és el S355, el qual té un límit elàstic de 355 MPa i bona soldabilitat. En el disseny s'ha considerat un factor de seguretat de 2. El resultat final del procés de disseny i optimització és un dinamòmetre amb una massa total de 220 kg i una cota longitudinal del dinamòmetre de 304 mm.

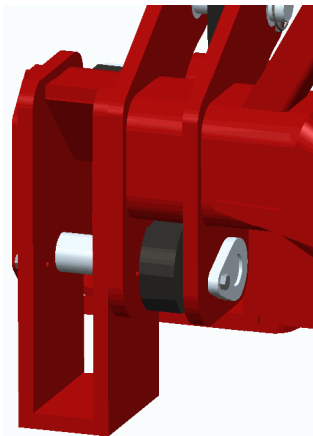


Figura 3.7: Detall de l'ancoratge inferior per a la fixació del tractor

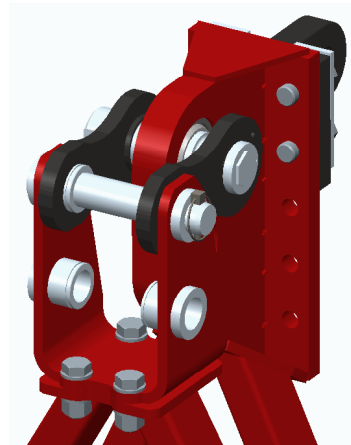
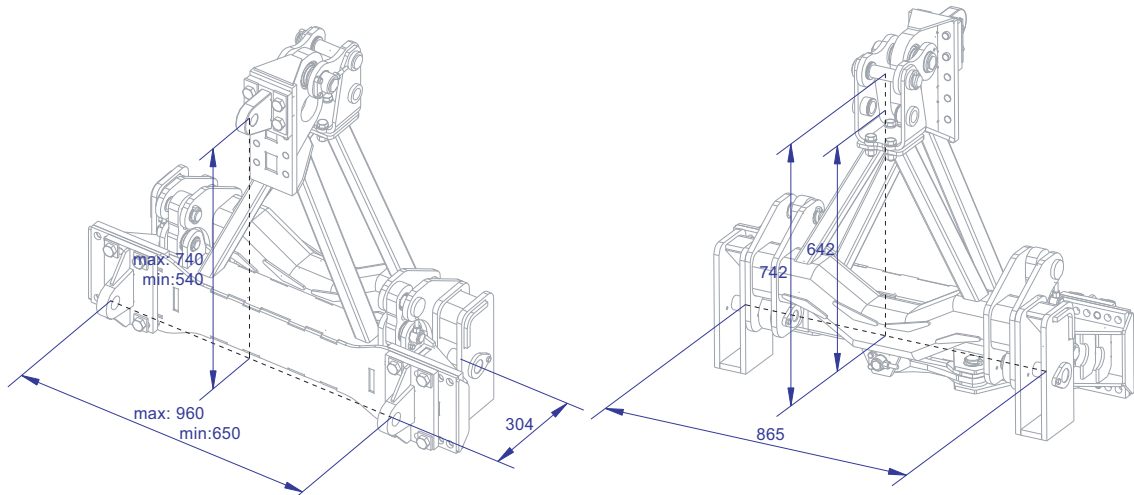


Figura 3.8: Detall de l'ancoratge superior per a la fixació del tractor

### 3.2.5. Elements d'ancoratge del dinamòmetre per al muntatge al tractor i a l'ormeig

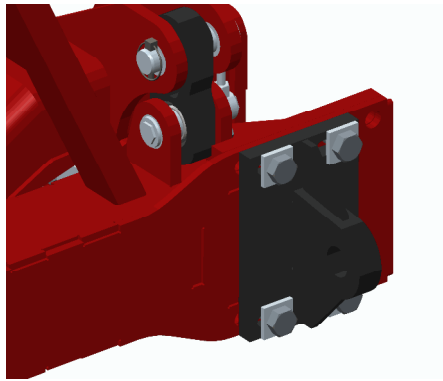
En aquest apartat es presenten les solucions constructives per a garantir el correcte muntatge d'aquest dinamòmetre tant al tractor com a l'ormeig. A la Figura 3.9 es mostren les cotes i els intervals de valors de muntatge per a instal·lar aquest al tractor i a l'ormeig.



**Figura 3.9: Dimensions característiques del dinamòmetre tripuntal per al muntatge al tractor i a l'ormeig**

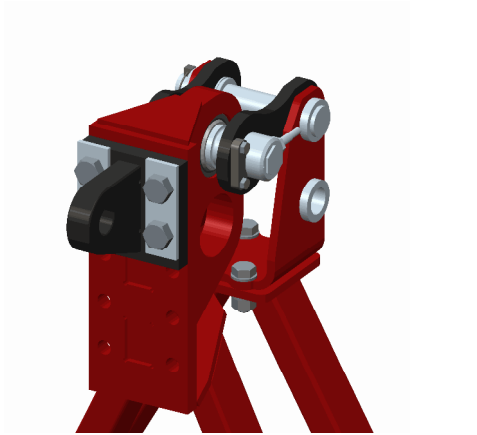
Per la part del tractor, tenint en compte que les barres de l'enganxall tripuntal del tractor ja són ajustables, s'han dissenyat d'acord amb unes dimensions vàlides tant per a tractors de categoria II com de categoria III. D'aquesta manera, s'ha definit la distància entre les unions inferiors a 865 mm. Per a que es puguin enganxar les barres inferiors s'ha deixat un ampli espai en la part inferior per a que pugui entrar la barra en l'acoblament d'aquest al dinamòmetre (Figura 3.7). Per a l'ancoratge del punt superior al tractor s'han creat dos posicions, a 642 mm i a 742 mm, per tal de situar la barra del 3r punt pròxima a la disposició que tindria en el cas que estigués fixada directament a l'ormeig, i amb la possibilitat de canviar també la posició de les bieles de connexió i el boló de mesura (Figura 3.8).

Per a la fixació de l'ormeig al dinamòmetre, s'han utilitzat en aquest uns ancoratges ajustables, per tal d'adaptar-se a la gran variabilitat de dimensions dels ormejos. Per als ancoratges inferiors, l'interval d'amplada que es pot ajustar va des de 650 mm fins a 960 mm. Aquests ancoratges es mouen de tal forma que s'ajusta l'amplada de forma contínua en tot l'interval. En el marc de l'ormeig s'han utilitzat unes bases amb forats roscats, i mitjançant uns colissos a les bases dels ancoratges es pot ajustar la seva posició (Figura 3.10).

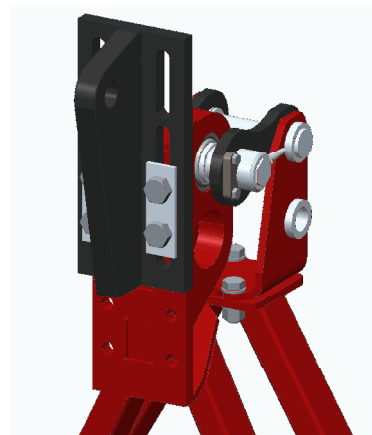


**Figura 3.10: Detall de l'ancoratge inferior per a la fixació de l'ormeig**

Per a l'ajust d'alçada del 3r punt a la part de l'ormeig es realitza un muntatge equivalent de platina amb colissos regulable en l'interval establert (Figura 3.11). La unió superior és regulable verticalment per tal d'ajustar l'alçada de l'ormeig en un interval de 540 mm fins a 740 mm. Amb l'objectiu d'incrementar l'interval, s'ha creat un altre element d'acoblament per la part superior del dinamòmetre més llarg que permet una alçada total de fins a 940 mm (Figura 3.12). Aquest element complementari s'ha creat després de realitzar una validació en camp amb un cultivador de cisells, on s'ha comprovat la necessitat de disposar d'aquest nou ancoratge (Apartat 13.2).



**Figura 3.11: Detall de l'ancoratge superior per a la fixació de l'ormeig**



**Figura 3.12: Detall de l'ancoratge superior amb element de fixació ampliat per a la fixació de l'ormeig**

Les dimensions dels bolons per a la unió amb el tractor i l'ormeig, s'han seleccionat també seguint els criteris de la norma UNE 68006-1 [90]. Així, per a la categoria III, el boló superior té un diàmetre de 31 mm i els inferiors de 37 mm. Per poder-hi fixar ormejos de categoria II, on els diàmetres corresponents són per al boló superior 25 mm i per als inferiors 28 mm, s'utilitzen uns casquets d'adaptació als forats de les orelles dels ancoratges.