



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

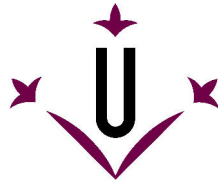
Jordi Pijuan Cases

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.



Universitat de Lleida

Tesi doctoral

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

Autor

Jordi Pijuan Cases

Directors

Dr. Miquel Nogués Aymamí

Dr. Joan Roca Enrich

Departament d'Informàtica i Enginyeria Industrial
Escola Politècnica Superior
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**

Programa de doctorat: Enginyeria i Tecnologies de la Informació

Directors de la tesi: Dr. Miquel Nogués Aymamí i Dr. Joan Roca Enrich

El Dr. Miquel Nogués Aymamí, Professor Titular d'Universitat de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida i el Dr. Joan Roca Enrich, Professor Agregat de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida

CERTIFIQUEN:

Que la memòria “Desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços entre tractors i ormejos agrícoles per a la realització d'assajos en camp” presentada per Jordi Pijuan Cases per optar al grau de Doctor s'ha realitzat sota la seva supervisió.

Lleida, 7 de juliol de 2015

AGRAÏMENTS

Voldria agrair a totes aquelles persones i entitats que han col·laborat i han fet possible la realització d'aquesta tesi doctoral.

En primer lloc, al Dr. Joan Roca Enrich i al Dr. Miquel Nogués Aymamí per la confiança dipositada durant tots aquests anys, així com per haver dirigit i donar-me la oportunitat de realitzar aquesta tesi.

Al Dr. Martí Comellas per tota la col·laboració i ajuda brindada durant tot aquest temps.

Al Jordi Berga, per haver estat involucrat en una part important del desenvolupament i la posada a punt dels equips d'aquest treball, i també al David Font que ha col·laborat activament en moltes de les tasques lligades a aquesta tesi.

Als tècnics de laboratori de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Lleida, per la seva col·laboració en el desenvolupament dels prototipus.

Al Centre d'Innovació del Sector de la Maquinària Agrícola i dels Equipaments Industrials (MAQCENRE), per haver posat a disposició bona part dels mitjans i l'equipament utilitzat en aquesta tesi. També al grup de recerca GREA Innovació Concurrent per l'acollida durant tot aquest temps.

A la Universitat de Lleida per la concessió del projecte "Disseny i implementació de sistemes i equips d'assaig destinats a la recerca i el desenvolupament de maquinària agrícola i industrial" en el marc del programa UdL-Impuls, i del qual s'ha finançat el desenvolupament d'aquesta tesi.

A tothom que, d'una manera o d'una altra, han contribuït a superar els obstacles que han sorgit en el desenvolupament d'aquesta tesi.

I com no, als de casa, perquè sé que sempre puc comptar amb ells.

RESUM

Avui en dia, en el sector de la mecanització agrària, la inversió en instrumentació i monitorització dels processos en camp permet aconseguir informació molt útil per als agricultors, utilitzada en la presa de decisions i a la optimització dels recursos. Però tot i els importants avenços, encara es disposa de poca informació referent a les forces que intervenen en la unió entre tractor i ormeig agrícola, donada la dificultat d'instal·lar elements de mesura d'esforços en l'enganxall entre els dos. El fet de disposar d'aquesta informació permetria millorar i optimitzar el disseny dels ormejos, així com estudiar les condicions d'operació del tractor per millorar el rendiment de les tasques en camp.

L'objectiu d'aquesta tesi és desenvolupar un conjunt d'equips dinamomètrics per a la mesura d'esforços en la unió entre tractors i ormejos agrícoles durant la seva operació, conjuntament amb la posada a punt d'altres sensors i el sistema d'adquisició de dades per a la realització d'assajos en camp.

Un dels equips d'estudi en aquesta tesi és un dinamòmetre per a enganxalls tripuntals, que consisteix en dos marcs units mitjançant cèl·lules de càrrega i que s'instal·la entre el tractor i l'ormeig per a la mesura de les components de força i moment en la unió. Els altres dinamòmetres d'estudi són uns enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats, que consisteixen en uns enganxalls comercials degudament modificats i instrumentats amb galgues extensomètriques per mesurar les forces en el punt d'unió de l'enganxall.

En el desenvolupament d'aquests dinamòmetres es realitza la modelització matemàtica que permet, a partir dels senyals mesurats pels equips, determinar les components de força i moment d'interès en la mesura. També, per al cas del dinamòmetre tripuntal, es realitza un estudi de l'efecte que té el propi equip en el comportament del tractor i l'ormeig. Posteriorment, es realitzen assajos de validació per a comprovar el correcte funcionament dels dinamòmetres i identificar les principals fonts d'errors, mitjançant l'aplicació d'un ampli ventall d'estats de càrrega amb cilindres hidràulics en una bancada d'assaigs.

En aquests equips de mesura, donada la seva complexitat, un dels principals problemes és que apareix sensibilitat creuada, que consisteix en que si s'aplica una força en una direcció concreta, els elements que mesuren en direccions perpendiculars experimenten un senyal, quan idealment aquests haurien de ser zero.

Aquesta problemàtica es corregeix habitualment millorant el disseny del propi dinamòmetre. En aquesta tesi, a més d'optimitzar el disseny dels equips de mesura d'esforços, es suggereix que, mitjançant les dades d'assajos experimentals de validació, es poden desenvolupar models més acurats que compensin les sensibilitats creuades.

Els models d'ajust proposats mostren que és possible compensar bona part dels efectes indesitjats de sensibilitat creuada mitjançant un tractament senzill de les dades obtingudes amb els assajos experimentals de validació dels dinamòmetres.

RESUMEN

Hoy en día, en el sector de la mecanización agraria, la inversión en instrumentación y monitorización de los procesos en campo permite obtener información muy útil para los agricultores, utilizada en toma de decisiones y a la optimización de los recursos. Pero a pesar de los importantes avances, todavía se dispone de poca información referente a las fuerzas que intervienen en la unión entre tractor y apero agrícola, dada la dificultad de instalar elementos de medida de esfuerzos en el enganche entre los dos. El hecho de disponer de esta información permitiría mejorar y optimizar el diseño de los aperos, así como estudiar las condiciones de operación del tractor para mejorar el rendimiento de las tareas en campo.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un conjunto de equipos dinamométricos para la medida de esfuerzos en la unión entre tractores y aperos agrícolas durante su operación, conjuntamente con la puesta a punto de otros sensores y el sistema de adquisición de datos para la realización de ensayos en campo.

Uno de los equipos de estudio en esta tesis es un dinamómetro para enganches tripuntales, que consiste en dos marcos unidos mediante células de carga y que se instala entre el tractor y el apero para la medida de las componentes de fuerza y momento en la unión. Los otros dinamómetros de estudio son unos enganches dinamométricos para aperos remolcados, que consisten en unos enganches comerciales debidamente modificados e instrumentados con galgas extensométricas para medir las fuerzas en el punto de unión del enganche.

En el desarrollo de estos dinamómetros se realiza la modelización matemática que permite, partiendo de las señales medidas por los equipos, determinar las componentes de fuerza y momento de interés en la medida. También, para el caso del dinamómetro tripuntal, se realiza un estudio del efecto que tiene el propio equipo en el comportamiento del tractor y el apero. Posteriormente, se realizan ensayos de validación para comprobar el correcto funcionamiento de los dinamómetros e identificar las principales fuentes de errores, mediante la aplicación de una amplia variedad de estados de carga con cilindros hidráulicos en un banco de ensayos.

En estos equipos de medida, dada su complejidad, uno de los principales problemas es que aparece sensibilidad cruzada, que consiste en que si se aplica una fuerza en una dirección concreta, los elementos que miden en direcciones perpendiculares experimentan una señal, cuando idealmente estas tendrían que ser cero.

Esta problemática se corrige habitualmente mejorando el diseño del propio dinamómetro. En esta tesis, además de optimizar el diseño de los equipos de medida de fuerzas, se sugiere que, mediante los datos de ensayos experimentales de validación, se pueden desarrollar modelos más precisos que compensen las sensibilidades cruzadas.

Los modelos de ajuste propuestos muestran que es posible compensar en buena medida los efectos no deseados de sensibilidad cruzada mediante un tratamiento simple de los datos obtenidos en los ensayos experimentales de validación de los dinamómetros.

SUMMARY

Nowadays, in the area of agricultural mechanization, the investment in instrumentation and field process monitoring provides valuable information to farmers, supporting decision making and resources optimization. Although significant advances have been achieved, there is still little information on the forces involved in the joint between tractors and agricultural implements due to the difficulty of installing load measuring devices between them. Such information would help to improve and to optimize the design of implements, and to analyze the system operating conditions in order to improve its task yield.

The objective of this thesis is to develop a set of dynamometric devices for measuring loads between tractors and agricultural implements during their operation, and also with the set up of other sensors and the data acquisition system for performing field tests.

One of the studied dynamometers in this thesis is a three-point hitch dynamometer, which consists of two frames connected by load cells and which is installed between the tractor and the implement for measuring the components of force and momentum at the joint. The other studied dynamometers are dynamometric hitches for towed implements, which consist of commercial hitches that have been properly modified and instrumented with strain gauges to measure forces at the hitch point.

The development of these dynamometers includes the mathematical modeling, obtaining from the measured signals the components of force and momentum at the joint. Also, in the case of three-point hitch dynamometer, a study of the effect of the dynamometer itself in the performance of tractor and implement has been realized. Afterwards, validation tests have been performed to verify the proper operation of the dynamometers and to identify the main error sources, applying a wide range of load conditions using hydraulic cylinders in a test bench.

In this kind of measuring devices, due to their complexity, one of the main problems that appears is cross sensitivity, which means that, if a force is applied in a certain direction, the elements that measure in perpendicular directions show significant signals, when these ones should ideally be zero.

This problem is usually corrected by improving the design of the dynamometer. In this thesis, in addition to optimize the design of the measuring forces devices, it is also suggested that, using data from validation experimental tests, more accurate models can be developed to compensate cross sensitivities.

Such refined models show that it is possible to largely compensate undesired cross sensitivity effects, by a simple data processing from the experiments carried out for the validation of the dynamometers.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Algunes tendències actuals en la mecanització agrària	1
1.2. Interès del coneixement de les forces entre tractor i ormeig	2
1.3. Reptes tecnològics derivats.....	4
1.4. Objectius de la tesi	5
1.4.1. Objectius generals.....	5
1.4.2. Objectius específics	6
2. ESTAT DE L'ART EN EQUIPS PER A LA MESURA DE FORCES EN TRACTORS I ORMEJOS AGRÍCOLES	7
2.1. Elements utilitzats en el desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles.....	7
2.1.1. Galgues extensomètriques en la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles.....	7
2.1.2. Cèl·lules de càrrega en la mesura d'esforços en tractors i ormejos agrícoles.....	10
2.2. Dinamòmetres per a enganxalls de tres punts.....	11
2.2.1. Dinamòmetres amb un marc	11
2.2.2. Dinamòmetres amb doble marc	14
2.2.3. Dinamòmetres basats en la modificació de l'enganxall tripuntal	17
2.3. Dinamòmetres per a enganxalls d'un punt per a ormejos remolcats	21
2.4. Sistemes per a la mesura d'esforços en eines de treball del sòl.....	23
2.5. Aplicacions i tipus d'assajos realitzats amb dinamòmetres per a enganxalls entre tractors i ormejos agrícoles	26
2.5.1. Estudi del comportament del conjunt tractor-ormeig	26
2.5.1.1. Estudi dels requeriments de força i eficiència en la tracció.....	26
2.5.1.2. Estudi de la distribució de càrrega en els eixos i del llast.....	28
2.5.1.3. Anàlisi de les vibracions i resposta dinàmica en tractors i ormejos	29
2.5.1.4. Estabilitat direccional i forces transversals.....	30
2.5.2. Estudi de les característiques del sòl i la qualitat del llaurat	31
2.5.3. Estudis per al balanç d'energia i els fluxos de potència	31
2.5.4. Caracterització espacial de paràmetres en parcel·la.....	33
3. DESENVOLUPAMENT DEL DINAMÒMETRE PER A ENGANXALLS TRIPUNTALS	37
3.1. Consideracions i requeriments del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals.....	37
3.1.1. Tipologia del dinamòmetre	37
3.1.2. Tipus de tractors i ormejos on s'utilitza el dinamòmetre.....	38
3.1.3. Components de força i moment a mesurar pel dinamòmetre	39
3.2. Descripció del dinamòmetre per a enganxalls tripuntals	40
3.2.1. Descripció conceptual del dinamòmetre.....	40
3.2.2. Disposició de les bieles de connexió i dels bolons de mesura.....	41
3.2.3. Característiques dels bolons de mesura de forces.....	43
3.2.4. Optimització del disseny estructural.....	44
3.2.5. Elements d'ancoratge del dinamòmetre per al muntatge al tractor i a l'ormeig	45

4. MODELITZACIÓ MECÀNICA DEL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL	47
4.1. Consideracions per al model mecànic del conjunt tractor-dinamòmetre-ormeig	47
4.2. Model mecànic del dinamòmetre tripuntal.....	50
4.2.1. Descripció del model mecànic del dinamòmetre tripuntal.....	50
4.2.2. Equacions del model del dinamòmetre tripuntal.....	52
4.2.3. Consideracions en les equacions del model del dinamòmetre tripuntal.....	53
4.2.4. Equacions del model del dinamòmetre tripuntal en forma matricial	54
4.2.5. Equacions per al càlcul del torsor d'enllaç entre sòlids	58
4.2.5.1. Torsor d'enllaç entre els dos marcs del dinamòmetre.....	59
4.2.5.2. Torsors d'enllaç de les forces als punts d'unió de l'ormeig i del tractor	59
4.2.6. Relació entre els torsors d'enllaç amb el tractor i amb l'ormeig	61
5. INFLUÈNCIA DEL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL EN EL COMPORTAMENT DEL TRACTOR	63
5.1. Consideracions per a l'estudi de la influència del dinamòmetre.....	63
5.2. Procediment en l'estudi de la influència del dinamòmetre	63
5.3. Model mecànic del tractor per a l'estudi de les reaccions en les rodes.....	64
5.3.1. Reducció del sistema de forces i moments als punts d'estudi.....	67
5.3.2. Càlcul de les reaccions a les rodes del tractor	68
5.4. Casos d'estudi particulars plantejats per analitzar la influència del dinamòmetre	70
5.4.1. Model de tractor i característiques	70
5.4.2. Tipus d'ormejos i característiques.....	71
5.5. Resultats en l'estudi de l'efecte del dinamòmetre.....	75
5.6. Conclusions de l'efecte del dinamòmetre en les reaccions en el tractor.....	80
6. VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DEL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL	81
6.1. Objectius dels assajos experimentals de validació.....	81
6.2. Procediment dels assajos experimentals	81
6.2.1. Descripció de les configuracions d'assaig	82
6.2.2. Seqüència d'aplicació de les forces en els assajos experimentals.....	83
6.3. Requeriments dels assajos experimentals	86
6.4. Equips utilitzats en els assajos experimentals	86
6.5. Muntatges per a la realització dels assajos experimentals	91
6.6. Tractament de les dades dels assajos experimentals	95
6.6.1. Determinació dels valors de referència dels senyals en els assaigs	96
6.6.2. Càlcul dels valors de forces i moments teòricament aplicats.....	97
6.7. Estudi de l'estabilitat de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre.....	97
6.7.1. Determinació dels errors associats a cada boló de mesura.....	98
6.7.2. Resultats de l'estudi dels errors en els bolons de mesura	100
6.8. Validació del model teòric del dinamòmetre tripuntal.....	101
6.9. Validació del comportament dels bolons de mesura en el dinamòmetre	105

7. MODELS D'AJUST EXPERIMENTAL PER A LA MESURA AMB EL DINAMÒMETRE TRIPUNTAL.....	109
7.1. Descripció dels models d'ajust experimental per al dinamòmetre tripuntal.....	109
7.2. Procediment per a la determinació dels models d'ajust experimental.....	112
7.2.1. Determinació dels coeficients en els models d'ajust experimental	112
7.2.2. Estadístics per quantificar la bondat del model d'ajust experimental	113
7.3. Desenvolupament i validació dels models d'ajust experimental	114
7.3.1. Model 1: Model per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig mitjançant les equacions del model mecànic teòric del dinamòmetre i els models ajustats dels bolons de mesura.....	114
7.3.2. Model 2: Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals dels bolons que intervenen teòricament en cada mesura	119
7.3.3. Model 3: Model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir de tots els senyals dels bolons de mesura	122
7.4. Conclusions dels models d'ajust experimentals desenvolupats per al dinamòmetre tripuntal	126
8. DESENVOLUPAMENT DELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS PER A ORMEJOS REMOLCATS.....	127
8.1. Consideracions i requeriments en els enganxalls dinamomètrics.....	127
8.1.1. Concepte de dinamòmetre	127
8.1.2. Selecció dels enganxalls comercials per al desenvolupament dels dinamòmetres	127
8.1.3. Components de força i valors màxims a mesurar	128
8.2. Metodologia conceptual del procés de mesura	129
8.2.1. Procediment per a la mesura de les components de força mitjançant les deformacions en l'enganxall	129
8.2.2. Configuracions amb galgues extensomètriques per a la mesura de les components d'esforç.....	133
8.2.2.1. Mesura del moment flector amb ponts de mesura	135
8.2.2.2. Mesura de l'esforç axial amb ponts de mesura.....	136
8.3. Anàlisi i quantificació dels valors de deformació previstos	137
8.3.1. Determinació de les característiques del material.....	137
8.3.2. Desenvolupament del model per a les simulacions	138
8.3.3. Estudi inicial de les deformacions en l'enganxall	140
8.3.4. Modificacions per a l'increment de la sensibilitat en les mesures.....	141
8.3.5. Resultats de l'estudi de deformacions amb els enganxalls modificats	142
8.4. Descripció del disseny final dels enganxalls dinamomètrics.....	143
8.4.1. Descripció de les característiques principals dels enganxalls dinamomètrics	143
8.4.2. Descripció de les connexions dels ponts de mesura	144
8.4.2.1. Tipus de configuracions en pont de mesura.....	144
8.4.2.2. Característiques de les galgues extensomètriques	145
8.4.2.3. Configuració dels ponts de mesura per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.....	146
8.4.2.4. Configuració dels ponts de mesura per als enganxalls dinamomètrics d'anella i de bola amb base de 8 forats.....	147
8.4.2.5. Procediment en la instal·lació de les galgues extensomètriques.....	149

9. MODELITZACIÓ MECÀNICA DELS ENGANXALLS	
DINAMOMÈTRICS.....	151
9.1. Model teòric per al càlcul de les forces a partir dels senyals dels ponts de mesura.....	151
9.1.1. Descripció del model teòric.....	151
9.1.2. Consideracions i simplificacions en el model teòric.....	152
9.1.3. Equacions per a la determinació de les deformacions a partir dels senyals.....	153
9.1.4. Equacions per a la determinació de les components de força.....	156
9.1.5. Model teòric per al càlcul de les forces sobre l'enganxall.....	158
9.2. Validació del model teòric mitjançant simulació per elements finits.....	159
9.2.1. Procediment per a la validació del model teòric mitjançant simulació.....	159
9.2.2. Definició del model i simulacions realitzades.....	160
9.2.3. Valors de deformació obtinguts en les simulacions.....	161
9.2.4. Resultats de força mesurada a partir de les dades de les simulacions.....	162
9.2.5. Conclusions en la validació del model teòric mitjançant simulació per elements finits.....	165
10. VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DELS ENGANXALLS	
DINAMOMÈTRICS.....	167
10.1. Objectius dels assajos experimentals de validació.....	167
10.2. Procediment en els assajos experimentals.....	167
10.2.1. Descripció de les configuracions d'assaig.....	167
10.2.2. Seqüències d'aplicació de força en els assajos experimentals.....	168
10.3. Requeriments en els assajos experimentals.....	170
10.4. Equips utilitzats en els assajos experimentals.....	170
10.5. Muntatges per a la realització dels assajos experimentals.....	171
10.6. Tractament de les dades dels assajos experimentals.....	173
10.6.1. Càlcul dels valors de referència dels senyals en els assajos.....	173
10.6.2. Determinació de la força aplicada a l'enganxall dinamomètric en els assajos.....	174
10.7. Estudi de l'estabilitat dels ponts de mesura.....	174
10.8. Validació del model teòric dels enganxalls dinamomètrics.....	176
10.8.1. Resultats de validació del model teòric amb els assajos experimentals....	177
10.8.2. Anàlisi de les desviacions en la mesura amb el model teòric.....	180
10.8.3. Estudis per a la identificació dels errors en la mesura amb el model teòric.....	184
10.8.4. Conclusions en la validació del model teòric.....	188
11. MODELS D'AJUST EXPERIMENTAL PER A LA MESURA AMB ELS ENGANXALLS DINAMOMÈTRICS.....	189
11.1. Descripció dels models d'ajust experimental per als enganxalls dinamomètrics.....	189
11.2. Desenvolupament i validació dels models d'ajust experimental.....	190
11.2.1. Model 1: Model d'ajust experimental basat en el model teòric.....	190
11.2.2. Model 2: Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats.....	194
11.2.3. Model 3: Model d'ajust experimental mitjançant tots els senyals mesurats amb combinació dels ponts de mesura d'esforç axial.....	197

11.3. Conclusions dels models d'ajust experimental analitzats per als enganxalls dynamomètrics	201
12. INSTRUMENTACIÓ COMPLEMENTÀRIA PER ALS ASSAJOS EN CAMP	203
12.1. Equips i sensors complementaris per als assajos en camp.....	203
12.1.1. Equip de posicionament GNSS.....	203
12.1.2. Inclínòmetres per a la mesura dels angles del tractor	205
12.1.3. Inclínòmetre per a la mesura de l'angle del dinamòmetre tripuntal	205
12.1.4. Sensor de profunditat de treball	206
12.1.5. Sensor de parell i velocitat angular per a la presa de força del tractor	207
12.2. Equipament per a l'adquisició de dades.....	208
12.2.1. Funcions, requeriments i consideracions en els equips utilitzats en l'adquisició	209
12.2.2. Equip d'adquisició de dades	210
12.2.3. Targetes d'adquisició de dades	211
12.2.4. Caixa de connexions	213
12.2.5. Programació de l'equipament per a l'adquisició i el tractament de dades.....	214
12.2.5.1. Descripció del programa principal.....	215
12.2.5.2. Subprogrames d'adquisició de dades.....	217
12.2.5.3. Subprogrames de tractament de dades.....	218
12.2.5.4. Subprogrames de guardat de dades.....	220
12.2.5.5. Subprogrames de visualització en pantalla.....	221
13. ASSAJOS EXPERIMENTALS EN CAMP	223
13.1. Objectius dels assajos experimentals en camp	223
13.2. Assaig amb cultivador de cisells.....	223
13.2.1. Condicions de l'assaig per al cultivador de cisells	224
13.2.2. Resultats per al cultivador de cisells.....	225
13.3. Assaig amb rotocultivador	227
13.3.1. Condicions de l'assaig per al rotocultivador.....	227
13.3.2. Resultats per al rotocultivador	228
13.4. Assaig amb màquina sembradora	231
13.4.1. Condicions de l'assaig per a la màquina sembradora	231
13.4.2. Resultats per a la màquina sembradora.....	233
13.4.2.1. Torsor d'enllaç mesurat a l'ormeig.....	233
13.4.2.2. Resultats de tensions en la rella instrumentada	234
13.5. Conclusions en la posada a punt dels equipaments	236
14. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR.....	239
14.1. Conclusions.....	239
14.1.1. Conclusions de l'estat de l'art en dinamòmetres per a tractors i ormejos	239
14.1.2. Conclusions del desenvolupament del dinamòmetre tripuntal	239
14.1.3. Conclusions de la validació experimental del dinamòmetre tripuntal	240
14.1.4. Conclusions del desenvolupament dels enganxalls dynamomètrics	241
14.1.5. Conclusions de la validació experimental dels enganxalls dynamomètrics	242
14.1.6. Conclusions del desenvolupament de la instrumentació per als assajos en camp.....	242

14.2. Treball futur.....	243
14.2.1. Treball futur per al dinamòmetre tripuntal	243
14.2.2. Treball futur per als enganxalls dinamomètrics	243
14.2.3. Treball futur per a la instrumentació per als assajos en camp.....	244
15. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	245

ÍNDEX DE TAULES

Taula 3.1: Característiques de les cèl·lules de càrrega en forma de boló	43
Taula 4.1: Dimensions del marc del dinamòmetre de l'ormeig. Dimensions en mm.....	51
Taula 4.2: Dimensions del marc del dinamòmetre del tractor. Dimensions en mm.....	51
Taula 4.3: Equacions d'equilibri en el marc del dinamòmetre de l'ormeig	53
Taula 4.4: Equacions d'equilibri en el marc del dinamòmetre del tractor.....	53
Taula 4.5: Torsor d'enllaç entre els dos marcs del dinamòmetre a partir de les forces mesurades per les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre.....	59
Taula 4.6: Torsor d'enllaç a l'ormeig a partir de les forces als punts d'unió de l'ormeig	60
Taula 4.7: Torsor d'enllaç al tractor a partir de les forces als punts d'unió del tractor..	60
Taula 4.8: Torsor d'enllaç a l'ormeig (punt O_i) a partir del torsor d'enllaç al dinamòmetre.....	60
Taula 4.9: Torsor d'enllaç al tractor (punt O_t) a partir del torsor d'enllaç al dinamòmetre.....	60
Taula 4.10: Equacions de les components del torsor d'enllaç del tractor en funció de les del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	61
Taula 4.11: Equacions del torsor d'enllaç del tractor en funció del torsor d'enllaç a l'ormeig per al dinamòmetre en la disposició habitual de funcionament (forces en kN i moments en kN·m)	61
Taula 5.1: Equacions per a la reducció de les components del pes per al càlcul de les reaccions a les rodes del tractor.....	67
Taula 5.2: Equacions per a la reducció del torsor d'enllaç a l'enganxall de tres punts per al càlcul de les reaccions a les rodes del tractor.....	68
Taula 5.3: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents a F_z	68
Taula 5.4: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents a M_x	69
Taula 5.5: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents M_y	69
Taula 5.6: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents a F_x	69
Taula 5.7: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents a F_y	69
Taula 5.8: Equacions per al càlcul de les reaccions en les rodes del tractor corresponents a M_z	70
Taula 5.9: Dimensions principals i masses en buit i màximes per al tractor JD 6910 ...	71
Taula 5.10: Dades de masses màximes del llast per al tractor JD 6910	71
Taula 5.11: Dades per al cas d'estudi sense ormeig	72
Taula 5.12: Dades per al cas d'estudi de la sembradora en transport.....	73
Taula 5.13: Dades per al cas d'estudi del cultivador de cisells	73
Taula 5.14: Dades per al cas d'estudi del subsolador	74
Taula 5.15: Dades per al cas d'estudi del subsolador amb roda de recolzament.....	74
Taula 5.16: Dades per al cas d'estudi de l'arada de volteig	75
Taula 6.1: Posició dels ancoratges inferiors en els assajos experimentals de validació.	83
Taula 6.2: Posició de l'ancoratge superior en els assajos experimentals de validació ...	83
Taula 6.3: Configuracions d'assajos per a l'estudi particular de cada un dels bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal	83

Taula 6.4: Característiques de les cèl·lules de càrrega per als cilindres hidràulics.....	89
Taula 6.5: Dades del full de calibratge de les cèl·lules de càrrega per als cilindres hidràulics.....	89
Taula 6.6: Error relatiu màxim per a cada factor analitzat per als bolons de mesura del dinamòmetre tripuntal.....	100
Taula 6.7: Rectes característiques de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre segons les dades del full de calibratge del fabricant (forces en kN i senyals en V/V).....	102
Taula 6.8: Model teòric per al càlcul de les components del torsor d'enllaç a l'ormeig a partir dels senyals dels bolons de mesura (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V).....	102
Taula 7.1: Models d'ajust experimental per als bolons de mesura (forces en kN i senyals en V/V).....	114
Taula 7.2: Valors de força inicial de cada boló de mesura en els models d'ajust experimental per als bolons de mesura (forces en kN).....	115
Taula 7.3: Coeficients per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura ..	115
Taula 7.4: Estadístics per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura ..	115
Taula 7.5: Model 1 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V).....	117
Taula 7.6: Model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V).....	119
Taula 7.7: Coeficients del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	120
Taula 7.8: Estadístics del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	120
Taula 7.9: Model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig (forces en kN, moments en kN·m i senyals en V/V).....	123
Taula 7.10: Coeficients del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	123
Taula 7.11: Estadístics del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	124
Taula 8.1: Equacions per a la relació de les tensions en els punts de mesura P_1 i P_2 i les tensions de cada component d'esforç en la secció d'estudi	132
Taula 8.2: Equacions per a la relació de les tensions en els punts de mesura P_3 i P_4 i les tensions de cada component d'esforç en la secció d'estudi	133
Taula 8.3: Característiques de les galgues extensomètriques de doble graella en paral·lel	146
Taula 8.4: Característiques de les galgues extensomètriques de doble graella en forma de T.....	146
Taula 9.1: Paràmetres dels enganxalls dinamomètrics.....	152
Taula 9.2: Equacions del model teòric per al càlcul de les components de força en els enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)	158
Taula 9.3: Deformacions unitàries corresponents a les graelles de mesura obtingudes en les simulacions per elements finits en cada un dels enganxalls dinamomètrics i per al valor màxim de les tres components de força a mesurar (Deformacions en $\mu\text{m/m}$).....	161
Taula 9.4: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.....	162
Taula 9.5: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats.....	163
Taula 9.6: Resultats de la simulació per al càlcul de les forces mitjançant el model teòric en l'enganxall dinamomètric d'anella	164
Taula 10.1: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.....	175

Taula 10.2: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	175
Taula 10.3: Errors dels diferents punts de mesura en l'enganxall dinamomètric d'anella	175
Taula 10.4: Equacions del model teòric per al càlcul de les components de força en els enganxalls dinamomètrics amb compensació dels senyals a càrrega nul·la (forces en kN i senyals en V/V)	176
Taula 10.5: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	180
Taula 10.6: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	180
Taula 10.7: Senyals mesurats en cada pont per a la força màxima en cada assaig per a l'enganxall dinamomètric d'anella	181
Taula 10.8: Valors d'error en l'estimació de la força mesurada per al cas d'un error simulat en cada galga extensomètrica per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	185
Taula 10.9: Valors d'error en l'estimació de la força mesurada per als casos amb desviacions en el mecanitzat del forat posterior per a l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	186
Taula 11.1: Model 1 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)	190
Taula 11.2: Coeficients per al model 1 dels enganxalls dinamomètrics.....	190
Taula 11.3: Estadístics per al model 1 dels enganxalls dinamomètrics.....	191
Taula 11.4: Model 2 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)	194
Taula 11.5: Coeficients per al model 2 dels enganxalls dinamomètrics.....	194
Taula 11.6: Estadístics per al model 2 dels enganxalls dinamomètrics.....	195
Taula 11.7: Model 3 dels enganxalls dinamomètrics (forces en kN i senyals en V/V)	197
Taula 11.8: Coeficients per al model 3 dels enganxalls dinamomètrics.....	198
Taula 11.9: Estadístics per al model 3 dels enganxalls dinamomètrics.....	198
Taula 12.1: Característiques tècniques de l'equip de posicionament GNSS NovAtel [®] SMART-AG	204
Taula 12.2: Característiques tècniques del sensor d'inclinació IFM [®] CR2102.....	205
Taula 12.3: Característiques tècniques del sensor d'inclinació Penny+Giles [®] STT 280/60/P2	206
Taula 12.4: Característiques tècniques del sensor d'ultrasons Pepperl+Fuchs [®] UC2000-30GM-IUR2-V15	207
Taula 12.5: Taula de característiques del sensor de parell Magtrol TF 215.....	208
Taula 12.6: Resum dels requeriments en els senyals d'entrada, les magnituds a mesurar i el mode de visualització en pantalla.....	210

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 2.1: Esquema d'un EOR. Disposa de 3 ponts de mesura amb galgues extensomètriques per determinar dues components de força i una component de moment [11]	8
Figura 2.2: Dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Scholtz [5]	12
Figura 2.3: Dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Reid et al. [3]	12
Figura 2.4: Esquema del dinamòmetre tripuntal desenvolupat per Bowers et al. [4].....	12
Figura 2.5: Esquema del dinamòmetre desenvolupat per Al-Jalil et al. [6].....	13
Figura 2.6: Esquema del dinamòmetre desenvolupat per Kheiralla et al. [19].....	13
Figura 2.7: Dinamòmetre tripuntal d'Alimardani et al. [7]	14
Figura 2.8: Dinamòmetre desenvolupat per Pang [33].....	14
Figura 2.9: Esquema del dinamòmetre de Chaplin et al. [23]	15
Figura 2.10: Dinamòmetre de Thomson i Shinnars [31]	15
Figura 2.11: Dinamòmetre per a enganxalls de tres punts de Palmer [35].....	16
Figura 2.12: Dinamòmetre tripuntal proposat per Knechtges [36].....	16
Figura 2.13: Dinamòmetre desenvolupat per Tsiropoulos et al. [37]	16
Figura 2.14: Dinamòmetre desenvolupat per Askari et al. [29].....	16
Figura 2.15: Dinamòmetre desenvolupat per Johnson i Voorhees [9]	17
Figura 2.16: Dinamòmetre desenvolupat per Garner et al. [10]	17
Figura 2.17: Dinamòmetre desenvolupat per McLaughlin et al. [25]	18
Figura 2.18: Dinamòmetre desenvolupat per Bentaher et al. [26].....	18
Figura 2.19: Dinamòmetre desenvolupat per Cupera et al. amb un ormeig muntat [27]	19
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]	19
Figura 2.21: Dinamòmetre desenvolupat per Al-Suhaibani i Ghaly [38].....	20
Figura 2.22: Sistema de mesura de forces desenvolupat per O'Dogherty [8]	21
Figura 2.23: Dinamòmetre desenvolupat per Godwin et al. i sistema de calibratge utilitzat [20].....	22
Figura 2.24: Dinamòmetre desenvolupat per Chen et al. [17].....	22
Figura 2.25: Dinamòmetre desenvolupat per Chen et al. en un assaig en camp [17].....	22
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]	23
Figura 2.27: Barra de tir dinamomètrica desenvolupada per Al-Suhaibani i Ghaly [38].....	23
Figura 2.28: Equip per a la mesura de la compactació del sòl desenvolupat per Andrade et al. [30]	23
Figura 2.29: Dispositiu per a la mesura de la compactació del sòl desenvolupat per	23
Figura 2.30: Arada instrumentada per a la mesura de forces desenvolupada per Girma [40].....	24
Figura 2.31: Equip per a l'assaig d'arades d'Owende i Ward en un contenidor de terra [41].....	24
Figura 2.32: Ormeig dinamomètric per a l'assaig d'eines de treball del sòl desenvolupat per Kasisira i du Plessis [43].....	25
Figura 2.33: Vehicle dinamomètric per a l'assaig de la potència en tractors [56]	28
Figura 2.34: Tractor instrumentat utilitzat per Freeland et al. [81]	32
Figura 2.35: Instrumentació desenvolupada per a petits tractors per Freeland et al. [82].....	32

Figura 2.36: Tractor instrumentat de Yahya et al. [88].....	34
Figura 3.1: Distàncies entre punts dels enganxalls tripuntals en tractors de categories II i III segons la norma UNE 68006-1 [90].....	38
Figura 3.2: Imatge en CAD-3D del dinamòmetre tripuntal i torsor d'enllaç mesurat	40
Figura 3.3: Imatge del dinamòmetre per a enganxalls de tres punts del tractor.....	41
Figura 3.4: Bieles de connexió entre els dos marcs del dinamòmetre tripuntal.....	42
Figura 3.5: Disposició dels bolons de mesura d'esforços en el dinamòmetre tripuntal..	42
Figura 3.6: Bolons de mesura de força Magtrol [®] de 50 kN i 100 kN	43
Figura 3.7: Detall de l'ancoratge inferior per a la fixació del tractor.....	44
Figura 3.8: Detall de l'ancoratge superior per a la fixació del tractor	44
Figura 3.9: Dimensions característiques del dinamòmetre tripuntal per al muntatge al tractor i a l'ormeig	45
Figura 3.10: Detall de l'ancoratge inferior per a la fixació de l'ormeig	46
Figura 3.11: Detall de l'ancoratge superior per a la fixació de l'ormeig	46
Figura 3.12: Detall de l'ancoratge superior amb element de fixació ampliat per a la fixació de l'ormeig	46
Figura 4.1: Diagrama dels diferents sòlids i sistemes de referència	48
Figura 4.2: Seqüència i angles de rotació d'orientació per a la definició de l'orientació dels elements del sistema mecànic.....	49
Figura 4.3: Angles de capcineig i balanceig per al tractor	49
Figura 4.4: Angle de capcineig del dinamòmetre tripuntal quan el balanceig és nul i angle de la barra superior de l'enganxall de tres punts del tractor	49
Figura 4.5: Diagrama de sòlid lliure del marc del dinamòmetre corresponent a la part de l'ormeig	51
Figura 4.6: Diagrama de sòlid lliure del marc del dinamòmetre corresponent a la part del tractor.....	52
Figura 4.7: Torsors d'enllaç entre els diferents sòlids lliures d'estudi.....	58
Figura 5.1: Diagrama per a l'anàlisi de l'efecte del dinamòmetre tripuntal	64
Figura 5.2: Diagrama del sòlid lliure del tractor amb les cotes principals per a la modelització	65
Figura 5.3: Diagrama del càlcul de les reaccions en les rodes del tractor.....	66
Figura 5.4: Reducció de les components del pes per al càlcul de les reaccions a les rodes del tractor	67
Figura 5.5: Reducció del torsor d'enllaç a l'enganxall de tres punts per al càlcul de les reaccions a les rodes del tractor	68
Figura 5.6: Sembradora	72
Figura 5.7: Cultivador de cisells	72
Figura 5.8: Subsolador [91].....	72
Figura 5.9: Arada de volteig [77]	72
Figura 5.10: Reaccions a les rodes en el cas sense ormeig i amb terreny horitzontal....	76
Figura 5.11: Reaccions a les rodes en el cas sense ormeig i amb pendent longitudinal de 15°.....	76
Figura 5.12: Reaccions a les rodes en el cas sense ormeig i amb pendent lateral de 15°	76
Figura 5.13: Reaccions a les rodes en el cas sense ormeig i amb pendent longitudinal de 15° i lateral de 15°	76
Figura 5.14: Reaccions a les rodes en el cas de sembradora en transport i amb terreny horitzontal	77
Figura 5.15: Reaccions a les rodes en el cas de sembradora en transport i amb pendent longitudinal de 10°	77

Figura 5.16: Reaccions a les rodes en el cas de sembradora en transport i amb pendent lateral de 10°	77
Figura 5.17: Reaccions a les rodes en el cas de sembradora en transport i amb pendent longitudinal de 10° i lateral de 10°	77
Figura 5.18: Reaccions a les rodes en cas del cultivador de cisells.....	78
Figura 5.19: Reaccions a les rodes en subsolador	78
Figura 5.20: Reaccions a les rodes en subsolador amb roda de recolzament	78
Figura 5.21: Reaccions a les rodes en arada de volteig	79
Figura 6.1: Configuracions en els assajos de validació del dinamòmetre tripuntal.....	82
Figura 6.2: Cicle per a l'assaig de repetibilitat	84
Figura 6.3: Cicle per a l'assaig de reversibilitat	84
Figura 6.4: Cicle per a l'assaig de fluència.....	84
Figura 6.5: Bancada per a assajos estructurals	87
Figura 6.6: Circuit d'accionament del cilindre hidràulic per a la validació del dinamòmetre tripuntal.....	88
Figura 6.7: Cèl·lula de càrrega de 250 kN utilitzada per a la mesura de la força aplicada amb el cilindre hidràulic	88
Figura 6.8: Cèl·lula de càrrega de 50 kN utilitzada per a la mesura de la força aplicada amb el cilindre hidràulic	88
Figura 6.9: Equipament per a l'enregistrament de les dades en els assajos experimentals	90
Figura 6.10: Imatge del panell frontal del programa per al control i adquisició de dades per als assajos de validació del dinamòmetre tripuntal.....	90
Figura 6.11: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge inferior dret.....	91
Figura 6.12: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge inferior esquerre	91
Figura 6.13: Assaig de força longitudinal en l'ancoratge superior.....	92
Figura 6.14: Assaig de força vertical en l'ancoratge inferior dret	92
Figura 6.15: Assaig de força vertical en l'ancoratge inferior esquerre.....	92
Figura 6.16: Assaig de força vertical en l'ancoratge superior	93
Figura 6.17: Assaig de força transversal en l'ancoratge inferior dret.....	93
Figura 6.18: Assaig de força transversal en l'ancoratge inferior esquerre	93
Figura 6.19: Assaig de força inclinada en l'ancoratge inferior dret	94
Figura 6.20: Assaig de força inclinada en l'ancoratge inferior esquerre	94
Figura 6.21: Assaig de força inclinada en l'ancoratge superior	94
Figura 6.22: Assaig de força central longitudinal.....	95
Figura 6.23: Assaig de força central diagonal	95
Figura 6.24: Procediment per al tractament de dades dels assajos experimentals.....	96
Figura 6.25: Representació dels errors absoluts analitzats per a l'estudi del comportament de les cèl·lules de càrrega del dinamòmetre	99
Figura 6.26: Procediment per a la validació del model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	102
Figura 6.27: Resultats dels residuals per al model teòric per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig	103
Figura 6.28: Procediment per a la validació del model teòric per al dinamòmetre tripuntal	105
Figura 6.29: Resultats dels residuals per al model de càlcul de les forces als bolons de mesura a partir de les dades del full de calibratge	106
Figura 7.1: Procediment per al càlcul dels models d'ajust experimental dels bolons de mesura del dinamòmetre	110

Figura 7.2: Procediment per al càlcul dels models d'ajust experimental del dinamòmetre per a la mesura del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	111
Figura 7.3: Residuals per als models d'ajust experimental per als bolons de mesura ..	116
Figura 7.4: Residuals del model 1 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	118
Figura 7.5: Procediment per a la validació del model d'ajust experimental del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	121
Figura 7.6: Residuals del model 2 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	122
Figura 7.7: Residuals del model 3 per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	124
Figura 7.8: Comparativa dels models d'ajust experimental per al càlcul del torsor d'enllaç a l'ormeig.....	125
Figura 8.1: Imatges dels enganxalls utilitzats en el desenvolupament. D'esquerra a dreta: enganxall de bola amb base de 12 forats, enganxall de bola amb base de 8 forats i enganxall d'anella	128
Figura 8.2: Forces en el punt d'unió de l'enganxall, components d'esforç a mesurar en la secció d'estudi i dimensions que intervenen en el càlcul	129
Figura 8.3: Descomposició de l'estat de tensions en els casos d'esforç axial i dos moments flectors	130
Figura 8.4: Punts d'estudi per a la mesura de la deformació sobre la secció dels enganxalls.....	131
Figura 8.5: Estat tensional en la línia vertical central de la secció (Punts P_1 i P_2)	132
Figura 8.6: Estat tensional en la línia horitzontal central de la secció (Punts P_3 i P_4)..	132
Figura 8.7: Esquema de les parts d'una galga extensomètrica [99].....	133
Figura 8.8: Esquema del pont de mesura amb galgues extensomètriques	134
Figura 8.9: Esquema de la disposició de les galgues per a la mesura de l'esforç flector.....	135
Figura 8.10: Configuració en mig pont per a la mesura del moment flector i compensació de l'esforç axial	135
Figura 8.11: Configuració en pont complet per a la mesura del moment flector i compensació de l'esforç axial	135
Figura 8.12: Esquema de la disposició de les galgues per a la mesura de l'esforç axial	136
Figura 8.13: Configuració en pont diagonal per a la mesura de l'esforç axial i compensació del moment flector.....	136
Figura 8.14: Configuració en pont complet per a la mesura de l'esforç axial i compensació del moment flector.....	136
Figura 8.15: Mesura del límit de fractura de l'acer en l'enganxall de bola amb base de 12 forats mitjançant el duròmetre de rebot.....	138
Figura 8.16: Equip de mesura tridimensional Faro Fusion® de 3m i 7 eixos. Esquerra: Vista general; dreta superior: Detall del palpador; Dreta inferior: Imatge del programa de tractament de dades	138
Figura 8.17: Resultats de l'estudi de les deformacions en els punts d'instal·lació de les galgues per als enganxalls dinamomètrics.....	140
Figura 8.18: Tensions equivalents de VonMises en l'enganxall de bola amb base de 12 forats per al cas d'una força longitudinal i per al cas d'una força vertical	140
Figura 8.19: Dimensions del forat mecanitzat a la part posterior de l'enganxall.....	141
Figura 8.20: Tensions equivalents de VonMises en l'enganxall d'anella per al cas de càrrega màxima en les components longitudinal, transversal i vertical de força per al casos amb i sense forat posterior.....	142

Figura 8.21: Comparativa dels resultats de l'estudi de les deformacions en els punts d'instal·lació de les galgues en els enganxalls per al cas de referència i el modificat	143
Figura 8.22: Enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats. D'esquerra a dreta: Enganxalls dinamomètrics d'anella, de bola amb base de 8 forats i de bola amb base de 12 forats.....	144
Figura 8.23: Disposició de les graelles de mesura en l'enganxall dinamomètric de bola de base de 12 forats i connexions per als punts de mesura.....	147
Figura 8.24: Disposició de les graelles de mesura en els enganxalls dinamomètrics de bola amb base de 8 forats i d'anella i connexions per als punts de mesura.....	148
Figura 8.25: Marcatge de les línies d'alineació per a la instal·lació de les galgues extensomètriques.....	149
Figura 8.26: Enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats amb les galgues extensomètriques.....	150
Figura 8.27: Detall de la disposició de les galgues extensomètriques.....	150
Figura 9.1: Procediment per al càlcul de les components de força al punt d'unió de l'enganxall a partir dels senyals mesurats.....	151
Figura 9.2: Esquema de les dimensions dels enganxalls dinamomètrics	152
Figura 9.3: Configuració dels punts de mesura per a l'enganxall de bola amb base de 12 forats	154
Figura 9.4: Configuració dels punts de mesura per a l'enganxall de bola amb base de 8 forats i l'enganxall d'anella	155
Figura 9.5: Distribució de tensions en la secció d'estudi amb els corresponents esforços	156
Figura 9.6: Seqüència per a la validació del model dels enganxalls dinamomètrics mitjançant simulació per elements finits.....	160
Figura 10.1: Direccions de les forces aplicades en els assajos experimentals de validació dels enganxalls dinamomètrics.....	168
Figura 10.2: Vista principal del circuit hidràulic per a la validació experimental dels enganxalls dinamomètrics.....	171
Figura 10.3: Detall dels comandaments hidràulics per a la validació experimental dels enganxalls dinamomètrics	171
Figura 10.4: Detall de l'utilatge d'aplicació de la força en els enganxalls de bola	172
Figura 10.5: Detall de l'utilatge d'aplicació de la força en l'enganxall d'anella	172
Figura 10.6: Muntatge per a l'assaig de força longitudinal i força vertical en els enganxalls dinamomètrics de bola.....	172
Figura 10.7: Muntatge per a l'assaig de força longitudinal i força vertical en l'enganxall dinamomètric d'anella	172
Figura 10.8: Assaig de força diagonal amb angle positiu en els enganxalls dinamomètrics de bola	173
Figura 10.9: Assaig de força diagonal amb angle negatiu en els enganxalls dinamomètrics de bola	173
Figura 10.10: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats.....	177
Figura 10.11: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats.....	178
Figura 10.12: Residuals per al model teòric en l'enganxall dinamomètric d'anella	179
Figura 10.13: Residuals per al càlcul de $F_{x,A}$ en cada un dels enganxalls dinamomètrics.....	181

Figura 10.14: Residuals per al càlcul de $F_{x,B}$ en cada un dels enganxalls dinamomètrics	182
Figura 10.15: Residuals per al càlcul de F_y en cada un dels enganxalls dinamomètrics	183
Figura 10.16: Residuals per al càlcul de F_z en cada un dels enganxalls dinamomètrics	183
Figura 11.1: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	192
Figura 11.2: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	193
Figura 11.3: Residuals per al model 1 de l'enganxall dinamomètric d'anella.....	193
Figura 11.4: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	196
Figura 11.5: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	196
Figura 11.6: Residuals per al model 2 de l'enganxall dinamomètric d'anella.....	197
Figura 11.7: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 12 forats	199
Figura 11.8: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric de bola amb base de 8 forats	200
Figura 11.9: Residuals per al model 3 de l'enganxall dinamomètric d'anella.....	200
Figura 12.1: Equip de posicionament GNSS NovAtel [®] SMART-AG.....	204
Figura 12.2: Sensor d'inclinació de dos direccions IFM [®] CR2102.....	205
Figura 12.3: Inclíndre per a la mesura del capcineig del dinamòmetre tripuntal....	206
Figura 12.4: Sensor d'ultrasons per a la mesura de la profunditat de treball instal·lat al dinamòmetre tripuntal	207
Figura 12.5: Sensor de parell i velocitat de la presa de força.....	208
Figura 12.6: Controlador NI cRIO 9022	211
Figura 12.7: Xassís NI cRIO 9114	211
Figura 12.8: Mòduls d'adquisició de dades utilitzats. D'esquerra a dreta: Targeta NI 9237 per a connexions en pont, targeta NI 9203 per entrades analògiques de $\pm 20\text{mA}$, targeta NI 9201 per entrades analògiques $\pm 10\text{V}$ i targeta NI 9422 per a entrades digitals	211
Figura 12.9: Esquema del conjunt de sensors i equips per a l'adquisició de dades	213
Figura 12.10: Vista exterior de la caixa de connexions	213
Figura 12.11: Vista interior de la caixa de connexions	213
Figura 12.12: Estructura del programa desenvolupat per a la realització d'assajos en camp	215
Figura 12.13: Subprograma d'adquisició de dades per al dinamòmetre tripuntal	217
Figura 12.14: Subprograma d'adquisició de dades de l'equip GNSS.....	218
Figura 12.15: Subprograma de tractament de dades per al dinamòmetre tripuntal (part 1)	218
Figura 12.16: Subprograma de tractament de dades per al dinamòmetre tripuntal (part 2)	219
Figura 12.17: Subprograma de tractament de dades per als enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats	219
Figura 12.18: Subprograma de tractament de dades per a l'equip GNSS.....	220
Figura 12.19: Subprograma de tractament de dades del sensor de la presa de força....	220
Figura 12.20: Subprograma de guardat de dades per al cas dels enganxalls dinamomètrics	221

Figura 12.21: Imatge de la pantalla de visualització per al dinamòmetre tripuntal.....	221
Figura 12.22: Imatge de la pantalla de visualització per als inclinòmetres i per a l'equip GNSS	222
Figura 13.1: Imatges de l'assaig amb cultivador de cisells	224
Figura 13.2: Component longitudinal de la força a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	225
Figura 13.3: Component transversal de la força a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	225
Figura 13.4: Component vertical de la força a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	225
Figura 13.5: Component de balanceig del moment a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	226
Figura 13.6: Component de capcineig del moment a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	226
Figura 13.7: Component de guinyada del moment a l'enganxall del cultivador de cisells durant l'assaig	226
Figura 13.8: Forces als punts d'unió del l'ormeig en l'assaig del cultivador de cisells	227
Figura 13.9: Imatges de l'assaig amb el rotocultivador.....	228
Figura 13.10: Mapa en parcel·la de les components de força i moment a l'enganxall del rotocultivador (coordenades en m)	229
Figura 13.11: Mapa en parcel·la de velocitat del tractor utilitzant l'equip GNSS i de velocitat, parell i potència a la presa de força (coordenades en m)	230
Figura 13.12: Rella instrumentada amb galgues extensomètriques.....	231
Figura 13.13: Imatges de l'assaig de la màquina sembradora	232
Figura 13.14: Components del torsor d'enllaç a l'enganxall de la sembradora en l'assaig a velocitat lenta	233
Figura 13.15: Velocitat d'avanç en l'assaig de la sembradora a velocitat lenta.....	233
Figura 13.16: Components del torsor d'enllaç a l'enganxall de la sembradora en l'assaig a velocitat ràpida.....	233
Figura 13.17: Velocitat d'avanç en l'assaig de la sembradora a velocitat ràpida.....	234
Figura 13.18: Tensions a la galga superior de la rella en l'assaig de la sembradora a velocitat lenta	234
Figura 13.19: Tensions a la galga lateral dreta de la rella en l'assaig de la sembradora a velocitat lenta.....	235
Figura 13.20: Tensions a la galga superior de la rella en l'assaig de la sembradora a velocitat ràpida.....	235
Figura 13.21: Tensions a la galga lateral dreta de la rella en l'assaig de la sembradora a velocitat ràpida	235

NOMENCLATURA

Llistat de símbols

Símbol	Descripció
a	Coefficient per als models d'ajust experimental
\mathbf{a}_R	Vector de coeficients per als models d'ajust experimental
\mathbf{b}_i	Vector de termes independents de les equacions d'equilibri de forces en el marc de l'ormeig del dinamòmetre
\mathbf{b}_t	Vector de termes independents de les equacions d'equilibri de forces en el marc del tractor del dinamòmetre
e_F	Error relatiu de fluència
e_H	Error relatiu de reversibilitat o d'histèresis
e_K	Error relatiu de sensibilitat
e_L	Error relatiu de linealitat
e_R	Error relatiu de repetibilitat
e_Z	Error relatiu de zero
g	Acceleració de la gravetat
k	Factor de galga
m	Massa
n	Número de mostres per al càlcul de regressió
p	Número de variables que intervenen en el model de regressió
q	Número de coeficients a ajustar en el model de regressió
A	Àrea de la secció d'estudi
\mathbf{C}	Matriu de covariàncies
$\mathbf{C}_{Fd,i}$	Matriu corresponent als termes de les forces dels bolons de mesura en les equacions d'equilibri en el marc de l'ormeig del dinamòmetre
$\mathbf{C}_{Fd,t}$	Matriu corresponent als termes de les forces dels bolons de mesura en les equacions d'equilibri en el marc del tractor del dinamòmetre
\mathbf{C}_{Fi}	Matriu corresponent als termes de les forces als punts d'unió en les equacions d'equilibri en el marc de l'ormeig del dinamòmetre
\mathbf{C}_{Ft}	Matriu corresponent als termes de les forces als punts d'unió en les equacions d'equilibri en el marc tractor del dinamòmetre
$\mathbf{C}_{S,Fi}$	Matriu corresponent als termes de les equacions addicionals en les equacions d'equilibri en el marc de l'ormeig del dinamòmetre
$\mathbf{C}_{S,Ft}$	Matriu de coeficients de les equacions addicionals en les equacions d'equilibri en el marc tractor del dinamòmetre
E	Mòdul elàstic
$E_{F,i}$	Error o residual en l'estimació de F_i
\mathbf{F}_a	Vector de forces aplicades en l'assaig per al càlcul de regressió
\mathbf{F}_d	Vector de components de forces entre marcs del dinamòmetre
\mathbf{F}_i	Vector de components de forces entre ormeig i dinamòmetre
F_{max}	Força màxima del cicle d'assaig
F_a	Força aplicada en l'assaig experimental
F_m	Força mesurada en l'assaig experimental
F_{nom}	Força nominal de la cèl·lula de càrrega
FN_x	Esforç axial en la secció
\mathbf{F}_t	Vector de components de forces entre tractor i dinamòmetre
F_x	Força en direcció longitudinal

Símbol	Descripció
F_y	Força en direcció transversal
F_z	Força en direcció vertical
H	Matriu de projecció dels valors utilitzats als estimats en la regressió
I	Matriu identitat
IC_a	Interval de confiança del coeficient de regressió
IC_{Fm}	Interval de confiança dels valors estimats amb el model de regressió
I_y	Moment d'inèrcia de la secció respecte l'eix y i que passa pel centre d'inèrcia de la secció
I_z	Moment d'inèrcia de la secció respecte l'eix z i que passa pel centre d'inèrcia de la secció
J	Matriu de uns
K_c	Sensibilitat del sensor estimada per al cicle d'assaig
K_{ref}	Sensibilitat de referència del sensor
L	Força lateral en la roda del tractor
MF_y	Moment flector en la secció en l'eix y
MF_z	Moment flector en la secció en l'eix z
M_x	Moment de balanceig
M_y	Moment de capcineig
M_z	Moment de guinyada
N	Força normal en la roda del tractor
R^2	Coefficient de determinació
S	Senyal de cèl·lula de càrrega o pont de mesura
S	Vector de senyals mesurades en l'assaig per al càlcul de regressió
S_{bal}	Matriu de canvi de base per al balanceig
S_{cap}	Matriu de canvi de base per al capcineig
$S_{0,i}$	Senyal a càrrega nul·la a l'inici del cicle d'assaig
$S_{0,f}$	Senyal a càrrega nul·la al final del cicle d'assaig
S_{30s}	Senyal a 30 s després d'aplicar força màxima
S_{300s}	Senyal a 300 s després d'aplicar força màxima
S_{c1}	Senyal en cicle d'assaig 1
S_{c2}	Senyal en cicle d'assaig 2
S_{c3}	Senyal en cicle d'assaig 3
S_{c4}	Senyal en cicle d'assaig 4
S_{rc}	Senyal previst a partir de la recta de regressió
T	Força de tracció en la roda del tractor
V_{EX}	Tensió d'excitació del pont de mesura
V_S	Tensió de sortida del pont de mesura
W	Vector pes
γ	Angle de la barra superior de l'enganxall tripuntal del tractor
δ	Angle de l'assaig diagonal per a la validació dels enganxalls dinamomètrics
ε	Deformació unitària
θ_{cap}	Angle de capcineig
θ_{bal}	Angle de balanceig
ν	Coefficient de Poisson
σ	Tensió mecànica
σ^2	Variància

Llistat de subíndexs

Subíndex	Descripció
<i>a</i>	Component de força o moment aplicada en assaig experimental
<i>br</i>	Punt inferior dret de l'enganxall tripuntal
<i>bl</i>	Punt inferior esquerra de l'enganxall tripuntal
<i>c</i>	Punt inferior central en l'enganxall tripuntal
<i>d</i>	Dinamòmetre
<i>di</i>	Marc de l'ormeig del dinamòmetre
<i>dn</i>	Assaig diagonal negatiu en la validació dels enganxalls dinamomètrics
<i>dp</i>	Assaig diagonal positiu en la validació dels enganxalls dinamomètrics
<i>dt</i>	Marc del tractor del dinamòmetre
<i>f</i>	Secció d'estudi per a la mesura dels esforços flectors
<i>i</i>	Ormeig
<i>m</i>	Component de força o moment mesurada amb el dinamòmetre
<i>max</i>	Màxim
<i>n</i>	Secció d'estudi per a la mesura dels esforços normals
<i>t</i>	Tractor
<i>u</i>	Punt superior de l'enganxall tripuntal
<i>FL</i>	Roda davantera esquerra del tractor
<i>FR</i>	Roda davantera dreta del tractor
<i>R</i>	Component del torsor d'enllaç a l'enganxall tripuntal reduïda
<i>RL</i>	Roda posterior esquerra del tractor
<i>RR</i>	Roda posterior dreta del tractor
<i>W</i>	Component del pes del tractor reduïda

Sigles i acrònims

Sigla/acrònim	Descripció
CAD	Disseny assistit per ordinador / <i>Computer Assisted Design</i>
CAE	Enginyeria assistida per ordinador / <i>Computer Assisted Engineering</i>
CAN	Sistema de comunicació <i>Controller Area Network</i>
CC	Corrent continu
DEOR	Doble Anell Octagonal Eixamplat / <i>Double Extended octagonal ring</i>
DGPS	Sistema de posicionament global diferencial <i>Differential Global Positioning System</i>
ECU	Unitat de control electrònica / <i>Electronic Control Unit</i>
EN	Normativa europea / <i>European Norm</i>
EOR	Anell Octagonal Eixamplat / <i>Extended Octagonal Ring</i>
FEM	Mètode per elements finits / <i>Finite Element Method</i>
FS	Fons d'escala / <i>Full Scale</i>
FSO	Senyal en fons d'escala / <i>Full Scale Output</i>
GNSS	Sistema de navegació global per satèl·lit <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	Sistema de posicionament global / <i>Global Positioning System</i>
ISO	Organització internacional per a l'estandardització <i>International Organization for Standardization</i>
ISOBUS	Protocol de comunicació d'estàndard ISO
PTO	Presa de força del tractor / <i>Power Take-Off</i>
RTK	Correcció diferencial cinemàtica en temps real en posicionament per satèl·lit / <i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	Sistema d'augmentació basat en satèl·lits <i>Satellite Based Augmentation System</i>
SIG	Sistemes d'Informació Geogràfica
UNE	Normativa espanyola / <i>Una Norma Española</i>
UTM	Sistema de coordenades universal transversal de Mercator <i>Universal Transverse Mercator</i>

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Algunes tendències actuals en la mecanització agrària

En els últims anys, el món de l'agricultura ha experimentat nombrosos canvis a causa dels avenços tecnològics i a la implantació de noves metodologies. L'interès en millorar el rendiment de les explotacions, per tal d'augmentar la producció o per reduir els costos en les diferents tasques agrícoles, ha fet que cada cop més es requereixi d'un estudi detallat ja no només dels costos variables en la realització de les tasques agrícoles, des de la sembra fins a la recol·lecció, sinó també dels costos d'adquisició i d'amortització de la maquinària utilitzada.

Pel que fa a la minimització dels costos en les tasques agrícoles, l'eficiència energètica en aquestes operacions és objecte de nombrosos estudis. En aquests estudis, el tractor agrícola, com a màquina motriu que s'utilitza per accionar la resta d'ormejos o màquines per a la realització de les tasques agrícoles, és un dels punts on l'estudi del balanç energètic és més complex. Les condicions d'operació del tractor, on hi intervenen la corba característica del motor, la configuració de la transmissió i el lliscament de les rodes entre molts altres aspectes, fan que per una mateixa tasca els costos siguin molt variables, a la vegada que també hi intervé el comportament de l'ormeig i el correcte ús que se'n fa.

Existeixen gran varietat d'ormejos per a la realització de diverses tasques agrícoles, com són el treball i preparació del sòl, la sembra, la sega, l'aplicació d'adobs i fitosanitaris, etc. En aquesta tendència de reduir els costos i minimitzar el temps en les diferents operacions, cada cop és més habitual la utilització de maquinària especialitzada en cultius o tasques molt concretes. L'especialització d'aquests equips permet optimitzar el disseny funcional, a diferència d'altres tipus de maquinària utilitzada en múltiples cultius i que han de complir requeriments molt diversos. Aquesta maquinària especialitzada té interès principalment en grans explotacions o empreses de lloguer de maquinària.

En contraposició, per a aquells agricultors amb explotacions més petites o que generalment conreen més d'un tipus de cultiu, interessa que els ormejos es dissenyin de forma que siguin intercanviables i modulars, de manera que en una mateixa estructura d'ormeig s'hi puguin instal·lar diferents tipus d'arades o eines, juntament amb altres accessoris com corrons, discos, etc. Aquests ormejos que permeten la modularitat tenen el gran avantatge d'adaptar-se a diferents tasques, i en conseqüència, per un petit agricultor, és més fàcil amortitzar la inversió econòmica d'aquests.

Per tal de reduir el temps requerit en una determinada tasca, millorar la seguretat, la utilització de l'energia i fins i tot millorar el rendiment en les explotacions agrícoles, cada cop més s'utilitza la electrònica i la instrumentació en el sector agrícola. Tant els tractors moderns com fins i tot alguns ormejos disposen d'una instrumentació considerable que permet obtenir dades en temps real del seu funcionament. Pel que fa als tractors, aquests disposen d'instrumentació per a la mesura de múltiples variables, com són el consum de combustible, les temperatures dels fluids, el règim de funcionament del motor, la component longitudinal de força a l'enganxall de tres punts,

etc. Alguns ormejos, sobretot maquinària especialitzada, també disposen de sensors i equipament que monitoritzen en temps real les variables que incideixen en la tasca.

Actualment està generalitzada la implantació de sistemes de comunicació entre tractors i ormejos, com és el cas del sistema de comunicació ISOBUS. Aquest protocol de comunicació estandarditzat, permet la intercanviabilitat i la modularitat entre equips, sensors, tractors, ormejos i sistemes de gestió d'informació. Aquests sistemes de comunicació es basen en una o vàries unitats de control electrònic (ECU) que reben la informació de tots els equips i la tracten. Mitjançant els terminals de control i visualització situats a la cabina del tractor, es permet al tractorista analitzar en tot moment la informació adquirida i tractada pel sistema.

La presència cada cop més important de la instrumentació i les tecnologies de la informació ha permès que aparegui una nova tendència en la gestió de les explotacions agrícoles, coneguda amb el nom d'agricultura de precisió, que persegueix l'objectiu de millorar la productivitat i el rendiment de les explotacions mitjançant la gestió i la realització de tasques amb paràmetres particulars i diferenciats en cada zona d'una parcel·la.

En l'agricultura de precisió hi juguen un paper fonamental l'ús de sistemes de posicionament i navegació per satèl·lit (GNSS) i els sistemes d'informació geogràfica (SIG). Amb aquests sistemes i sensors per a la mesura de variables en el camp, juntament amb mètodes de gestió de la informació, és possible estudiar la variabilitat de les magnituds mesurades en la parcel·la i obtenir mapes que facilitin la presa de decisions i l'actuació de forma localitzada.

1.2. Interès del coneixement de les forces entre tractor i ormeig

En la tendència actual d'obtenir informació per a la millora dels procediments en les diferents tasques agrícoles, un dels aspectes importants, sobretot en les tasques on es treballa sobre el sòl, és conèixer les forces entre el tractor i l'ormeig. Aquestes dades de força són determinants en l'estudi del comportament del conjunt tractor-ormeig i per realitzar balanços d'energia. Aquesta informació també és imprescindible per realitzar un estudi detallat del comportament tant funcional com estructural dels ormejos.

En l'estudi del conjunt tractor-ormeig, no només la component longitudinal de força necessària per moure l'ormeig és important a l'hora d'analitzar-ne el funcionament, ja que també les components vertical i transversal de força que apareixen en l'operació de l'ormeig i que es transmeten cap al tractor, afecten considerablement a les condicions d'operació d'aquest, per la qual cosa és convenient un ajust adequat de la configuració del tractor.

Un dels aspectes que condicionen la correcta utilització de l'energia en les operacions amb tractor és l'eficiència en la tracció. Aquest factor, la relació entre la potència útil de tracció i la potència en els eixos motrius, depèn de nombrosos aspectes, com el pes del tractor i el seu repartiment en els eixos, el lliscament de les rodes o la resistència al rodolament. Conèixer la component longitudinal de força entre tractor i ormeig, juntament amb informació de la velocitat d'avanç, velocitat angular de les rodes, etc., permet realitzar el balanç energètic i analitzar els fluxos de potències en l'operació del

conjunt. Mitjançant l'estudi de diverses configuracions del tractor, amb l'ajust d'aspectes com el règim del motor, la selecció de la velocitat en el canvi de marxes, l'inflat de les rodes o el llast, es pot analitzar l'efecte que tenen aquestes variables en el comportament del tractor per tal d'obtenir una correcta utilització de l'energia.

Un altre efecte que interessa quantificar durant l'operació en camp és que les forces que realitza l'ormeig sobre el tractor impliquen un canvi de la càrrega a suportar pels eixos d'aquest. Aquest efecte té una importància cabdal en la força de tracció i el lliscament de les rodes motrius. Per tal d'aconseguir una millor eficiència en la tracció s'opta per utilitzar tècniques de llastat, el qual cal ajustar adequadament per tal de no provocar efectes indesitjats, com un increment excessiu de la resistència al rodolament.

El coneixement de les forces en l'ormeig també és interessant per a l'estudi del comportament funcional d'aquest. La component longitudinal de la força permet avaluar els requeriments en l'accionament de l'ormeig en diverses condicions, en funció, per exemple, de la profunditat de treball. Un estudi detallat del disseny funcional de l'ormeig, mitjançant l'estudi de la disposició de les eines per al treball del sòl o dels diferents tipus d'accessoris, permetria obtenir el llaurat desitjat amb menys requeriments en l'accionament, i minimitzar la potència necessària per a la tasca.

Altres aspectes importants que condicionen també l'operació del conjunt són la component vertical de força i la component de capcineig del moment entre el tractor i l'ormeig, que impliquen una transferència de càrrega en els eixos davanter i posterior del tractor, i que afecta per tant a les condicions d'operació d'aquest. Si es conegués la magnitud d'aquestes components, es podria ajustar el disseny funcional de l'ormeig, per tal d'augmentar o disminuir aquest efecte i que el tractor i l'ormeig treballin en òptimes condicions.

Un altre dels aspectes interessants per comprovar la funcionalitat d'un ormeig és identificar si en aquest hi apareix component transversal de la força o component de guinyada del moment entre el tractor i l'ormeig, com és habitual en eines de treball com discos o arades de volteig i en ormejos asimètrics. Aquestes forces es transmeten al tractor i afecten a la seva conducció, i per tant interessa reduir aquest efecte. Mitjançant informació precisa d'aquestes components de força i moment es pot ajustar el disseny de les eines de treball del sòl i la seva disposició en l'ormeig per tal de minimitzar aquests efectes.

També és necessari conèixer les forces en els punts d'unió de l'ormeig per analitzar i ajustar el disseny estructural d'aquest. La mesura de les forces màximes assolibles és de gran importància a l'hora d'analitzar estructuralment els ormejos, on mitjançant aquesta informació es pot optimitzar el disseny de l'ormeig assajat o utilitzar-la per al desenvolupament de nous equips de característiques similars. També una anàlisi de la variabilitat de les forces permetria determinar els requeriments de resistència a fatiga dels elements estructurals de l'ormeig.

Els ormejos agrícoles es dissenyen utilitzant coeficients de seguretat elevats per garantir-ne la resistència estructural, ja que a més són equips que poden rebre puntualment pics de força considerables i estan sotmesos a esforços de fatiga. Tot i aquesta necessitat, el sobredimensionament de parts de l'equip on no és necessari comporta un ús excessiu de material en la fabricació i un increment en el pes d'aquest.

Aquest excés de pes implica un major consum de combustible tant en l'operació com en el transport, i també la necessitat de més potència, i obliga als agricultors a disposar de tractors més potents, i per tant més cars per a realitzar operacions agrícoles que es podrien fer amb tractors de menys potència. A més, en el cas dels remolcs, un disseny més pesat limita la càrrega útil transportable. La massa total d'un ormeig també és un condicionant important per tal de facilitar el transport per a la venda i exportació d'aquests, on mitjançant l'optimització estructural es pot reduir el pes i el volum garantint la funcionalitat de l'ormeig.

1.3. Reptes tecnològics derivats

Tots els aspectes comentats anteriorment impliquen que, per a un estudi detallat del comportament tant del tractor com de l'ormeig, és primordial conèixer les forces que intervenen en la connexió entre els dos elements. Per conèixer amb precisió els valors de les components de força i moment són necessaris equips dinamomètrics que mesurin aquestes durant la realització de les tasques agrícoles.

Tot i que bona part dels tractors actuals disposen d'algun sistema per a la mesura de la component longitudinal de força a l'enganxall de tres punts, aquests s'utilitzen per als sistemes de control de càrrega, que ajusta la profunditat de treball en funció de la força realitzada, i no es mesuren les altres components de força i moment que intervenen en la unió del tractor amb l'ormeig. En el cas dels enganxalls d'un punt generalment no es disposa de cap sistema de mesura de la força.

Amb l'objectiu de disposar d'una eina per a la mesura de les forces entre un tractor i un ormeig, molts investigadors han desenvolupat dinamòmetres per a la mesura d'aquestes durant els assajos en camp. El desenvolupament d'aquests equips per a la mesura de forces es remunta ja a voltats del 1970. Molts d'aquests equips es basen en la utilització de múltiples cèl·lules de càrrega o altres elements de mesura disposats en diferents direccions per a poder mesurar les components de força i moment que intervenen en la unió del tractor i l'ormeig.

Una de les principals problemàtiques d'aquests equips, sobretot quan es busca un dinamòmetre per poder-lo instal·lar en multitud de tractors i ormejos, és adaptar-se a la gran variabilitat de dimensions d'aquests. Aquest aspecte implica la utilització d'elements d'acoblament ajustables, i complica el disseny final de l'equip.

Un altre dels condicionants en el disseny d'aquests equips és que un mateix dinamòmetre ha d'estar preparat per un ampli interval de mesura en cada component de força, ja que en cada ormeig les càrregues que hi apareixen poden ser molt diverses, a més de ser capaços de suportar possibles sobrecàrregues. Aquests aspectes fan que, a disposar d'un dinamòmetre preparat per a tots els casos previstos, es tinguin en algunes situacions valors a mesurar considerablement inferiors al màxim pel qual s'ha dissenyat, amb la conseqüent disminució de la precisió en la mesura.

Aquests equips també tenen l'inconvenient de que sovint apareix un efecte conegut com a sensibilitat creuada. Aquest efecte consisteix en que, amb l'equip sotmès a una força en una direcció concreta, en els elements de mesura que determinen una component de força en una altra direcció perpendicular hi apareix un senyal, quan aquests en teoria no

reben cap força. Entre els motius que expliquen aquestes desviacions es troben les toleràncies de muntatge dels diferents components i també els fregaments interns entre les parts mòbils que afecten a l'equilibri de forces i provoquen repartiments desiguals d'aquestes en els diferents elements de mesura.

Donada aquesta problemàtica, en el disseny d'aquests equips es té especial cura en minimitzar aquest efecte, ja que en un cas de mesura en múltiples components de força, el senyal d'un element de mesura no seria atribuïble únicament a la component de força aplicada en la direcció de mesura. Aquest aspecte en principi tampoc es pot corregir mitjançant els processos de calibratge habituals, on aquests ajusten les desviacions del senyal a càrrega nul·la i de sensibilitat de forma individualitzada per a cada element de mesura del dinamòmetre.

Per últim, una altra problemàtica d'aquests dinamòmetres és el fet que, implementar aquests equips entre el tractor i l'ormeig, fa canviar les característiques del conjunt, i afecta al comportament d'aquest. Aquesta problemàtica condiona també el disseny d'aquests equips dinamomètrics, i és necessari reduir la massa i les dimensions del dinamòmetre amb l'objectiu que les condicions d'operació del conjunt respecte al cas on no hi ha el dinamòmetre canviïn el mínim possible.

1.4. Objectius de la tesi

1.4.1. Objectius generals

L'objectiu general d'aquesta tesi és desenvolupar i posar a punt, per a la realització d'assajos en camp, un conjunt d'equips dinamomètrics per a la mesura de forces entre un tractor agrícola i l'ormeig utilitzat durant l'operació. El desenvolupament i la posada a punt contempla desenvolupar el disseny d'aquests equips, definir el model matemàtic que relaciona els senyals dels diferents elements de mesura amb les components de força i moment a determinar i validar experimentalment el seu funcionament.

Els dinamòmetres considerats en aquesta tesi es divideixen en dos tipus diferents. El primer equip analitzat és un dinamòmetre per a enganxalls tripuntals. Aquest dinamòmetre consisteix en un aparell que s'instal·la entre el tractor i l'ormeig agrícola i ha de mesurar totes les components de força i moment que intervenen en la connexió. Els altres equips desenvolupats consisteixen en un conjunt d'enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats. En concret es desenvolupen un total de 3 enganxalls dinamomètrics: un enganxall d'anella i dos enganxalls de bola amb diferents bases d'ancoratge. Aquests enganxalls dinamomètrics permeten mesurar les 3 components de força al punt d'unió de l'enganxall.

Per últim, s'implementa i es posa a punt un sistema d'adquisició de dades per als diferents dinamòmetres desenvolupats i també per a un conjunt d'equips i sensors complementaris per a la realització d'assajos en camp.

1.4.2. Objectius específics

Per al desenvolupament del dinamòmetre per a enganxalls de tres punts, es parteix del dinamòmetre ja construït i els objectius específics són:

- Obtenir un model matemàtic del dinamòmetre per al càlcul de les forces als punts d'unió al tractor i a l'ormeig i del torsor d'enllaç d'aquests amb el dinamòmetre, a partir de les mesures del conjunt de cèl·lules de càrrega de que disposa l'instrument.
- Quantificar l'afectació del dinamòmetre tripuntal en el comportament del conjunt tractor-ormeig.
- Validar experimentalment el funcionament i la precisió en les mesures del dinamòmetre.
- Realitzar unes primeres proves de camp en les que es pugui verificar la funcionalitat dels instruments desenvolupats.

Per al desenvolupament dels dinamòmetres per a ormejos remolcats els objectius específics són:

- Definir el disseny conceptual d'aquests dinamòmetres.
- Definir el disseny de detall i construir un prototipus de cada dinamòmetre.
- Obtenir el model matemàtic que relacioni els senyals dels elements de mesura amb les forces aplicades al dinamòmetre.
- Validar experimentalment el funcionament i la precisió en les mesures dels dinamòmetres.

Per a la resta de l'equipament utilitzat per a la realització d'assajos en camp l'objectiu específic és:

- Posar a punt i programar l'equip d'adquisició de dades per als dinamòmetres, juntament amb altres equips i sensors auxiliars per a la realització d'assajos en camp.