



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudi de les condicions reals d'emmagatzematge de dovelles prefabricades de formigó i la seva possible influència en el comportament estructural.

Treball realitzat per:

Carla Biosca Mecias

Dirigit per:

Javier Pablo Ainchil Lavin

Albert de la Fuente Antequera

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 15 de juny de 2017

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE GRAU

Agraïments

M'agradaria donar les gràcies als meus tutors Javier Pablo Ainchil i Albert de la Fuente pel seu temps dedicat i per donar-me totes les eines necessàries per completar el meu treball final de grau satisfactòriament.

A més a més, i a nivell més personal, vull agrair als meus pares el seu suport incondicional i comprensió al llarg de tota l'etapa acadèmica com també personal. També al meu germà qui sempre m'ha donat un cop de mà quan ho he necessitat. Gràcies, sou un pilar i un referent.

Finalment, expressar el meu agraïment als grans amics que m'emporto de la carrera, sense ells res hagués sigut igual de ben segur. Gràcies per tots aquells somriures que m'heu tret; Com també a la Eugenia perquè malgrat el temps i la distància segueixes estant al meu costat, amiga.

Resum

Aquest treball final de grau pren com a objectiu l'estudi de les condicions reals d'apilament en l'etapa d'emmagatzematge primari de les dovelles prefabricades de formigó i la influència en el seu comportament estructural.

Una de les etapes més crítiques en la fabricació de les dovelles de formigó prefabricat és l'etapa d'emmagatzematge primari degut a que el formigó encara no s'ha curat, per tant encara no ha assolit la seva resistència de disseny. Com a conseqüència, qualsevol sol·licitació de càrrega a la que pugui estar sotmès li pot minvar les propietats mecàniques i estructurals, principalment en termes de durabilitat i resistència del formigó.

D'aquesta manera, s'avaluarà la posició dels suports de les dovelles en l'etapa d'emmagatzematge primari emprades en la construcció d'un túnel a l'Orient Pròxim mitjançant la realització d'una anàlisi estadística composta per més de 100 mostres. S'estudiarà el comportament estructural de les dovelles en diferents casuístiques a partir de casos reals mitjançant la creació d'una calculadora.

Es conclourà, amb una anàlisi sobre la capacitat de resistència, estudiant les diferents quanties de resistència a les que poden estar sotmeses les dovelles de formigó prefabricat quan encara no han assolit la seva màxima resistència.

Resumen

Este trabajo final de grado toma como objetivo el estudio de las condiciones reales de acopio en la etapa de almacenamiento primario de las dovelas prefabricadas de hormigón y la influencia en su comportamiento estructural.

Una de las etapas más críticas en la fabricación de las dovelas de hormigón prefabricado es la etapa de almacenamiento primario debido a que el hormigón aún no se ha curado, por lo tanto, todavía no ha alcanzado la resistencia de diseño. Como consecuencia, cualquier solicitación de cargas a la que pueda estar sometido puede menguarle las propiedades mecánicas y estructurales, principalmente en términos de durabilidad y resistencia del hormigón.

De este modo, se evaluará la posición de los soportes de las dovelas en la etapa de almacenamiento primario usadas en la construcción de un túnel en el Oriente Medio mediante la realización de un análisis estadístico compuesto por más de 100 muestras. Se estudiará el comportamiento estructural de las dovelas en diferentes casuísticas a partir de casos reales mediante la creación de una calculadora.

Se concluirá, con un análisis sobre la capacidad de resistencia, estudiando las diferentes cuantías de resistencia a las que pueden estar sometidas las dovelas de hormigón prefabricado aún no habiendo alcanzado su máxima resistencia.

Abstract

The aim of this final degree project is the study of real conditions of stacking during primary storing of precast concrete segments and their influence over structural behaviour.

One of the most critical stage, during the manufacturing of precast concrete segments, is the stage called primary storing due to concrete has an early age resistance so it doesn't reach its design strength. As a consequence of that, whatever solicitation load can decrease its mechanical and structural properties, in terms of durability and resistance of concrete.

On this way, position of segment supports during primary storing will be evaluated on more than 100 samples, these ones were used throughout the construction of a tunnel in Near East. This data will allow to make a statistical study of the supports position. As well as, structural behaviour of precast segments will be studied for different load cases based on real cases by using the developed calculation tool.

To conclude, resistance capacity will be analysed by studying different magnitude of resistance which can be subjected for the precast concrete segments during the early age resistance.

Índex

<i>Agraïments</i>	<i>ii</i>
<i>Resum</i>	<i>iii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Índex</i>	<i>vi</i>
<i>Llista de taules</i>	<i>ix</i>
<i>Llista de figures</i>	<i>x</i>
Capítol 1. Introducció	1
1.1. Motivació de l'estudi.....	1
1.2. Objectius.....	1
1.2.1. Objectiu principal.....	1
1.2.2. Objectius secundaris.....	2
1.3. Mètodes duts a terme.....	3
Capítol 2. Estat de l'art	4
2.1. Etapes de la construcció del formigó.....	4
2.1.1. Desencofrat i manipulació.....	4
2.1.2. Emmagatzematge primari.....	5
2.1.3. Transport.....	6
2.1.4. Apilament.....	6
2.2. Formigó prefabricat.....	7
2.3. Etapes crítiques del formigó.....	8
2.3.1. Producció del formigó.....	8
2.3.2. Curat.....	9
2.3.3. Emmagatzematge i manipulació.....	9
Capítol 3. Anàlisi estadística	11
3.1. Adquisició de dades.....	11
3.2. Valors obtinguts.....	12
3.3. Estadística.....	14
3.3.1. Dispersió.....	14
3.3.2. Distribució lognormal.....	18

Capítol 4. Anàlisi estructural	21
4.1. Calculadora.....	21
4.1.1. Hipòtesis de càlcul.....	22
4.1.2. Variables de càlcul.....	22
4.1.3. Valors numèrics adoptats.....	23
4.1.3. Càlcul analític.....	23
4.1.4. Validació Midas Civil.....	25
4.2. Hipòtesis d'estudi.....	26
4.2.1. Hipòtesi 1	27
4.2.1.1. Estudi dels tallants	27
4.2.1.2. Estudi dels moments	28
4.2.2. Hipòtesi 2	29
4.2.2.1. Estudi dels tallants	30
4.2.2.2. Estudi dels moments	31
4.2.3. Cas ideal	32
4.2.3.1. Estudi dels tallants	32
4.2.3.2. Estudi dels moments	33
4.2.4. Taula de resum sobre hipòtesis estudiades	33
4.3. Aplicació hipòtesi 2 amb casos reals	34
4.3.1. Cas $X_{Fe} > 0,900$ m.....	35
4.3.1.1. Estudi dels tallants	35
4.3.1.2. Estudi dels moments.....	36
4.3.2. Cas $X_{Fe} < 0,900$ m.....	37
4.3.2.1. Estudi dels tallants	37
4.3.2.2. Estudi dels moments.....	38
4.4. Pitjor cas real recopilat.....	39
4.4.1. Comparativa respecte cas normativa.....	39
4.4.2. Anàlisi de fissuració	44
Capítol 5. Fissuració	46
Capítol 6. Conclusions	48
6.1. Conclusió principal	48
6.2. Conclusions secundaries	48
Capítol 7. Futures línies d'investigació	50
Referències bibliogràfiques	51

Annexos	52
Annex A	53
<i>Fotografies de les dovelles</i>	53
Annex B	69
<i>Validació Midas Civil</i>	69

Llista de taules

<i>Taula 1:</i> valors obtinguts de les dovelles tipus S.....	13
<i>Taula 2:</i> valors obtinguts de les dovelles tipus K	14
<i>Taula 3:</i> hipòtesis de càlcul	22
<i>Taula 4:</i> variables de càlcul	22
<i>Taula 5:</i> Valors numèrics adoptats.....	23
<i>Taula 6:</i> taula resum sobre les hipòtesis estudiades	34
<i>Taula 7:</i> comparació dels resultats amb el cas ideal.....	36
<i>Taula 8:</i> comparació dels resultats amb el cas ideal.....	38
<i>Taula 9:</i> comparativa i elecció del pitjor cas	39
<i>Taula 10:</i> llei de tallants i moments de la llosa solera	40
<i>Taula 11:</i> llei de tallants i moments de la K06	41
<i>Taula 12:</i> llei de tallants i moments de la S05.....	42
<i>Taula 13:</i> llei de tallants i moments de la S04.....	43
<i>Taula 14:</i> valors de les variables	44
<i>Taula 15:</i> valors adoptats en l'estudi de fissuració	46

Llista de figures

<i>Figura 1: desencofrat i manipulació</i>	4
<i>Figura 2: esquema emmagatzematge primari</i>	5
<i>Figura 3: esquema transport</i>	6
<i>Figura 4: esquema apilament</i>	7
<i>Figura 5: evolució de la resistència del formigó al llarg de l'etapa de curat</i>	10
<i>Figura 6: emmagatzematge primari de les dovelles K i peça clau</i>	11
<i>Figura 7: emmagatzematge primari de les dovelles S i llosa solera</i>	11
<i>Figura 8: dispersió valors e i g (S)</i>	15
<i>Figura 9: dispersió valors f i h (S)</i>	16
<i>Figura 10: representació gràfica valors dovella tipus S</i>	16
<i>Figura 11: dispersió valors e i g (K)</i>	17
<i>Figura 12: dispersió valors f i h (K)</i>	17
<i>Figura 13: representació gràfica valors dovella tipus</i>	17
<i>Figura 14: distribució lognormal de tots els valors obtinguts</i>	18
<i>Figura 15: distribució lognormal de tots els valors de l'esquerra obtinguts</i>	19
<i>Figura 16: distribució lognormal de tots els valors de la dreta obtinguts</i>	20
<i>Figura 17: esquema configuració dovella K</i>	21
<i>Figura 18: esquema configuració dovella S</i>	21
<i>Figura 19: esquema força – suport – força - suport</i>	24
<i>Figura 20: esquema suport – força – força – suport</i>	24
<i>Figura 21: esquema suport – força – suport – força</i>	25
<i>Figura 22: esquema força – suport – suport – força</i>	25
<i>Figura 23: esquema configuració dovella K</i>	26
<i>Figura 24: esquema configuració dovella S</i>	27
<i>Figura 25: possible moviment de R_g i F_e en la hipòtesi 1</i>	27
<i>Figura 26: tallants en les suports en funció de la posició de F_e i R_g</i>	28
<i>Figura 27: moments amb valor absolut en la posició del suport esquerra</i>	29
<i>Figura 28: esquema dels diversos casos d'estudi de la hipòtesi 2</i>	30
<i>Figura 29: tallants en les suports en funció de la posició de F_e</i>	30
<i>Figura 30: moments en els suports, F_e i l_{lum} en funció de la posició de F_e</i>	31
<i>Figura 31: esquema cas ideal</i>	32
<i>Figura 32: tallants cas ideal</i>	32

<i>Figura 33: moments cas ideal</i>	33
<i>Figura 34: esquema cas real $X_{Fe} > 0.90$ m</i>	35
<i>Figura 35: tallants cas real $X_{Fe} > 0,900$ m</i>	35
<i>Figura 36: moments generats cas real $X_{Fe} > 0.90$ m</i>	36
<i>Figura 37: esquema cas real $X_{Fe} < 0.90$ m</i>	37
<i>Figura 38: reaccions generades cas real $X_{Fe} < 0.90$ m</i>	37
<i>Figura 39: moments generats cas real $X_{Fe} < 0,900$ m</i>	38
<i>Figura 40: apilament dovelles "6161 14 01 16 S"</i>	39
<i>Figura 41: fissuració pitjor cas real</i>	44
<i>Figura 42: variació de la resistència a tracció del formigó</i>	46
<i>Figura 44: llosa-clau, resultats calculadora</i>	70
<i>Figura 45: llosa-clau, resultat de la llei de tallants Midas Civil</i>	70
<i>Figura 46: llosa-clau, resultat de la llei de moments Midas Civil</i>	70
<i>Figura 47: dovella K01-S04, resultats calculadora</i>	71
<i>Figura 48: dovella K01-S04, resultat de la llei de tallants Midas Civil</i>	71
<i>Figura 49: dovella K01-S04, resultat de la llei de moments Midas Civil</i>	71
<i>Figura 50: dovella K01-S04, resultats calculadora</i>	72
<i>Figura 51: dovella K01-S04, resultat de la llei de tallants Midas Civil</i>	72
<i>Figura 52: dovella K01-S04, resultat de la llei de moments Midas Civil</i>	72

Capítol 1. Introducció

1.1. Motivació de l'estudi

L'estudi d'aquesta tesi es basarà en l'avaluació de l'etapa més crítica a la que estan sotmeses les dovelles prefabricades de formigó armat al llarg de tot el seu procés constructiu, l'etapa d'emmagatzematge primari. Al llarg d'aquesta etapa, les dovelles estan apilades unes damunt de les altres, separades per uns suports.

Les dovelles superiors generen unes càrregues permanents en aquesta etapa sobre les dovelles inferiors de manera que suporten esforços a flexió. El formigó encara s'està curant i no ha assolit la resistència de disseny per tant cal vigilar la part de la dovella sotmesa a esforços a tracció ja que poden aparèixer fissures.

Les dovelles fissurades no són aptes per a la construcció de l'anell. Cal evitar aquest problema per garantir el subministrament de dovelles durant la construcció del túnel, no aturar els treballs de la tuneladora i així evitar endarreriments en el termini d'execució del túnel en el cas que l'emmagatzematge de dovelles disponible no sigui suficient.

Durant l'etapa de servei, les dovelles prefabricades de formigó armat que conformen l'anell del túnel estan sotmeses a compressió. Però durant l'etapa d'emmagatzematge primari, a l'haver esforços de flexió és necessari l'ús d'armats per poder suportar la tracció a la que es troben sotmeses parts de les dovelles. També apareixen esforços de flexió en l'etapa d'excavació quan la tuneladora empeny contra el terreny utilitzant les dovelles com a suport en el seu avanç. És a dir, les armadures tenen un cost que tan sols és amortitzat en un període breu de temps però molt decisiu a la vegada ja que és en aquesta etapa on hi poden haver-hi fissures.

1.2. Objectius

1.2.1. Objectiu principal

L'objectiu principal del present treball final de grau consisteix en avaluar la influència de l'excentricitat en la col·locació dels suports de les dovelles respecte l'aparició de fissures durant l'etapa d'emmagatzematge primari.

La normativa ACI (*American Concrete Institute*) desenvolupa estàndards, normes i recomanacions tècniques amb referència al formigó. La normativa ACI 544 tracta sobre les dovelles de formigó prefabricat, es recomana l'ús d'una excentricitat de 0,100 m. Malgrat això, el projectista pot prendre la decisió d'augmentar l'excentricitat sempre i quan n'assumeixi els riscos.

En el projecte constructiu estudiat el projectista adopta una excentricitat de 0,250 m, és a dir, s'assumeixen els riscos d'unes toleràncies majors en la col·locació dels suports en l'etapa d'emmagatzematge primari.

En aquest treball final de grau s'estudiarà la relació de l'augment de l'excentricitat amb l'aparició de fissures eventualment observades en les dovelles.

1.2.2. Objectius secundaris

Per tal d'assolir l'objectiu principal d'aquest treball final de grau, es defineixen els següents objectius:

1. Estudi de les diferents etapes en les que es troben les dovelles de formigó: des de l'etapa de curat i fins que són emprades en la construcció del túnel. Determinar quina és la més crítica en l'aparició de fissures.
2. Registrar les distàncies dels suports de les dovelles fotografiades al llarg de l'etapa d'emmagatzematge primari. Realitzar una anàlisi estadística dels valors mesurats per avaluar la col·locació dels suports de les dovelles.
3. Disseny i validació d'una calculadora per determinar les càrregues a les que estan sotmeses les dovelles en funció de la posició dels suports de les dovelles. Conèixer les posicions òptimes i les més crítiques.
4. Considerar diferents hipòtesis estructurals respecte la posició dels suports a partir de les quals s'estudiarà el pitjor cas real respecte les distàncies ja registrades, i compararla amb el cas òptim.
5. Analitzar la fissuració, és a dir, la capacitat de resistència a tracció de les dovelles a la que poden estar sotmeses al llarg de l'edat primària del formigó prefabricat, inferior a 28 dies.

1.3. Mètodes duts a terme

Per assolir els objectius proposats, els mètodes que s'han seguit en l'elaboració d'aquest treball són els següents:

- En el Capítol 1 s'introdueix el tema principal d'estudi i s'esmenten els objectius a assolir, amb la metodologia que es seguirà per dur-los a terme.
- En el Capítol 2 es realitzarà un estudi sobre les diverses etapes a les que estan sotmeses les dovelles de formigó prefabricat al llarg de tot el procés de curat del formigó fins que assoleix la resistència de disseny als 28 dies. A més a més, es parlarà sobre les diverses particularitats que té el formigó prefabricat les quals han de ser considerades per obtenir un formigó compatible al llarg de la seva vida de disseny, en certs casos fins als 100 anys. A partir d'aquesta informació, es procedirà a estudiar una de les etapes més crítiques a la que estan sotmeses les dovelles prefabricades de formigó, l'emmagatzematge primari.
- En el Capítol 3 mitjançant l'AutoCAD, s'extrauran les diferents distàncies respecte la col·locació dels suports amb l'extrem de la dovella inferior, a través de la recopilació de fotografies de les dovelles apilades seguint la configuració de l'etapa d'emmagatzematge primari. Les mesures obtingudes d'una mostra de més de 100 dovelles s'analitzaran des del punt de vista estadístic.
- En el Capítol 4 s'idearà una calculadora que simularà les infinites posicions que poden tenir els suports de les dovelles, a partir de la qual s'obtinran els diagrames de tallants i moments per a cada dovella que comprèn la configuració estudiada. Finalment, s'estudiaran diferents hipòtesis respecte les col·locacions dels suports de les dovelles a partir de les quals s'avaluarà el pitjor cas real de les fotografies que s'han pres com a mostra d'estudi.
- En el Capítol 5 s'analitzarà la fissuració, és a dir, la capacitat de resistència a tracció del formigó que poden arribar a tenir les dovelles, sotmetent-les a diferents quanties de resistència en l'edat primària del formigó prefabricat, inferior a 28 dies.
- En el Capítol 6 es conclourà amb un resum de les conclusions, fruit de la metodologia que s'ha seguit.
- En el Capítol 7 es proposaran algunes de les actuacions que es poden dur a terme en un futur.

Capítol 2. Estat de l'art

2.1. Etapes de la construcció del formigó

2.1.1. Desencofrat i manipulació

La fabricació de la dovella consisteix en un procés de formigonat d'un element el qual es troba dins d'una encofrat normalment mòbil, en el que hi ha la armadura d'acer i que posteriorment es sotmès a un procés de curat accelerat al vapor.

Un cop donada la forma volumètrica al formigó i aconseguir una estructura compatible amb la del disseny, es procedeix al desencofrat fora del túnel de curat. Aquest consisteix en extreure cada dovella del encofrat a través d'un sistema d'erecció situat al centre de la dovella el qual l'alça. Seguidament, s'aplica una capa de pintura a cada dovella per a protegir-les davant la corrosió.



Figura 1: desencofrat i manipulació

Al llarg d'aquesta etapa, la única càrrega a considerar és el pes propi de la dovella. Degut a que la definició del sistema de erecció encara no s'ha desenvolupat en aquesta etapa. Per seguretat es considera tan sols el punt d'elevació i es col·loca al centre de la secció de la dovella. A la realitat la dovella es subjectada i manipulada per un sistema que li fa el buit, aconseguint minimitzar qualsevol moment i cisallament que es pugui generar en la seva secció tal i com s'observa en la *Figura 1*.

Es considerarà un factor de càrrega de 1,35 per al pes propi i un factor dinàmic addicional de 1,5, llavors el factor amplificat total serà $1,35 \cdot 1,5 = 2,025$. Aquest valor és consistent amb el factor 2.0 proposat per FHWA 2103. El formigó considerat per a aquest càlcul d'estat tindrà propietats de resistència a l'edat primerenca ja que el formigó encara no s'ha curat, per tant encara no ha assolit la seva resistència de disseny.

2.1.2. Emmagatzematge primari

L'anell complet serà emmagatzemat en dos grups: un grup de tres dovelles més la peça clau a la part superior i un altre grup de tres dovelles més la llosa solera a la part superior. Tal i com s'observa a la imatge, la configuració de l'esquerra està constituïda per la dovella K01, K02, K03 i la peça clau mentre que la configuració de la dreta està formada per la dovella S04, S05, S06 i la llosa solera. En la *Figura 2* es mostren les configuracions descrites.

Els suports de les dovelles tenen una distribució òptima, separats a una distància entre ells de 2,500 m, és a dir, situats a una distància de 0,900 m des de l'extrem de la dovella. Per seguretat, es considera una excentricitat accidental en les dovelles de $e = 0,250$ m, per a poder tenir en compte el possible desalineament dels suports de les dovelles.



Figura 2: esquema emmagatzematge primari

A més a més, les dovelles s'han dissenyat per a evitar qualsevol fissura durant les etapes primàries. En cas que no fos possible, l'ample de fissura permès és de 0,100 mm.

Fins aquesta etapa inclosa les dovelles han tingut una edat prematura de resistència (C16/20).

En aquesta etapa d'emmagatzematge primari, el formigó per al càlcul tindrà propietats de resistència a l'edat primerenca, com en l'estat de desencofrat i manipulació. No tan sols es considerarà un factor de càrrega de 1,35 per al propi pes sinó un factor dinàmic addicional de 1,5. Llavors el factor d'amplificació total és $1,35 \cdot 1,5 = 2,025$. Aquest valor és consistent amb el factor 2,0 és proposat per FHWA 2103.

Per a aquesta fase, quan s'apilen les dovelles, s'utilitzen dos configuracions estructurals, incloent el desalineament dels suports del segment. Aquest desalineament és el que s'anomena excentricitat. A partir de la qual es desenvoluparà l'estudi d'aquesta tesi

2.1.3. Transport

De cara a l'etapa del transport d'un anell sencer, les dovelles s'apilen seguint la mateixa estructura que en l'etapa d'emmagatzematge primari: en dos grups formats per quatre dovelles. Un grup de tres dovelles (K01, K02, K03) més la peça clau a la part superior i un altre grup de tres dovelles (S04, S05, S06) més la llosa solera a la part superior. Per aquest estat de càlcul, la configuració analitzada és la mateixa respecte l'estat d'emmagatzematge primari. Per a major seguretat, es considerarà de cara al càlcul estructural que les quatre dovelles podrien estar apilades com a la configuració que es mostra en la *Figura 3*.

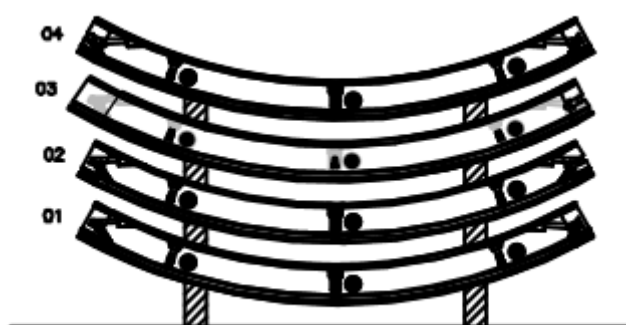


Figura 3: esquema transport

Al llarg d'aquesta etapa les dovelles ja tenen una resistència de 28 dies (C50/60). El factor dinàmic pren un valor de 2,0 a part del factor de càrrega de pes propi de 1,35.

2.1.4. Apilament

Es considera que per a l'etapa d'apilament l'anell sencer es pot apilar en una sola configuració, com s'observa en la *Figura 4*.

Es considera un factor de càrrega de 1,35 per al pes propi i un factor dinàmic addicional de 1,5. Aquest valor és consistent amb FHWA 2103. Aquest factor dinàmic només s'aplicarà a una de les dovelles i no a la peça clau per tal d'estar al costat de la seguretat. El formigó considerat per aquest estat tindrà els seus paràmetres de resistència assolits, resistència als 28 dies. Es poden considerar diferents configuracions per l'apilament, la *Figura 5* n'és un exemple, que en termes de càlcul estructural conduiria al mateix disseny de secció.

Tant en l'emmagatzematge primari, transport i apilament l'excentricitat accidental és de $e = 0,250$ m. S'entén per excentricitat, la distància tolerable que pauta el propi projectista (la normativa estableix un valor d'excentricitat de $e = 0,100$ m).

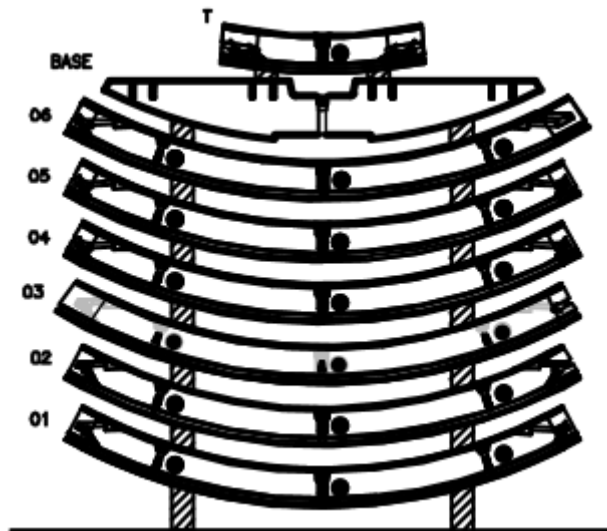


Figura 4: esquema apilament

S'observa en aquesta figura l'apilament de l'anell sencer en una mateixa configuració.

2.2. Formigó prefabricat

Les dovelles de formigó prefabricat tenen una sèrie de particularitats que s'han d'estudiar i detallar mitjançant un enfocament diferent a la resta de materials, tot seguit s'esmenten breument.

La primera particularitat és que les dovelles que constitueixen cada un dels anells del túnel són peces prefabricades, és a dir, peces realitzades en una fàbrica en lloc d'*in situ*. Com a conseqüència, les peces tenen un millor control de qualitat i per tant el seu gruix de recobriment es pot ajustar molt més sempre complint la normativa. Es pren 45 mm com a gruix de recobriment per al projecte d'estudi.

També s'ha de considerar la definició geomètrica de les dovelles, les quals tenen un gruix molt ajustat, en el cas d'estudi 0,350 m. Per reduir les dimensions dels elements el màxim possible, el recobriment del formigó s'ha de mantenir en el mínim.

Aquestes particularitats han de ser considerades per obtenir una barreja de formigó compatible al llarg de la seva vida útil, 100 anys, i al mateix temps assolir un recobriment mínim que sigui compatible amb el disseny.

La solució més adient a tot això, consisteix en l'ús d'una barreja de formigó de qualitat amb l'adició de components químics especials i tractaments externs per poder incrementar la durabilitat del formigó al llarg de la seva vida útil. Sense aquets tractaments addicionals que se

li apliquen al formigó per complir les seves propietats al llarg de la vida útil, s'hauria d'augmentar el recobriment. Cal recordar que un dels principals requeriments, ja esmentats, és mantenir-lo al mínim.

En referència al disseny de durabilitat del formigó prefabricat es poden seguir bàsicament dos estratègies:

- a) Evitar la degradació de l'estructura en referència al tipus i l'agressivitat del medi ambient, utilitzant elements que actuïn com a barrera de cara a la protecció d'aquesta.
- b) Seleccionar tant una composició òptima del material com detalls estructurals per a resistir durant un període determinat d'ús (quan la estructura es amenaçada).

Per a les dovelles de formigó prefabricat es sol seleccionar la segona estratègia.

2.3. Etapes crítiques del formigó

En el sector del formigó prefabricat, les dificultats a tenir en compte són les condicions ambientals amb les que es treballa, tant en l'etapa d'emmagatzematge de les dovelles com en la seva col·locació formant el túnel. També cal considerar la naturalesa del sòl superficial i subterrània com també la disponibilitat de tenir bons materials i treballadors ben qualificats.

Una especial característica a tenir en compte quan es treballa amb elements de formigó prefabricat són les etapes prèvies a la construcció del túnel: desencofrat i manipulació, i l'emmagatzematge primari. En aquestes etapes inicials el formigó prefabricat encara no està del tot curat, és per això que al llarg d'aquest període el comportament del formigó es pot veure directament afectat ja que encara no ha assolit la seva resistència.

2.3.1. Producció del formigó

Encara que formi part d'un procés industrial es considerada com una etapa crítica la cadena de producció del formigó. D'aquesta manera, es deu realitzar un procés d'alt control ha de ser dut a terme durant la producció de les dovelles de formigó per garantir la qualitat d'aquest.

Un aspecte molt important és la docilitat del formigó per a que pugui circular fàcilment per les armadures i s'evitin buits, tot mantenint una relació aigua ciment baixa pel tal de no comprometre a la resistència.

2.3.2. Curat

L'etapa de curat del formigó és, sens dubte, l'etapa més crítica de totes les operacions de construcció respecte a la durabilitat del formigó. Degut a que totes les especificacions del disseny del formigó es podrien arribar a perdre si el curat no es dur a terme correctament. És a dir, l'etapa de curat afecta directament a la durabilitat del formigó, i està formada per dues parts. En la primera, el curat es realitza en condicions accelerades dintre del túnel o cambra de curat durant un període comprès de 5 fins a 7 hores. A dins la cambra o túnel es garanteix una humitat pròxima al 100 % per tal de que la hidratació es pugui produir adequadament. Així com una temperatura del ordre de 50 a 70 graus Celsius. La segona part de curat té un període d'un ordre de 28 dies en condicions ambientals.

2.3.3. Emmagatzematge i manipulació

Les etapes d'emmagatzematge i manipulació són crítiques per assegurar un bon funcionament dels elements prefabricats de formigó. Aquestes etapes s'han de cenyir a les descrites en el disseny, per tal de:

- Evitar que es generin forces addicionals degut a l'incorrecte emmagatzematge i manipulació. En el disseny del formigó prefabricat ja s'han tingut en compte certs delineaments en l'emmagatzematge de les dovelles que no poden superar l'excentricitat permesa, intervals de tolerància. La condició d'emmagatzematge en la fàbrica i en el camp de construcció ha de ser verificada d'acord amb els requisits de disseny.
- Evitar els danys en les dovelles prefabricades ja que si els recobriments es redueixen o els tractaments de superfície estan danyats, s'espera que la vida de disseny no es podrà assolir. Per tal d'assegurar la durabilitat que s'estima, hi hauran alts controls de qualitat en els agregats, l'aigua, els additius, els tractaments de superfície, les addicions, el formigó, el curat, l'emmagatzematge i la manipulació.

S'assumeix que les propietats del formigó prefabricat no es reduiran en el procés de construcció.

Considerant que una de les etapes més crítiques a les que estan sotmeses les dovelles de formigó prefabricat és en l'etapa d'emmagatzematge primari degut a que el formigó encara no ha arribat a la seva resistència màxima, 28 dies; i per tant qualsevol càrrega a la que pugui estar sotmès li pot ocasionar que no assoleixi les propietats desitjades.

Tal i com es mostra en la *Figura 5*, a partir dels 28 dies la resistència del formigó ja ha assolit el seu màxim llindar.

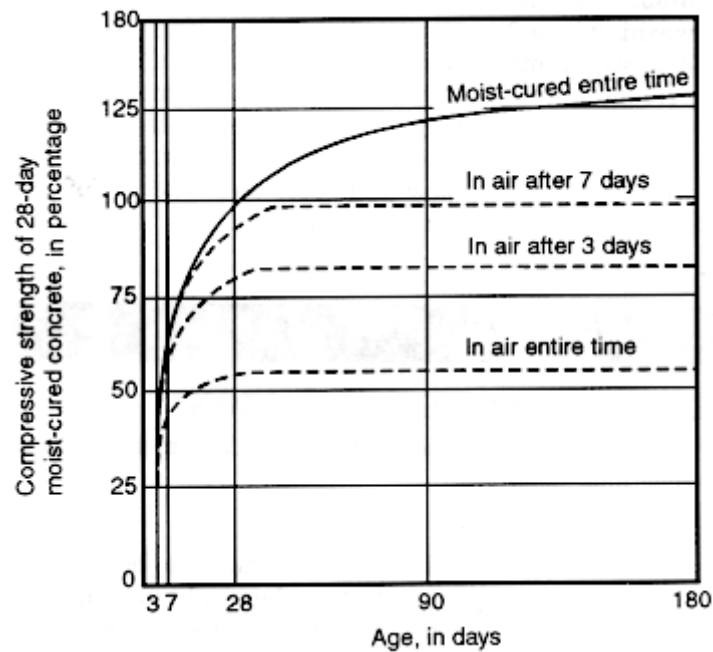


Figura 5: evolució de la resistència del formigó al llarg de l'etapa de curat

L'objectiu principal d'aquesta tesi consistirà en analitzar la possible influència en el comportament estructural de les dovelles prefabricades de formigó en les condicions reals d'emmagatzematge primari segons la col·locació dels seus suports. Tenint en compte que l'etapa d'estudi és la més crítica de cara al comportament de les dovelles dissenyades.

Capítol 3. Anàlisi estadística

3.1. Adquisició de dades

Inicialment, es tenien recopilats més de 100 grups de dovelles fotografiades des de diferents perspectives per poder observar les posicions dels suports respecte les dovelles. Aquestes dovelles estan apilades seguint l'estructura de l'etapa d'emmagatzematge.

Utilitzant l'AutoCAD, s'han extret les diferents distàncies respecte la col·locació dels suports amb l'extrem de la dovella. Per tant, de cada dovella se n'extreuen 4 mesures (e , f , g , h). Tal com s'il·lustra en les següents figures:

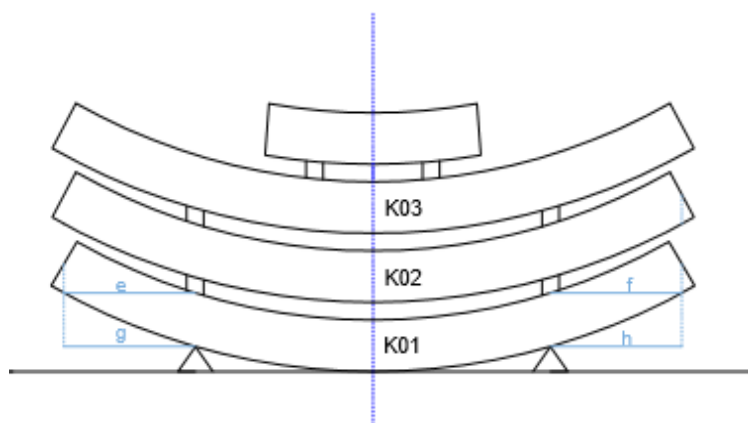


Figura 6: emmagatzematge primari de les dovelles K i peça clau

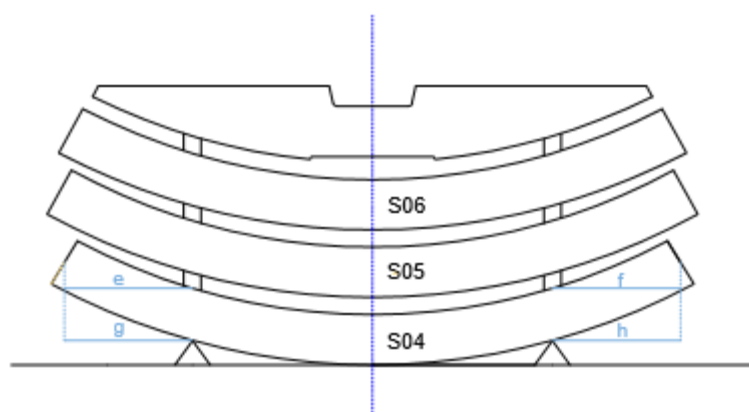


Figura 7: emmagatzematge primari de les dovelles S i llosa solera

Es considera com a mesura coneguda el gruix de cada dovella, 0,350 m, a partir de la qual es poden extreure la resta.

Per tal de simplificar el cas, s'ha realitzat l'estudi de les dovelles K01 i S04, les dovelles que en l'etapa d'emmagatzematge primari es troben situades en la part inferior. L'estudi es centrarà en aquestes dos dovelles degut a que són les que reben la major quantia de càrregues.

El procediment que s'ha dut a terme per extreure els resultats és el següent:

1. Editar la imatge per poder-li donar una bona orientació, és a dir, intentar que el grup de les dovelles estigui el màxim perpendicular possible respecte l'observador.
2. Escalar la imatge a partir del gruix conegut de la dovella.
3. Prendre les mesures d'estudi (e, f, g, h). Ara aquestes ja corresponen a les mesures reals.

Aquestes mesures s'han pres des del centre del gruix de la dovella.

Cal considerar un cert error gràfic d'aquestes dades adquirides degut a la falta de precisió.

3.2. Valors obtinguts

Les següents taules, *Taula 1 i 2*, mostren els valors obtinguts a partir de mesurar les distàncies dels suports fins els extrems de les dovelles fotografiades mitjançant l'AutoCAD.

La normativa ACI (*American Concrete Institute*) desenvolupa estàndards, normes i recomanacions tècniques amb referència al formigó. La normativa ACI 544 tracta sobre les dovelles de formigó prefabricat, es recomana l'ús d'una excentricitat de 0,100 m. Malgrat això, el projectista pot prendre la decisió d'augmentar l'excentricitat sempre i quan n'assumeixi els riscos.

Les distàncies obtingudes provenen d'un projecte del Medi Orient a partir del qual el projectista va decidir prendre $e = 0,250$ m com a valor d'excentricitat.

Els valors e, f, g, h corresponen a les distàncies de les configuracions representades en les *Figures 6 i 7*. Cal destacar que aquets valors, tal i com s'observen en les figures ja esmentades, no són els valors d'excentricitat sinó la distància respecte l'extrem de la dovella. Per poder conèixer els valors d'excentricitat se'ls hi haurà de restar 900 mm.

S	g (mm)	e (mm)	h (mm)	f (mm)
5565 27 12 15 S	914	795	1.009	942
5592 22 12 15 S	830	843	878	1.089
5595 28 12 15 S	700	678	935	903
5629 29 12 15 S	854	725	945	919
5636 23 12 16 S	679	751	993	982
5658 30 12 15 S	647	710	785	939
5744 26 12 15 S	534	716	819	982
5764 27 12 15 S	772	726	1.107	993
5777 02 01 16 S	756	727	858	932
5810 28 12 16 S	600	697	847	908
5887 06 01 16 S	755	757	1.260	991
5896 31 12 15 S	692	739	915	994
5905 06 01 16 S	642	753	791	1.082
6032 05 01 16 S	850	848	1.003	1.031
6061 11 01 16 S	772	813	952	909
6095 12 01 16 S	666	725	944	946
6123 13 01 16 S	704	700	1.028	860
6161 14 01 16 S	1.067	765	933	956
6163 14 01 16 S	972	762	809	987
6226 11 01 16 S	655	754	910	954
6230 11 01 16 S	709	722	836	1.052
6256 12 01 16 S	790	739	881	980
6260 12 01 16 S	823	754	1.031	987
6265 16 10 16 S	763	817	1.105	972
6269 17 01 16 S	692	762	1.008	999
6299 17 01 19 S	875	739	1.157	905
6370 15 01 16 S	724	734	1.181	1.004
6376 15 01 16 S	751	761	999	957
6446 17 01 16 S	733	1.059	896	949
6478 18 01 16 S	805	768	967	859
6490 18 01 16 S	843	744	1.083	991
6529 26 01 16 S	804	730	893	909
6572 21 01 16 S	686	782	914	969
6597 28 01 16 S	804	699	1.123	965
6620 23 01 16 S	619	724	1.006	932
6714 26 01 16 S	797	762	1.002	961
6740 27 01 16 S	655	740	861	891
6941 07 01 16 S	1.033	737	980	967
7285 12 02 16 S	850	776	1.058	1.036
7289 18 02 16 S	685	811	1.065	1.045
7311 19 02 16 S	844	1.057	1.087	974
7317 19 01 16 S	684	800	895	917
7319 19 02 16 S	685	721	988	1.012
7345 20 02 16 S	761	715	900	939
7389 21 02 16 S	777	782	935	980
7391 21 02 16 S	916	750	830	942
7405 22 02 16 S	768	739	919	943
7500 19 02 16 S	784	743	853	928
7520 20 02 16 S	820	715	1.064	964
7530 20 02 16 S	706	774	778	902
7544 21 02 16 S	670	738	1.120	817
7576 22 02 16 S	843	738	1.394	1.219
7615 03 03 16 S	964	716	994	933
7758 29 02 16 S	816	725	906	956

Taula 1: valors obtinguts de les dovelles tipus S

K	g (mm)	e (mm)	h (mm)	f (mm)
5575 27 12 16 K	871	960	795	836
5595 28 12 15 K	862	1.010	1.056	773
5661 30 12 15 K	1.066	991	708	786
5774 27 12 05 K	949	963	779	829
5778 28 12 15 K	970	1.008	795	860
5850 29 12 16 K	1.109	974	998	837
6087 12 01 16 K	957	965	785	927
6905 12 01 16 K	1.063	1.013	807	838
6147 13 01 16 K	1.158	1.014	835	848
6161 14 01 16 K	1.025	990	966	908
6215 15 01 16 K	1.157	958	809	837
6226 11 01 16 K	1.032	1.023	945	853
6230 11 01 16 K	1.034	927	727	823
6256 12 01 16 K	825	936	771	745
6258 12 01 16 K	782	756	921	1.002
6301 17 01 19 K	945	943	841	823
6325 18 01 16 K	895	1.017	865	830
6347 19 01 16 K	1.058	925	684	815
6429 21 01 16 K	1.005	945	749	842
6654 24 01 16 K	992	957	781	897
6714 26 01 16 K	912	939	811	801
7309 19 02 16 K	1.170	1.214	828	874
7365 21 02 16 K	863	960	769	785
7379 21 02 16 K	1.229	979	950	844
7490 12 02 16 K	588	705	960	999
7536 21 02 16 K	1.117	945	820	789
7548 21 02 16 K	999	928	728	868

Taula 2: valors obtinguts de les dovelles tipus K

3.3. Estadística

A partir de les dades obtingudes mitjançant les fotografies analitzades a través de l'AutoCAD, s'han realitzat diferents anàlisis estadístics per tal de poder tractar les dades recopilades i observar els diferents comportaments respecte les posicions dels suports de les dovelles K01 i S04.

A partir d'aquest tractament de dades, s'analitzaran les diferents sol·licitacions de càrregues que poden arribar a rebre les dovelles les quals es troben situades en la part inferior de la configuració al llarg de l'etapa d'emmagatzematge primari.

3.3.1. Dispersió

En aquest apartat es mostrarà d'una manera molt visual els diferents intervals sobre els que es mouen les dades recopilades, a través dels gràfics de dispersió.

S'ha observat que les dovelles tipus S respecte les tipus K tenen comportaments completament diferents respecte la col·locació dels seus suports. Com a conseqüència, es desglossaran en dos casos. Dins d'aquets, es farà l'anàlisi del suport dret i l'esquerra per separat.

Es considera que la distància òptima a la que han d'estar col·locats els suports de les dovelles és a 0,900 m des de l'extrem de la dovella. Aquesta distància òptima serà comprovada en els següents capítols. L'excentricitat que el projectista va adoptar, de cara a les dovelles que s'estudien, compren un valor de $e = 0,250$ m.

A través de les figures que es mostren a continuació, s'il·lustra gràficament la tendència de la col·locació dels suports. S'observa en la *Figura 8*, la representació de la dispersió de tots els valors e i g de la *Taula 1*, dovelles tipus S. Pràcticament totes les col·locacions dels suports de les dovelles estan dins l'interval permès, llevat de 5 d'una mostra de 54 dovelles. Encara que no tendeix sobre l'excentricitat nul·la sinó sobre els 0,150 m cap a l'esquerra respecte el suport.

Mentre que en la *Figura 9*, s'observa la representació de la dispersió de tots els valors f i h de la *Taula 1*, dovelles tipus S. Pràcticament totes les col·locacions dels suports de les dovelles estan dins l'interval permès, llevat de 4 d'una mostra de 54 dovelles. Encara que no tendeix sobre l'excentricitat nul·la sinó sobre els 0,075 m cap a l'esquerra respecte el suport.

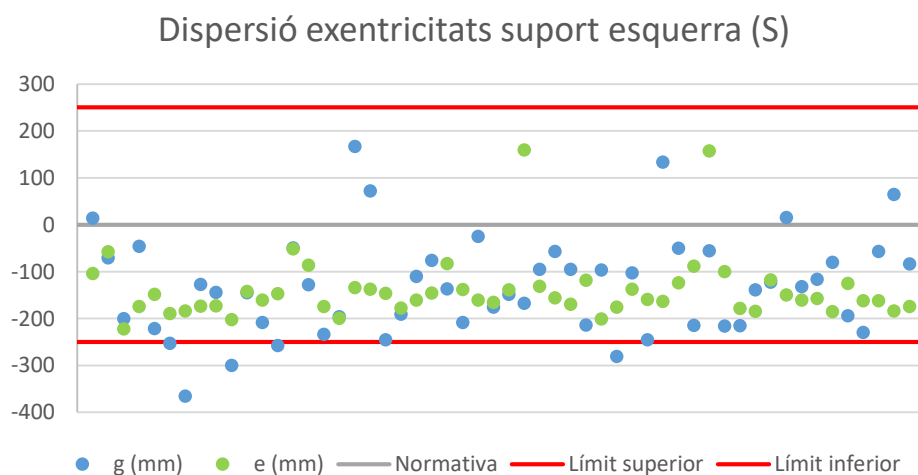


Figura 8: dispersió valors e i g (S)

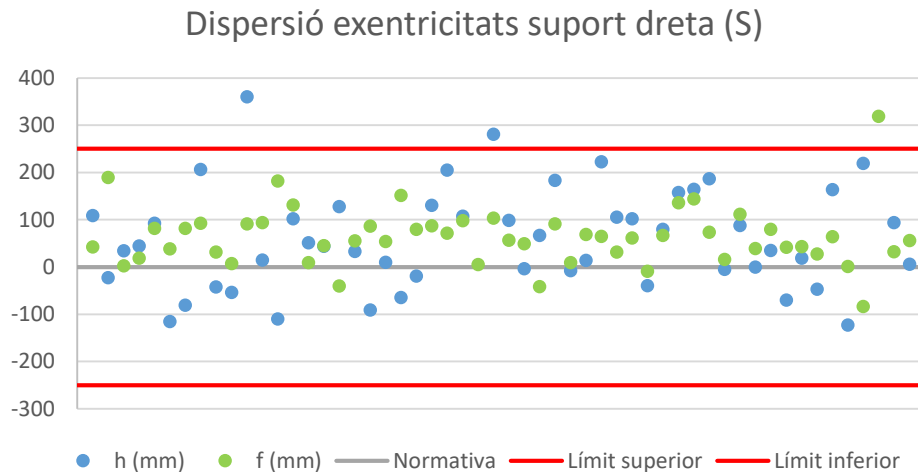


Figura 9: dispersió valors f i h (S)

La *Figura 11* mostra la representació gràfica de les *Figures 9 i 10* a partir d'un esquema il·lustratiu de la tendència en la col·locació dels suports de les dovelles tipus S. Les línies marcades en vermell marquen l'interval comprès entre les excentricitats que s'han treballat al llarg del projecte present.



Figura 10: representació gràfica valors dovella tipus S

Els operaris encarregats de la col·locació dels suports de les dovelles van prendre malament el sistema de referència de 0,900 m des de l'extrem de la dovella (punt en el que l'excentricitat pren valor 0 mm) ja que tant els valors e i g com els f i h estan moguts cap al marge esquerra.

De cara a les dovelles tipus K, mitjançant els gràfics que es mostren a continuació, s'il·lustra gràficament la tendència de la col·locació dels suports. S'observa en la *Figura 11*, la representació de la dispersió de tots els valors e i g de la *Taula 2*, dovelles tipus K. Pràcticament totes les col·locacions dels suports de les dovelles estan dins l'interval permès, llevat de 5 d'una mostra de 27 dovelles de les quals s'han pres dos mesures (e, g). Encara que no tendeix sobre l'excentricitat nul·la sinó sobre els 0,050 m cap a la esquerra respecte el suport.

Mentre que en la *Figura 12*, s'observa la representació de la dispersió de tots els valors f i h de la *Taula 2*, dovelles tipus K. Totes les col·locacions dels suports de les dovelles estan dins l'interval permès, d'una mostra de 27 dovelles de les quals s'han pres dos mesures (f, h). Encara

que no tendeix sobre l'excentricitat nul·la sinó sobre els 0,100 m cap a la dreta respecte el suport.

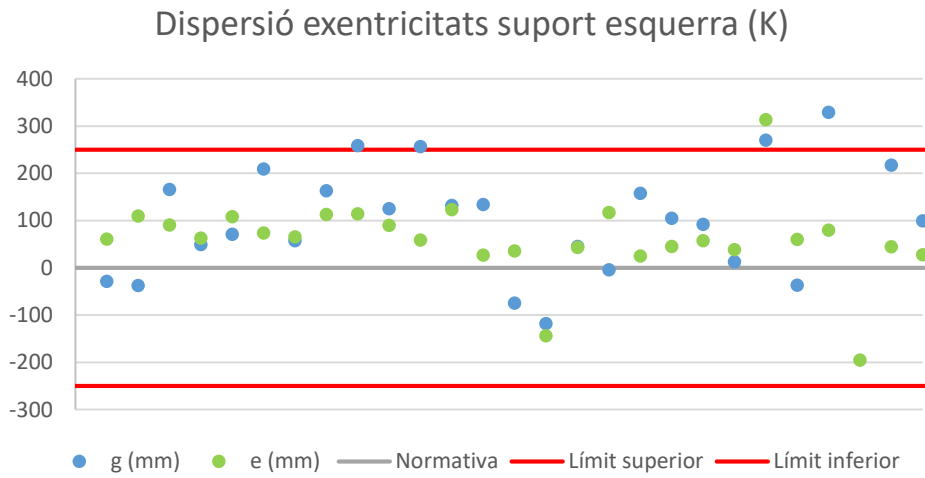


Figura 11: dispersió valors e i g (K)

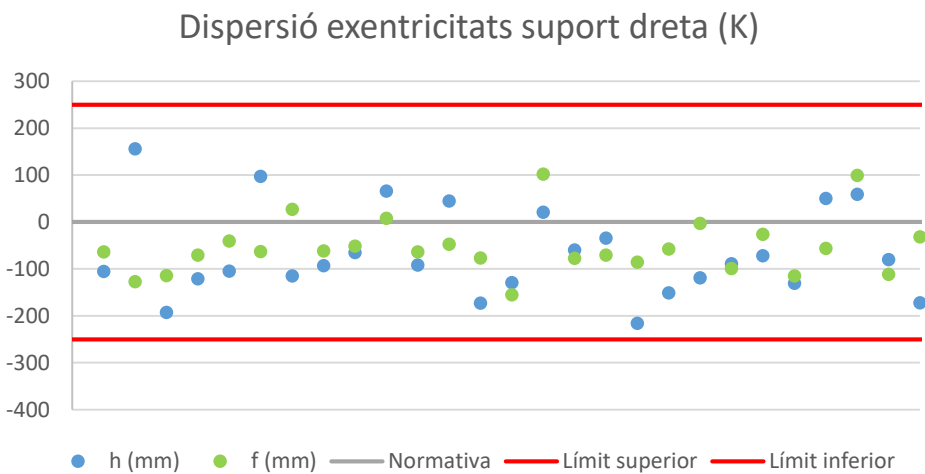


Figura 12: dispersió valors f i h (K)

A continuació es mostra la representació gràfica de les *Figures 11 i 12* a partir d'un esquema il·lustratiu de la tendència en la col·locació dels suports de les dovelles tipus K. Les línies marcades en vermell marquen l'interval de tolerància que s'ha pres.



Figura 13: representació gràfica valors dovella tipus

Els operaris encarregats de la col·locació dels suports de les dovelles van prendre malament el sistema de referència de 0,900 m des de l'extrem de la dovella (punt en el que l'excentricitat pren valor 0 mm) ja que tant els valors e i g com els f i h els han corregut cap al marge dret.

En ambos casos, tant les dovelles tipus S com tipus K, els operaris no han pres el sistema de referència correctament. Més curiós és, que per a la dovella tipus S l'han tendit cap a l'esquerra mentre que per a la dovella tipus K cap a la dreta. Podria ser degut a que la persona que els hi va donar la instrucció fos diferent per a cada tipus de dovella ja que la tendència està en direccions oposades.

Un cop analitzades les dades adquirides cal esmentar que tant la col·locació dels suports de la dreta com els de la esquerra són successos no dependents entre ells.

3.3.2. Distribució lognormal

Els valors que es mostren en aquest apartat són els valors de les excentricitats, és a dir, els valors de les *Taules 1 i 2* se'ls hi ha restat 900 mm i s'han deixat amb valor absolut ja que la distància és una mesura que sempre es considera com a positiva independentment de la direcció a la que estigui.

Primerament, es va considerar un estudi de les distribucions normals per a les dades obtingudes però un cop que es va realitzar aquest, es va creure oportú representar la distribució lognormal ja que tots els valors prenen valors positius.

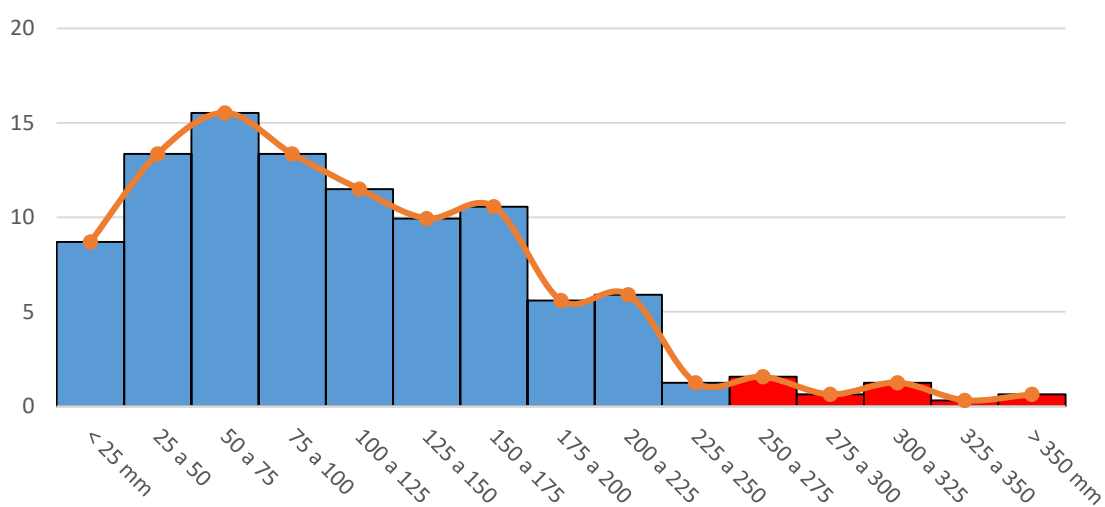


Figura 14: distribució lognormal de tots els valors obtinguts

La *Figura 14* mostra la distribució lognormal de totes les dades obtingudes, independentment de si és la configuració de la dovella tipus S o K o bé si s'estudia la part de la dreta o esquerra de la configuració. En l'eix de les ordenades hi han les mesures normalitzades respecte el cent per cent, és a dir, el percentatge que ocupen respecte el total de la mostra estudiada i en l'eix de les abscisses es marca la freqüència establerta en aquest estudi, 25 mm.

Les barres marcades en color vermell corresponen a les mesures que ja estan fora dels intervals de l'excentricitat permesa pel projectista, és a dir, en alguns casos els operaris encarregats de la col·locació dels suports van sobrepassar l'interval permès.

A partir d'aquest estudi, se n'extreu que el valor mitjà, que correspon al percentil del 50% de la mostra, pren un valor de 99 mm. El valor característic, que correspon al percentil del 95% de la mostra, pren un valor de 245 mm. Mentre que el valor accidental pren un valor de 677 mm.

A continuació, la *Figura 15* mostra la distribució lognormal de les mesures obtingudes del costat esquerra de la configuració. En l'eix de les ordenades hi han les mesures normalitzades respecte el cent per cent, és a dir, el percentatge que ocupen respecte el total de la mostra estudiada i en l'eix de les abscisses es marca la freqüència establerta en aquest estudi, 25 mm.

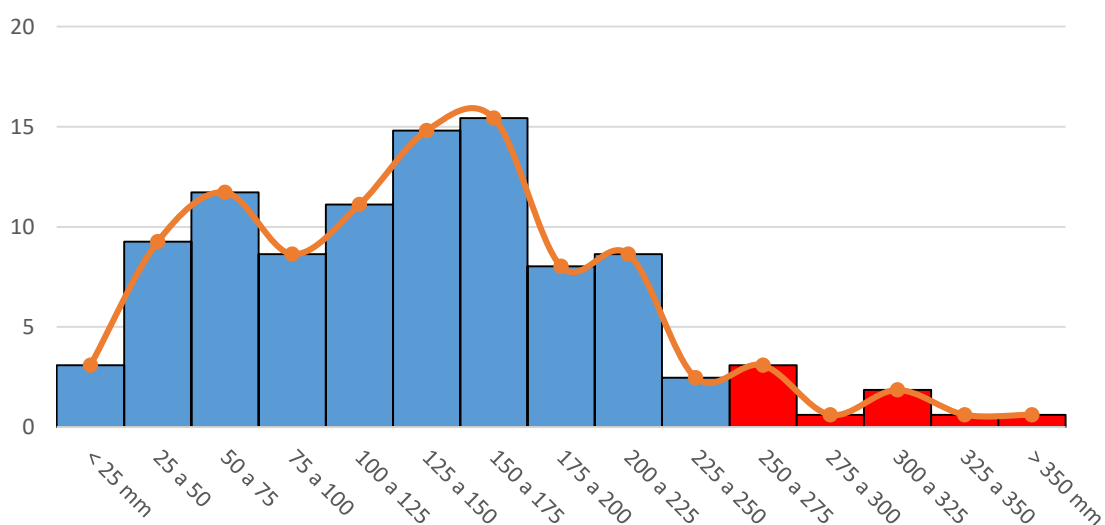


Figura 15: distribució lognormal de tots els valors de l'esquerra obtinguts

A partir d'aquest estudi, se n'extreu que el valor mitjà, que correspon al percentil del 50% de la mostra, pren un valor de 109 mm. El valor característic, que correspon al percentil del 95% de la mostra, pren un valor de 245 mm. Mentre que el valor accidental pren un valor de 366 mm.

A continuació, la *Figura 16* es mostra la distribució lognormal de les mesures obtingudes al costat dret de la configuració. En l'eix de les ordenades hi han les mesures normalitzades

respecte el cent per cent, és a dir, el percentatge que ocupen respecte el total de la mostra estudiada i en l'eix de les abscisses es marca la freqüència establerta en aquest estudi, 25 mm.

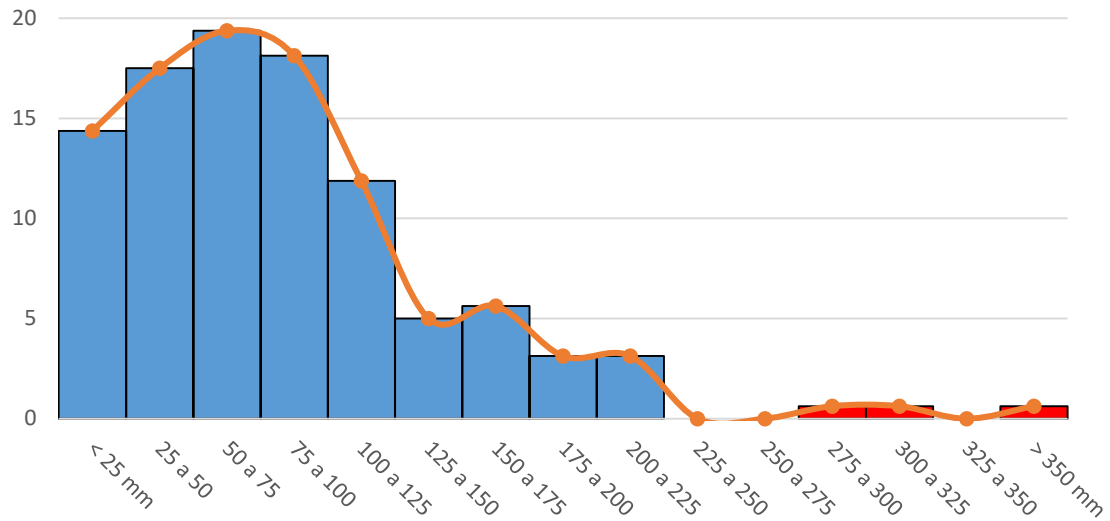


Figura 16: distribució lognormal de tots els valors de la dreta obtinguts

A partir d'aquest estudi, se n'extreu que el valor mitjà, que correspon al percentil del 50% de la mostra, pren un valor de 83 mm. El valor característic, que correspon al percentil del 95% de la mostra, pren un valor de 243 mm. Mentre que el valor accidental pren un valor de 677 mm.

Capítol 4. Anàlisi estructural

4.1. Calculadora

Amb l'ajuda de l'Excel, s'ha dissenyat una calculadora amb la qual es podrà estudiar i quantificar com incideixen les finites posicions dels suports entre les dovelles. D'aquesta manera s'ha creat una calculadora per a poder estudiar diferents hipòtesis, i veure quines són les posicions òptimes com també les posicions més indesitjables dels suports de les dovelles. Aquestes hipòtesis a estudiar es detallen en el següent capítol.

Tal i com es s'observa en les següents les *Figures 17 i 18*, es pren com a objectiu l'anàlisi estructural de tallants i moments d'aquestes dues configuracions de dovelles. La primera està encapçalada per la llosa solera i les tres dovelles restants de tipus S, mentre que la segona està encapçalada per la peça clau i les tres dovelles restants de tipus K. Al llarg de tots els càlculs es treballarà amb les distàncies referenciades mitjançant les lletres que es mostren:

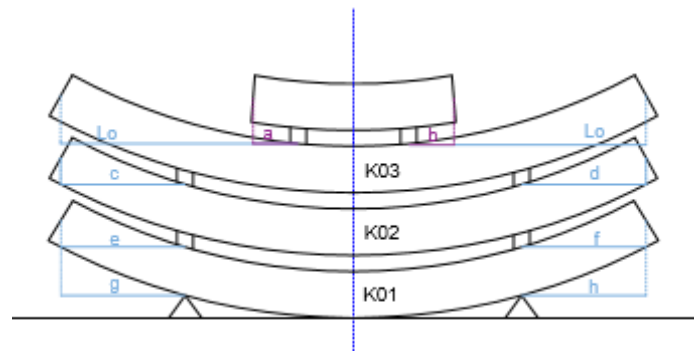


Figura 17: esquema configuració dovella K

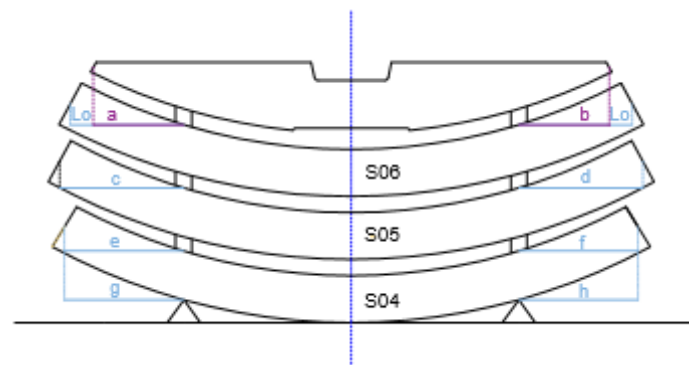


Figura 18: esquema configuració dovella S

Al llarg de tot l'estudi es treballarà amb la mateixa nomenclatura que es mostra en les figures.

4.1.1. Hipòtesis de càlcul

S'han detenir en compte totes les hipòtesis de càlculs que s'han pres. A mode de resum, es presenten a la següent taula:

Hipòtesi de càlcul 1	Les dovelles estan col·locades perfectament simètriques entre elles respecte l'eix vertical.
Hipòtesi de càlcul 2	L'únic desplaçament a considerar serà el dels suports però en cap cas el de les pròpies dovelles.
Hipòtesi de càlcul 3	Excentricitat, $e = 0,250$ m. Atorgada pel projectista.
Hipòtesi de càlcul 4	Situació òptima, col·locació de suports a $0,900$ m de l'extrem de la dovella. Atorgada pel projecte.
Hipòtesi de càlcul 5	$\gamma_c = 25$ kN/m
Hipòtesi de càlcul 6	Es considera secció longitudinalment rectilínia, uniforme i rectangular.

Taula 3: hipòtesis de càlcul

4.1.2. Variables de càlcul

La següent taula mostra les diferents variables de la calculadora realitzada.

Posicions dels suports	a	b	c	d
	e	f	g	h
Càrregues permanents (peça clau, llosa solera, dovella KOX/SOX)			q4	q3
Longituds (peça clau, llosa solera, dovella KOX/SOX)			L	S

Taula 4: variables de càlcul

D'aquesta manera els diferents gràfics de lleis de tallants i moments es podran modificar en funció de les diferents posicions dels suports de les dovelles, dels diferents pesos propis d'aquestes o bé de les diverses longituds que poden tenir.

Encara que es puguin modificar tant les càrregues permanents com les longituds, l'objectiu d'aquest anàlisi consistirà en un anàlisi de sensibilitat de les posicions dels suports de les dovelles.

4.1.3. Valors numèrics adoptats

A partir de la següent taula, es mostren els valors numèrics considerats per a l'anàlisi de lleis i moments de totes les configuracions d'estudi.

	Amplada (m)	L (m)	Q (kN/m)
Llosa solera	0,350	3,848	14.27
Peça clau	0,350	1,490	13.62
K0X/S0X	0,350	4,307	14.59

Taula 5: Valors numèrics adoptats

4.1.3. Càlcul analític

Un cop considerades les hipòtesis de càlcul pertinents, es procedeix al càlcul analític de la llei de tallants i moments tant de la llosa solera com de la peça clau. Aquesta configuració està formada pels 3 trams següents:

- Tram 1: $0 < x < a$
- Tram 2: $a < x < L - b$
- Tram 3: $L - b < x < L$

De cara als següents pisos de dovelles tipus K0X/S0X, es consideraran els mateixos criteris estructurals els quals seran aplicats exactament pels tres pisos de dovelles. A mode de resum, s'explicarà pas a pas el següent pis de dovella (K03/S06) i s'analitzaran els 4 possibles casos respecte la posició entre la força i el suport. Aquesta explicació podrà ser aplicada exactament igual per als altres dos pisos de (K02/S05 i K01/S04).

Es realitza el càlcul analític de la llei de tallants i moments de la llosa inferior (K03 o S06) de les configuracions que es mostren en les *Figures 17 i 18*. A continuació es mostren els 4 casos possible que s'han considerat els quals estan formats per 5 trams cadascun.

1) Força – Suport – Força – Suport:

Aquesta configuració està formada pels 5 trams següents compresos entre les diferents càrregues i suports:

- Tram 1: $0 < x < L_0 + a$
- Tram 2: $L_0 + a < x < c$
- Tram 3: $c < x < L_0 + L - b$
- Tram 4: $L_0 + L - b < x < s - d$
- Tram 5: $s - d < x < s$



Figura 19: esquema força – suport – força – suport

2) Suport – Força – Força – Suport:

Aquesta configuració està formada pels 5 trams següents compresos entre les diferents càrregues i suports:

- Tram 1: $0 < x < c$
- Tram 2: $c < x < L_0 + a$
- Tram 3: $L_0 + a < x < L_0 + L - b$
- Tram 4: $L_0 + L - b < x < s - d$
- Tram 5: $s - d < x < s$



Figura 20: esquema suport – força – força – suport

3) Suport – Força – Suport – Força:

Aquesta configuració està formada pels 5 trams següents compresos entre les diferents càrregues i suports:

- Tram 1: $0 < x < c$
- Tram 2: $c < x < L_0 + a$
- Tram 3: $L_0 + a < x < s - d$

- Tram 4: $s - d < x < s - (L_o + b)$
- Tram 5: $s - (L_o + b) < x < s$



Figura 21: esquema suport – força – suport – força

4) **Força – Suport – Suport – Força:**

Aquesta configuració està formada pels 5 trams següents compresos entre les diferents càrregues i suports:

- Tram 1: $0 < x < c$
- Tram 2: $c < x < L_o + a$
- Tram 3: $L_o + a < x < L_o + L - b$
- Tram 4: $L_o + L - b < x < s - d$
- Tram 5: $s - d < x < s$



Figura 22: esquema força – suport – suport – força

Tal i com s'ha mencionat, el càlcul analític de la llei de tallants i moments dels següents dos pisos de dovelles segueixen la mateixa metodologia de càlcul que s'ha pres per l'anterior dovella però referenciades amb la nomenclatura (lletres tal i com s'observa en la il·lustració) que correspon per aquest nou pis de dovella. És per això que ja no s'explicarà altra vegada.

4.1.4. Validació Midas Civil

Un cop s'ha realitzat el càlcul analític de la llei de tallants i moments, aquest es valida a través d'un software d'anàlisi d'estructures. Ja que a partir d'aquí els altres dos pisos restants de dovelles tipo K0X/S0X, seguiran exactament la mateixa metodologia d'anàlisi.

Es pren com a software el *Midas Civil* de cara a la validació estructural tant de la peça clau o llosa solera com de la dovella que està a sota (K03/S06), aquesta es valida per dos dels quatre casos possibles que hi poden haver-hi.

Les validacions es troben en l'*Annex B*.

4.2. Hipòtesis d'estudi

A continuació es realitzen diversos estudis de sensibilitat respecte les diferents posicions que poden tenir els suports de les dovelles inferiors en l'etapa d'emmagatzematge primari. S'ha considerat com a hipòtesi d'estudi que tots els suports de les dovelles superiors estan perfectament col·locats, a 0,900 m des de l'extrem de la dovella com s'esmenta en la memòria del projecte, llevat dels suports de les dos dovelles inferiors (K02, K03, S05, S06) a partir de les quals s'analitzarà la seva incidència en la posició respecte la posició ja que aquestes generaran unes sol·licitacions de càrrega a les dovelles inferiors (K01 o bé S04).

De cara a la realització d'aquestes hipòtesis es tindrà en compte que es suposa que la posició ideal dels suports de les dovelles es troba a 0,900 m respecte l'extrem de la dovella, i hi ha un interval de tolerància establert de 0,250 m; Tal i com s'ha recopilat en la *Taula 3*. Com a conseqüència, tots els gràfics que es mostren en aquets capítol estaran compresos l'interval d'excentricitat establerta pel projectista.

Tant els valors de tallants com de moment que es donaran en els casos d'estudi serà considerant el pes de la llos solera (càrrega màxima) i no el de la peça clau. A continuació en les *Figures 23* i *24* es mostra la nomenclatura que es seguirà de cara a les següents hipòtesis.

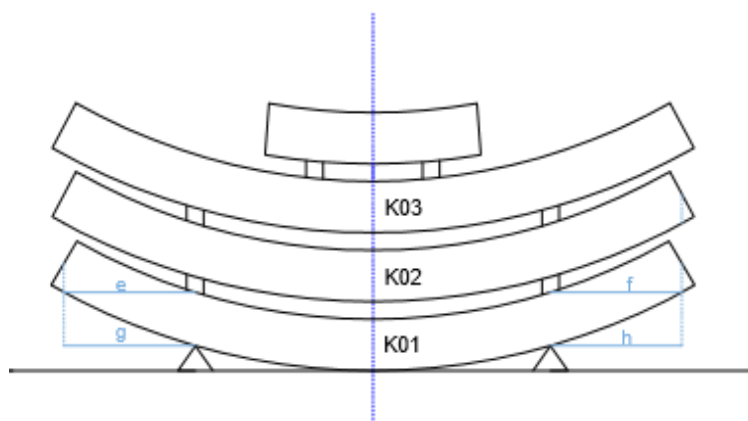


Figura 23: esquema configuració dovella K

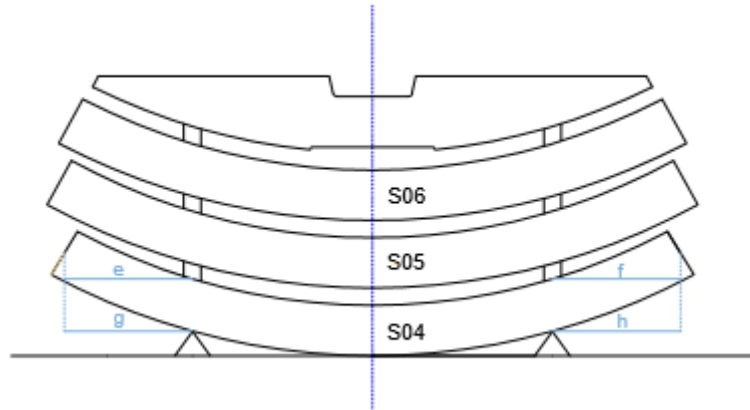


Figura 24: esquema configuració dovella S

4.2.1. Hipòtesi 1

En aquesta hipòtesi es procedeix a analitzar els esforços que reben les dovelles inferiors (K01, S04) en l'etapa d'emmagatzematge primari quan les reaccions de la dovella que es troba situada a baix de tot l'emmagatzematge (K01 o bé S04) estan alineades amb les forces que li exerceixen a la dovella que es troba just al seu damunt (K02 o bé S05), és a dir, quan els suports estan alineats entre ells tal i com s'observa en la *Figura 25*. En aquesta figura, els suports que estan puntejats són els que marquen el límit de l'interval tolerable.

Degut a la simetria de l'estructura es consideraran tan sols els moviments dels suports de l'esquerra de la dovella, mentre que els de la dreta estaran a la posició de 0,900 m per tal de garantir l'anàlisi de sensibilitat esmentat.



Figura 25: possible moviment de R_g i F_e en la hipòtesi 1

4.2.1.1. Estudi dels tallants

A partir de la *Figura 26* se n'extreu que:

$(X_{Fe} = X_{Rg}) < 0,900$ m: la reacció en G disminueix mentre que la reacció en H augmenta degut a que es redueix la longitud del voladís a l'augmentar la longitud entre els suports.

$(X_{Fe} = X_{Rg}) = 0,900 \text{ m}$: situació òptima ja que és on es minimitza la reacció ja que la Fe és absorbida pel suport G.

$(X_{Fe} = X_{Rg}) > 0,900 \text{ m}$: la reacció en G augmenta mentre que la reacció en H disminueix degut a que s'augmenta la longitud del voladís al disminuir la longitud entre els suports.

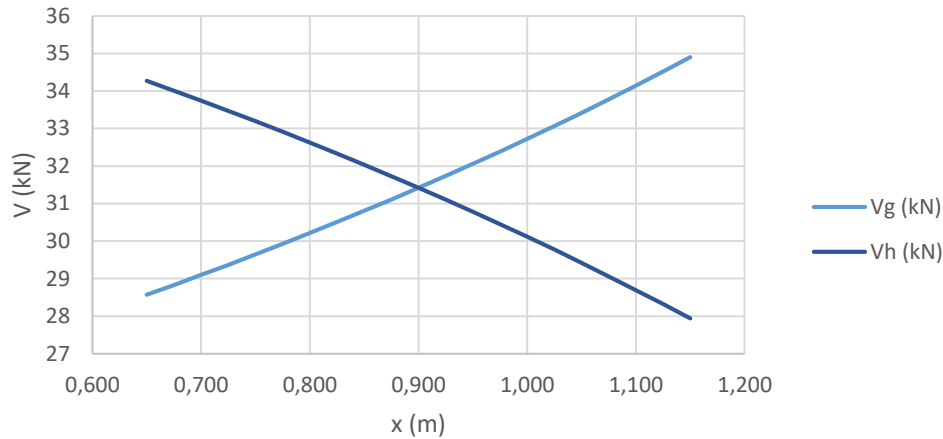


Figura 26: tallants en les suports en funció de la posició de Fe i Rg

Respecte la Figura 26 les línies que es mostren no són perfectament lineals, quan el suport es troba al límit inferior, 0,650 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns tallants que prenen uns valors de $V_g = 28,57 \text{ kN}$ i $V_h = 34,27 \text{ kN}$. Quan el suport es troba al límit superior, 1150 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns tallants que prenen uns valors de $V_g = 34,90 \text{ kN}$ i $V_h = 27,94 \text{ kN}$.

4.2.1.2. Estudi dels moments

A partir de la Figura 27 se n'extreu que:

$(X_{Fe} = X_{Rg}) < 0,900 \text{ m}$: el moment màxim en G disminueix mentre que el moment màxim que es produeix entre els suports augmenta degut a que es redueix la longitud del voladís al augmentar la longitud entre els suports.

$(X_{Fe} = X_{Rg}) = 0,900 \text{ m}$: situació òptima ja que és on el nivell de càrrega global és més baix.

$(X_{Fe} = X_{Rg}) > 0,900 \text{ m}$: el moment màxim en G augmenta mentre que el moment màxim que es produeix entre els suports disminueix degut a que s'augmenta la longitud del voladís al disminuir la longitud entre els suports

A partir de la Figura 27, s'observa que el moment en H no es veu alterat pel que succeeix al seu extrem oposat, G.

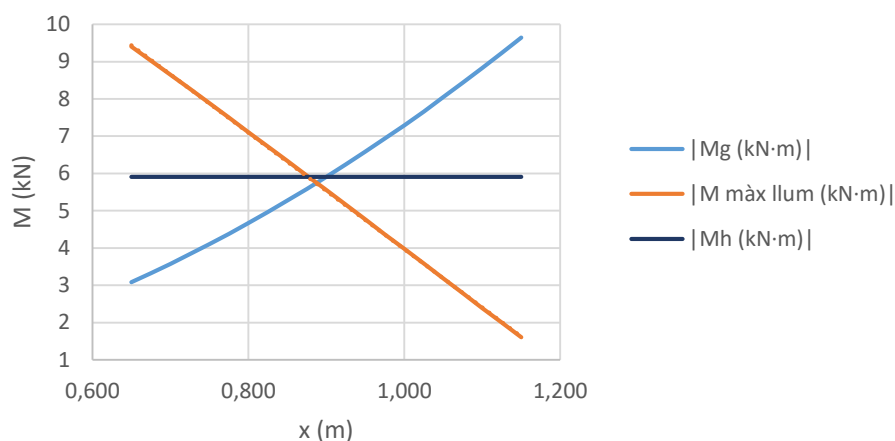


Figura 27: moments amb valor absolut en la posició del suport esquerra

Es comprova que la posició òptima dels suports és a 0,900 m tal i com s'enunciava a la memòria del projecte d'estudi ja que en aquell punt és on els moments màxims és minimitzen més i també els tallants que s'hi generen són més petits. En cas que no estigués a 0.90 m seria millor que $(X_{Fe} = X_{Rg}) > 0,900$ m degut a que no es generarien uns moments tant grans com en $(X_{Fe} = X_{Rg}) < 0,900$ m.

Quan el suport es troba al límit superior, 1150 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns moments que prenen uns valors de $M_g = - 9,648$ kN·m i $M_{màx llum} = 1,606$ kN·m, mentre que el suport es troba al límit inferior, 0,650 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns moments que prenen uns valors de $M_g = - 3,082$ kN·m i $M_{màx llum} = 9,403$ kN·m.

4.2.2. Hipòtesi 2

En aquesta hipòtesi es procedeix a analitzar els esforços que reben les dovelles inferiors (K01, S04) en l'etapa d'emmagatzematge primari quan el suport de la dovella que es troba situada a baix de tot l'emmagatzematge (K01 o bé S04) estan fixats a 0,900 m de l'extrem de la dovella mentre que els suports de la dovella que es troba just al seu damunt (K02 o bé S05) varien de posició. Tal i com s'observa en la *Figura 26*, les forces que estan puntejades són les que marquen el límit de l'interval tolerable i podran ser desplaçades dins d'aquest interval, al llarg de l'estudi de la hipòtesi 2.

Degut a la simetria de l'estructura es consideraran tan sols el moviment del suport de l'esquerra de la dovella (K02), mentre que la resta de suports estan a la posició de 0,900 m per tal de garantir l'anàlisi de sensibilitat esmentat.

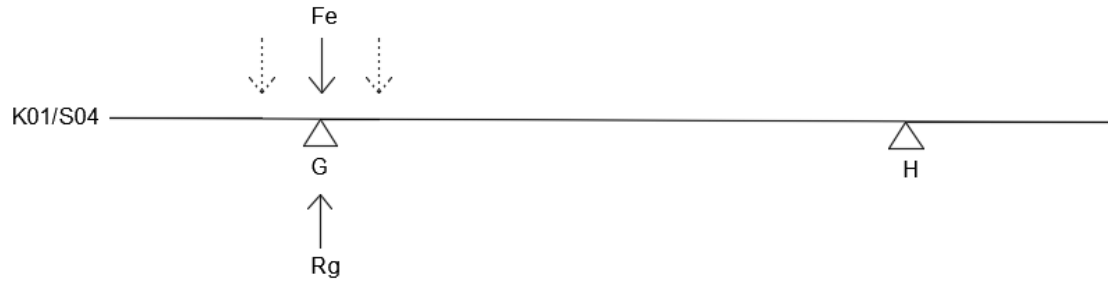


Figura 28: esquema dels diversos casos d'estudi de la hipòtesi 2

4.2.2.1. Estudi dels tallants

A partir de la *Figura 29* se n'extreu que:

$X_{Fe} < 0,900$ m: tant el tallant que genera la F_e com el de R_h disminueixen mentre que es redueix la longitud del voladís i s'augmenta la longitud entre els suports. El tallant de R_g es manté constant.

$X_{Fe} = 0,900$ m: en aquesta situació el tallant R_g es absorbit pel suport G. És una situació idíl·lica ja que tan sols es dura a témer en cas que hi hagi una càrrega puntual, però com en la realitat els suports no són una càrrega puntual sinó que tenen una superfície com a base, mai es generarà aquesta situació.

$X_{Fe} > 0,900$ m: tant el tallant que genera la F_e com el de R_h augmenten mentre que s'augmenta la longitud del voladís i es disminueix la longitud entre els suports. El tallant de R_g es manté constant.

A partir de la *Figura 29*, s'observa que la tallant que genera G no es veu alterada pel que succeeix, exceptuant la situació $X_{Fe} = 0,900$ m en la qual el suport G absorbeix F_e .

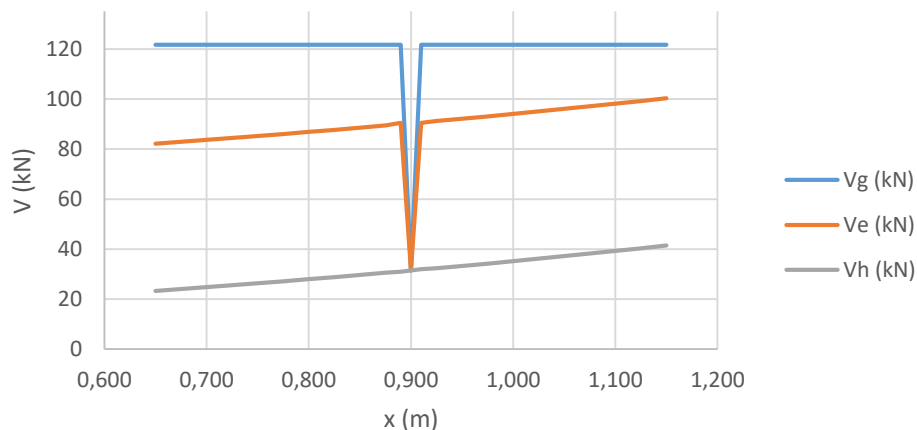


Figura 29: tallants en les suports en funció de la posició de F_e

Respecte la *Figura 29* quan el suport es troba al límit inferior, 0,650 m des de l'extrem de la dovella, hi han uns tallants que prenen uns valors de $V_e = 82,10$ kN i $V_h = 23,23$ kN mentre que el suport es troba al límit superior, 1150 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns tallants que prenen uns valors de $V_g = 121,71$ kN i $V_h = 41,42$ kN.

4.2.2.2. Estudi dels moments

A partir de la *Figura 30* se n'extreu que:

$X_{Fe} < 0,900$ m: el moment màxim en G disminueix molt ràpid mentre que el moment màxim causat per la força F_e augmenta lentament. El moment màxim a la llum disminueix degut a que es redueix la longitud del voladís i s'augmenta la longitud entre els suports.

$X_{Fe} = 0,900$ m: situació òptima ja que és on el nivell de càrrega global és més baix.

$X_{Fe} > 0,900$ m: el moment màxim en G és manté constant mentre el moment màxim causat per la força F_e augmenta ràpidament. El moment màxim a la llum augmenta degut a que es redueix la longitud del voladís i s'augmenta la longitud entre els suports.

S'observa que el moment en H no es veu alterat pel que succeeix al seu extrem oposat, G.

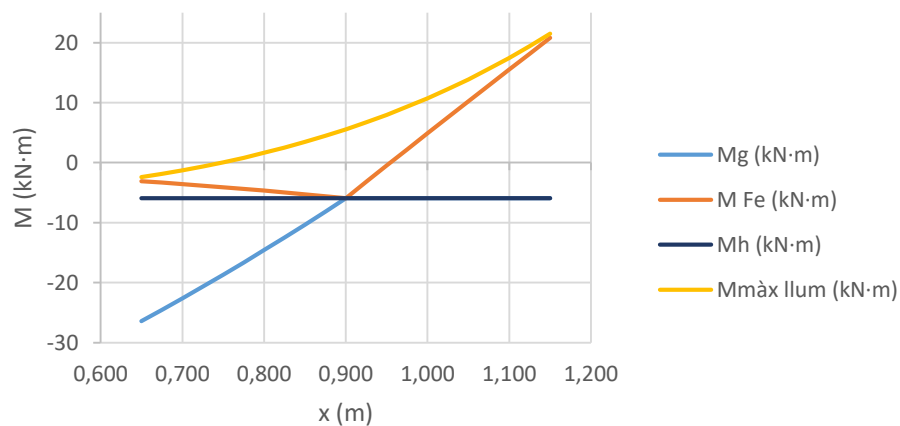


Figura 30: moments en els suports, Fe i llum en funció de la posició de Fe

Es comprova que la posició òptima dels suports és a 0,900 m tal i com s'enunciava a la memòria del projecte d'estudi ja que en aquell punt és on els moments màxims és minimitzen més i també els tallants que s'hi generen són els més petites. En cas que F_e no estigués a 0.90 m seria millor que $X_{Fe} < 0.90$ m ja que no es generarien uns moments tant grans com en $X_{Fe} > 0.90$ m la qual és la situació pèssima. Considerant que el suport G és troba fixat a 0.90 m.

Quan el suport es troba al límit inferior, 0,650 m des de l'extrem de la dovella, hi han uns moments que prenen uns valors de $M_g = -26,434 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{\text{màx llum}} = -2,412 \text{ kN}\cdot\text{m}$ i $M_{Fe} = -3,082 \text{ kN}\cdot\text{m}$, mentre que el suport es troba al límit superior, 1150 mm des de l'extrem de la dovella, hi han uns moments que prenen uns valors de $M_g = -5,909 \text{ kN}$, $M_{\text{màx llum}} = 21,514 \text{ kN}$ i $M_{Fe} = 20,780 \text{ kN}$.

4.2.3. Cas ideal

En aquest cas s'observen els esforços mínims que poden arribar a rebre les dovelles inferiors (K01, S04) en l'etapa d'emmagatzematge primari si tots els suports estan perfectament alineats i a una distància de 0,900 m respecte l'extrem de la dovella, tal i com s'ha demostrat tant en la hipòtesi 1 i 2.



Figura 31: esquema cas ideal

4.2.3.1. Estudi dels tallants

Tant el tallant del suport G com el tallant del suport H tenen un valor de 90,289 kN. Degut a la simetria tant de càrregues com suports.

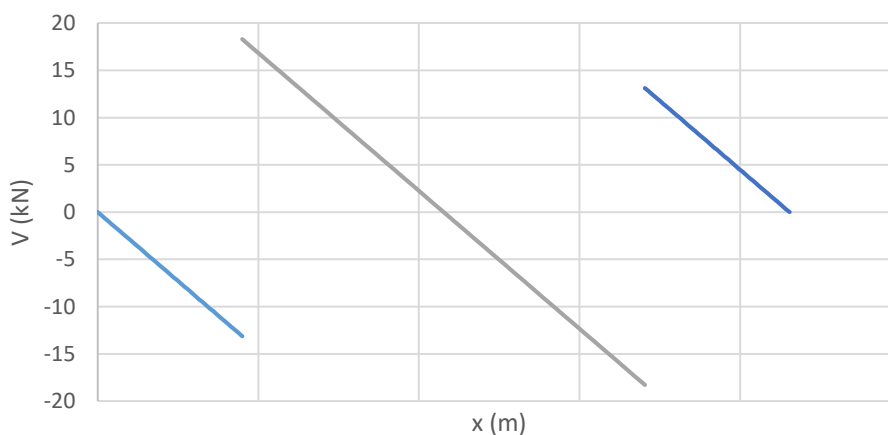


Figura 32: tallants cas ideal

Donada aquesta òptima situació hi ha un 50% de la càrrega que recau en el suport G i l'altre 50% en el suport H. Numèricament, sobre G hi ha aplicada una força $F_e = 90,289 \text{ kN}$ i aquesta generarà

una reacció de valor $R_g = 121,709$ kN. En el suport H succeeix exactament el mateix degut a la simetria de l'estructura ja esmentada.

4.2.3.2. Estudi dels moments

El moment màxim es troba entre els suports i pren un valor de $5,553$ kN·m i el valor mínim té un valor de $-5,909$ kN·m el qual es troba tant en el suport G com en el H.

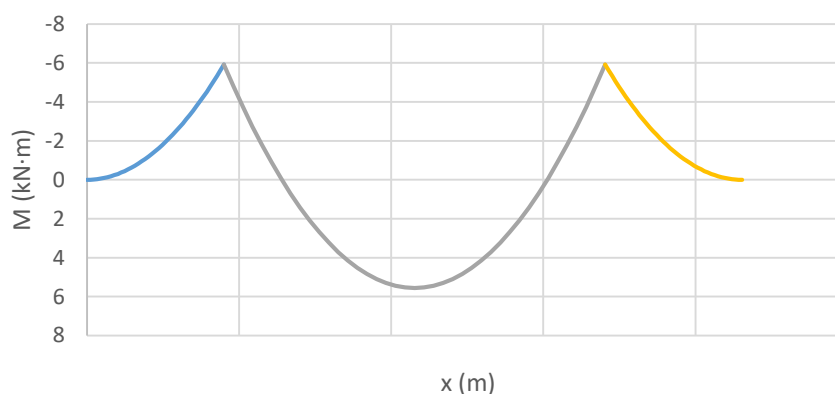


Figura 33: moments cas ideal

En aquest cas òptim els moments que es generen es minimitzen al màxim en tota la dovella.

4.2.4. Taula de resum sobre hipòtesis estudiades

Es presenta en la *Taula 6*, una taula resum sobre les hipòtesis i casos estudiats en els apartats anteriors.

A partir de la *Taula 6*, es pot quantificar la magnitud dels pics dels moments i saber quan de favorables o desfavorables poden arribar a ser. A través de les tonalitats de color es mostra la situació òptima fins arribar a la pèssima considerant que la dovella es pot veure afectada pels moments màxims abans que per les reaccions que es generen.

S'han d'evitar primordialment (hipòtesi 2: $X_{Fe} < 0,900$ m i $X_{Fe} > 0,900$ m), seguidament de la hipòtesi 1: ($X_{Fe} = X_{Rg}$) $> 0,900$ m, després la hipòtesi 1: ($X_{Fe} = X_{Rg}$) $< 0,900$ m i com ja s'ha esmentat la òptima situació és ($X_{Fe} = X_{Rg}$) = 0,900 m.

Hipòtesis d'estudi		R _g (kN)	R _h (kN)	M _g (kN·m)	M _{màx llum o} M _{Fe} (kN·m)	M _h (kN·m)	M _{màx} (kN·m)
Hipòtesi 1	(X _{Fe} = X _{Rg}) < 0,90 m*	28,57	34,27	-3,08	9,40	-5,91	9,40
	(X _{Fe} = X _{Rg}) = 0,90 m	31,42	31,42	-5,91	5,55	-5,91	-5,91
	(X _{Fe} = X _{Rg}) > 0,90 m*	34,90	27,94	-9,648	1,61	-5,91	-9,648
Hipòtesi 2	X _{Fe} < 0,90 m*	121,71	23,23	-26,43	-3,08	-5,91	-26,43
	X _{Fe} = 0,90 m	31,42	31,42	-5,91	-5,91	-5,91	5,91
	X _{Fe} > 0,90 m*	121,71	100,29	-5,91	20,78	-5,91	20,78
Cas ideal	(X _{Fe} = X _{Rg}) = 0,90 m	31,42	31,42	5,55	-5,91	-5,91	-5,91

Taula 6: taula resum sobre les hipòtesis estudiades

(*): per aquestes hipòtesis d'estudi es prenen els valors límits d'excentricitat (± 250 mm).

4.3. Aplicació hipòtesi 2 amb casos reals

Després d'haver estudiat les hipòtesis 1 i 2 s'observa que la pitjor hipòtesi és la 2, ja que és quan es realitza el moment màxim més gran. Dins de la hipòtesi 2 tenim que el cas que es voldrà evitar és X_{Fe} > 0,900 m, seguidament de X_{Fe} < 0,900 m.

Amb l'ajuda de l'AutoCAD, s'han extret les diferents distàncies respecte la col·locació dels suports amb l'extrem de la dovella. Per tant, de cada dovella se n'extreuen 4 mesures, *e*, *f*, *g* i *h*.

A partir d'aquestes mesures que s'han obtingut, s'ha agafat el pitjor cas X_{Fe} > 0,900 m i el pitjor cas X_{Fe} < 0,900 m a partir dels quals s'analitzaran les lleis de tallants i moments que es generen amb l'ajut de la calculadora que s'ha desenvolupat.

Tot seguit s'analitzen aquets casos, considerant que tots els suports estan a 0,900 m des de l'extrem de la dovella excepte el suport E i G per tal de garantir el mateix anàlisi de sensibilitat que s'ha estudiat fins ara.

4.3.1. Cas $X_{Fe} > 0,900$ m

Aquest cas representa la màxima distància entre la força F_e i el suport G per al cas $X_{Fe} > 0,900$ m. El cas d'estudi s'ha extret de la *Taula 1* amb totes les mesures que s'han pres amb l'AutoCAD a partir de les fotografies de les dovelles en l'etapa d'emmagatzematge primari. La dovella s'identifica com 5905 06 01 16S.



Figura 34: esquema cas real $X_{Fe} > 0.90$ m

Com es mostra en la *Figura 34* la separació màxima entre el suport i la força és de $298,2$ mm per al cas $X_F > 0,900$ m. Per tal de seguir amb les mateixes condicions inicials de la hipòtesi 2 es considera que la resta de suports es troben a $0,900$ m respecte l'extrem de la dovella.

4.3.1.1. Estudi dels tallants

Com s'il·lustra en la *Figura 35* el tallant màxim pren un valor de $109,741$ kN en el suport G , mentre que el tallant mínim pren un valor de $37,844$ kN en el suport H .

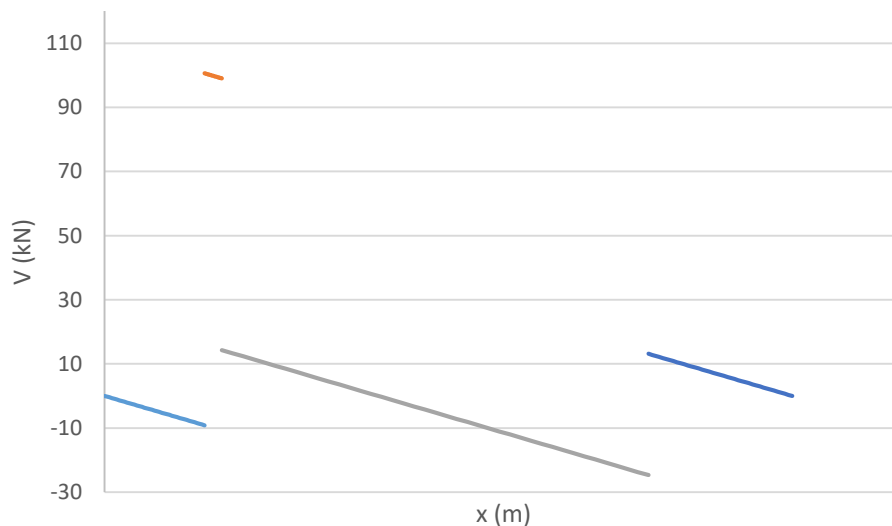


Figura 35: tallants cas real $X_{Fe} > 0,900$ m

4.3.1.2. Estudi dels moments

El moment màxim pren un valor de +15,016 kN·m, mentre que el moment mínim -5.909 kN·m.

S'observa que al llarg dels voladissos la part inferior estarà sotmesa a compressió mentre que la part superior a tracció. Mentre que al llarg de la llum la part inferior estarà sotmesa a tracció mentre que la part superior a compressió.

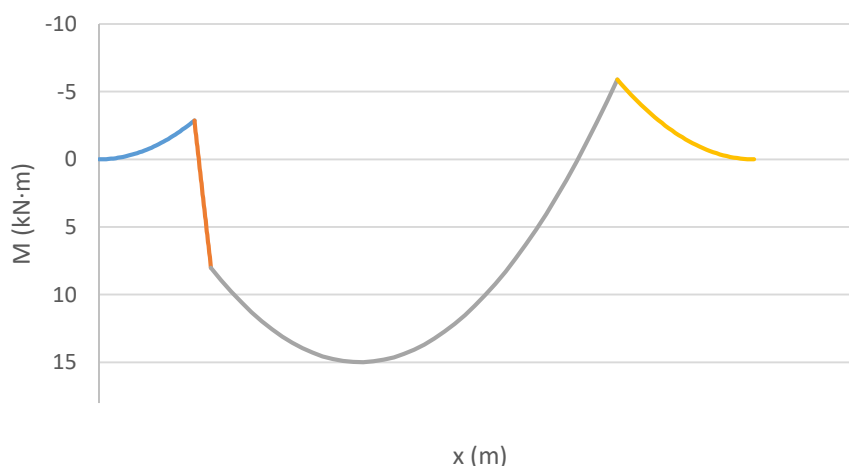


Figura 36: moments generats cas real $X_{Fe} > 0.90 m$

A partir de la Taula 13 es pot fer una clara comparativa respecte el cas pitjor que s'ha trobat amb les hipòtesis ja esmentades respecte el cas ideal. S'ha de tenir en compte que s'ha considerat que tots els suports de la dovella excepte el E i G estaven a 0,900 m. Degut això els moments màxims no presenten una gran diferència respecte el cas òptim. Però si s'haguessin posat totes les mesures reals dels suports sí que s'hagués observat un salt considerable. L'estudi de tota la configuració de les dovelles amb totes les posicions reals dels suports es farà al punt 4.4.

Donat aquest cas hi ha un 69% de la càrrega que recau al suport G, i el restant al suport H.

	V_e (kN)	V_f (kN)	V_g (kN)	V_h (kN)	$M_{m\grave{a}x}$ (kN·m)	$M_{m\grave{i}n}$ (kN·m)	$V_{m\grave{a}x}$ (kN)	$V_{m\grave{i}n}$ (kN)
Cas ideal	90,29	90,29	121,71	121,71	5,55	-5,91	31,42	31,42
Cas d'estudi	84,74	37,84	109,74	37,84	15,00	-5,91	109,74	37,84

Taula 7: comparació dels resultats amb el cas ideal

4.3.2.2. Estudi dels moments

El moment màxim pren un valor de +0 kN·m, mentre que el moment mínim -38,294 kN·m.

S'aprecia que al llarg de tota la dovella la part inferior estarà sotmesa a compressió mentre que la part superior a tracció.

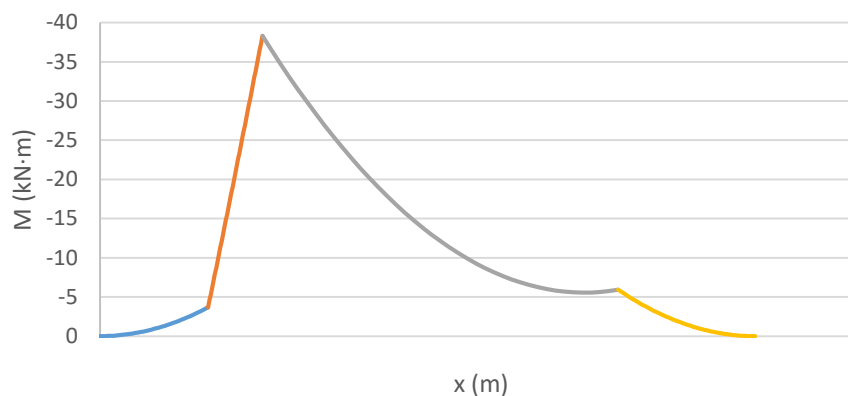


Figura 39: moments generats cas real $X_{Fe} < 0,900$ m

A partir d'aquesta taula es pot fer una clara comparativa respecte el cas pitjor que s'ha trobat amb les hipòtesis ja esmentades respecte el cas ideal.

	V_e (kN)	V_f (kN)	V_g (kN)	V_h (kN)	$M_{m\grave{a}x}$ (kN·m)	$M_{m\grave{i}n}$ (kN·m)	$V_{m\grave{a}x}$ (kN)	$V_{m\grave{i}n}$ (kN)
Cas ideal	90,29	90,29	121,71	121,71	5,55	-5,91	31,42	31,42
Cas d'estudi	83,96	16,34	130,45	16,34	+ 0	-38,29	130,45	16,34

Taula 8: comparació dels resultats amb el cas ideal

Donat aquest cas hi ha un 84% de la càrrega que recau al suport G, i el restant al suport H. Cal destacar el pic del moment mínim, -38,29 kN·m, que es genera en aquesta situació el qual pot generar esquerdes a la llarga.

S'observa que des d'un inici s'ha afirmat que el pitjor cas és el de la hipòtesi 2 real $X_{Fe} > 0,900$ m, i així és. Però en aquesta situació, el suport G respecte la força F_e estan separats a 298,2 mm. Mentre que en el segon pitjor cas de la hipòtesi 2 real $X_{Fe} < 0,900$ m estan separades a 357 mm. Al estar separades a una longitud major aquest passa a ser el pitjor cas que s'ha recopilat a partir de les dovelles fotografiades.

	V_e (kN)	V_f (kN)	V_g (kN)	V_h (kN)	$M_{m\grave{a}x}$ (kN·m)	$M_{m\grave{i}n}$ (kN·m)	$V_{m\grave{a}x}$ (kN)	$V_{m\grave{i}n}$ (kN)	Dist. V_e-V_g (mm)
Cas $X_{Fe} > 0,900$ m	84,74	37,84	109,74	37,84	15,00	-5,91	109,74	37,84	84,74
Cas $X_{Fe} < 0,900$ m	83,96	16,34	130,45	16,34	+ 0	-38,29	130,45	16,34	83,96

Taula 9: comparativa i elecci3 del pitjor cas

4.4. Pitjor cas real recopilat

Tal i com s'ha demostrat en l'apartat 4.3.2, seguint les hip3tesis ja estudiades, el pitjor cas que s'ha trobat en m3s de 100 grups de dovelles fotografiades a un projecte del Medi Orient ha sigut el que es mostra en la Figura 40:



Figura 40: apilament dovelles "6161 14 01 16 S"

4.4.1. Comparativa respecte cas normativa

Es prenen les dist3ncies a les que estan situats els suports respecte l'extrem de la dovella. Es considerar3 com a dist3ncia la que tenen els suports respecte la dovella de sota, per tal de simplificar el problema.

Les Taules 10, 11, 12 i 13 que es mostren a continuaci3 3s un exemple visual de la difer3ncia entre les lleis de tallants i moments del cas 3ptim respecte el pitjor cas real.

LLOSA SOLERA		PITJOR CAS REAL	CAS ÒPTIM
		V (x)	
M (x)			

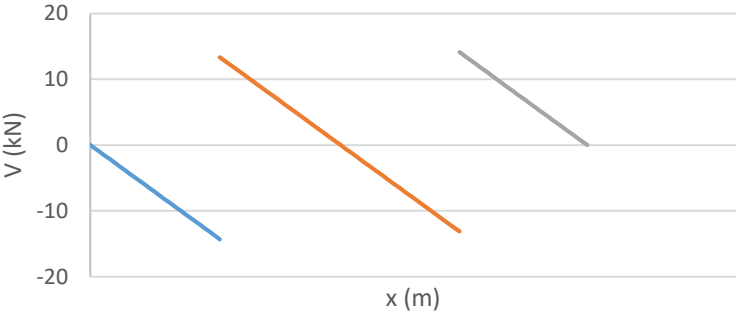
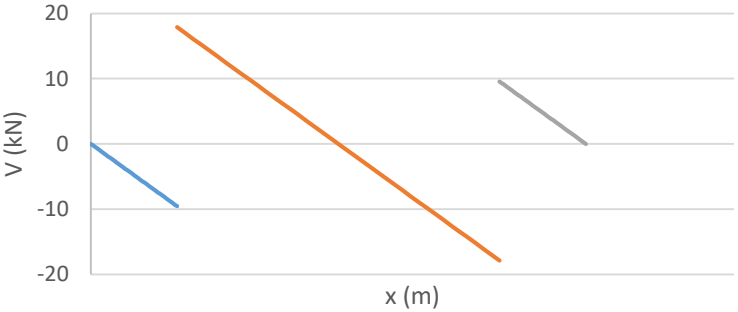
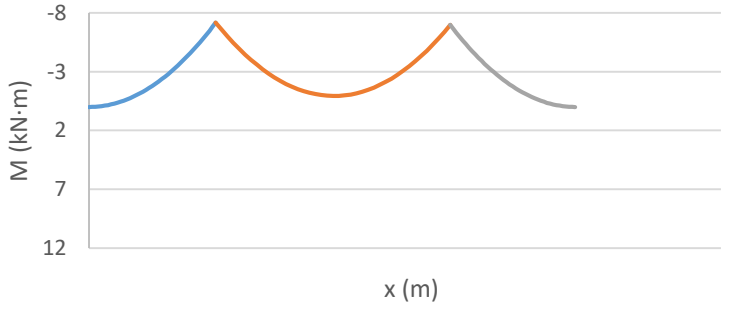
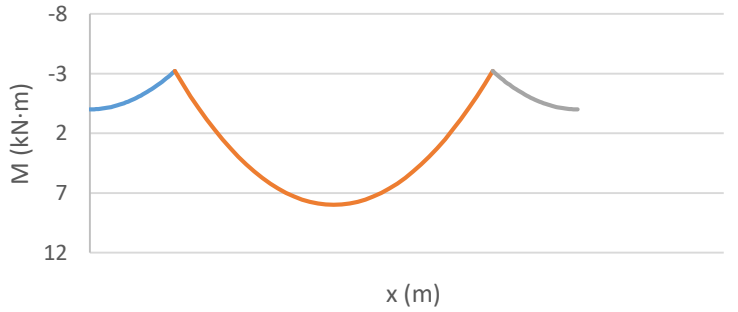
Taula 10: llei de tallants i moments de la llosa solera

S06		PITJOR CAS REAL	CAS ÒPTIM
	V (x)		
	M (x)		

Taula 11: Ilei de tallants i moments de la K06

S05		PITJOR CAS REAL	CAS ÒPTIM
	V (x)		
	M (x)		

Taula 12: llei de tallants i moments de la S05

S04		PITJOR CAS REAL	CAS ÒPTIM
	V (x)		
	M (x)		

Taula 13: llei de tallants i moments de la S04

Les variables que s'han pres per l'elaboració de les Taules 10, 11, 12 i 13 són les següents:

	Pitjor cas real	Cas òptim
a	1,003 m	0,671 m
b	0,989 m	0,671 m
c	0,923 m	0,900 m
d	0,881 m	0,900 m
e	0,711 m	0,900 m
f	0,967 m	0,900 m
g	1,068 m	0,900 m
h	0,965 m	0,900 m

Taula 14: valors de les variables

Es pot observar que la dovella S04, formada pels suports G i H, i rep les forces F_e i F_f , la part esquerra presenta el pitjor cas real degut a que els valors e i g són molt dispars entre ells. Mentre que la part de la dreta s'atansa força a la situació favorable, observar els valors f i h .

4.4.2. Anàlisi de fissuració

S'ha analitzat el pitjor cas real a nivell estructural i per tal de concloure aquest estudi es procedeix a realitzar l'anàlisi de fissuració per veure a partir de quina resistència a tracció les dovelles de formigó assoleixen un factor de seguretat superior o igual a 1.

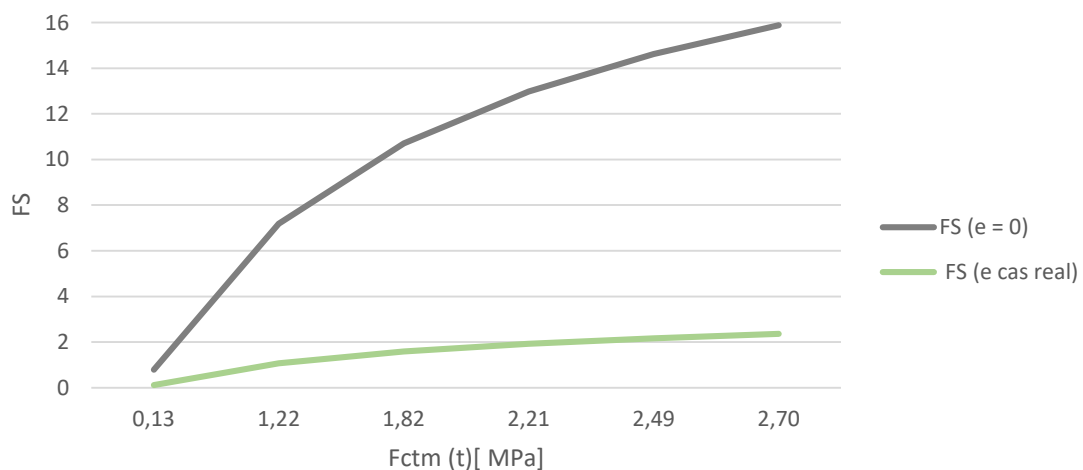


Figura 41: fissuració pitjor cas real

Tal i com mostra la Figura 42, s'ha agafat l'excentricitat amb valor de 357 mm i un moment actuant de 37,46 kN·m, com ja s'ha comentat anteriorment. Es realitza la comparativa entre el cas òptim, quan l'excentricitat és nul·la, respecte el pitjor cas real obtingut.

Per aquest cas, quan $FS \geq 1$: $F_{ctm}(t=0,12) = 0,98$ MPa. Per tant, s'està al costat de la seguretat des d'una edat molt prematura del formigó prefabricat. El que significa és que el temps que el formigó està a fàbrica es pot escurçar ja que amb menys hores ja assoleix la resistència mínima, com a conseqüència s'escurçarien les hores de fabricació del formigó o el que ve a ser el mateix amb un temps semblant se'n podria produir més.

Capítol 5. Fissuració

A partir de l'anàlisi estadística que s'ha realitzat en capítols anteriors, s'estudiarà la fissuració pels diferents valors d'excentricitat que s'han trobat considerant la pitjor situació que s'hi pot esdevenir. Es mostra en la *Taula 15* les diferents excentricitats d'estudi.

En tot moment, les excentricitats (suports dreta i esquerra) es consideraran per a la pitjor casuística la qual dóna un moment major. Mitjançant la calculadora, s'assumeix que el pitjor escenari es dóna quan ambdues excentricitats de les dovelles inferiors tendeixen cap a l'esquerra de la dovella. La resta de les dovelles (les que estan per damunt) estan col·locades a la posició òptima.

	e (mm)	M _{actuant} (kN·m)
e projecte	250	32,220
e caracterísitca	245	31,685
e mitja	109	17,268
e normativa	100	16,324
e nul·la	0	5,909

Taula 15: valors adoptats en l'estudi de fissuració

Per aquets valors, s'obté la *Figura 43* a partir de la qual s'observa que la corba que representa l'excentricitat característica està solapada per la corba que marca els límits d'excentricitat el projectista del projecte del Medi Orient.

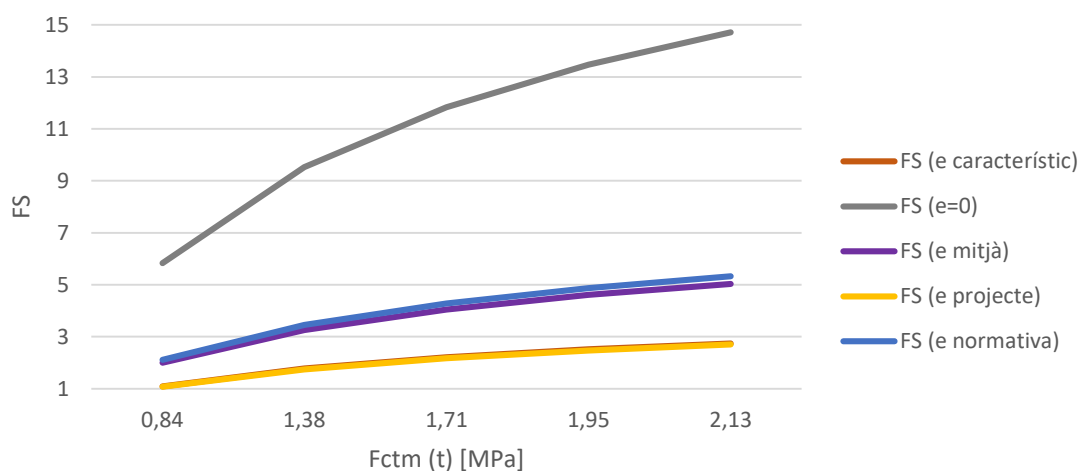


Figura 42: variació de la resistència a tracció del formigó

Referent a la corba d'excentricitat mitja, està molt pròxima a la corba de la normativa degut a que encara que l'interval fos de 250 mm, el 50% de la mostra pren un valor de 109 mm. Per tant, la col·locació dels suports s'atansa molt al que marca la normativa.

D'acord a la corba d'excentricitat nul·la, s'observa que quan no hi ha cap tipus d'excentricitat va completament a favor de la seguretat. Referent a la corba mitja es troba el factor de seguretat per damunt de 1 des de les edats prematures del formigó, $FS(t=0,1) = 2,00$. Mentre que la corba característica per a $FS(t=0,1) = 1,09$.

Això, el que indica és que el formigó sempre pren uns valors de resistència de disseny a tracció superiors als mínims exigits per tal d'estar de cara a la seguretat. Ja que ni que es trobi en la pitjor casuística (valors característics) està per damunt del factor de seguretat establert.

Es comprova que la generació de fissures no es deguda exclusivament a la col·locació dels suports. Però sí que pot ser, per la suma de diversos factors que provoqui la fissuració. En aquesta etapa, l'armat jugar un paper molt important ja que les dovelles estan sotmeses a esforços a tracció. És a dir, les armadures tenen un cost que tan sols és amortitzat en un període breu de temps però molt decisiu a la vegada ja que és en aquesta etapa en la qual poden generar-se fissures.

Capítol 6. Conclusions

6.1. Conclusió principal

L'estudi de dispersions presenta una distribució estadística que esta governada dins els marges de tolerància establerts respecte la col·locació dels recolzaments. No s'ha observat un col·locació defectuosa.

La normativa ACI recomana l'ús d'una excentricitat genèrica de 0,100 m. En el projecte constructiu estudiat, el projectista adopta una excentricitat de 0,250 m. S'ha analitzat si l'aparició de fissures en les dovelles durant la construcció del projecte pot estar relacionada amb l'augment de l'excentricitat esmentat.

Es conclou que l'aparició de fissures no es deu exclusivament a l'influència de la col·locació dels suports, ja que ni en la pitjor casuística estudiada n'apareixen. Pot ser la suma de diversos factors provoqui la fissuració de les dovelles, podria afectar la temperatura, la humitat durant l'etapa de curat en condicions ambientals o altres defectes durant les etapes de fabricació de les dovelles prefabricades de formigó armat. Les fissures no poden ser degudes només a l'excentricitat dels suports de les dovelles en l'etapa d'emmagatzematge primari.

Sembla ser demostrat que hi hagi un requeriment molt generós condiciona en la dispersió dels resultats. Per reduir aquesta dispersió s'han de prendre mesures de tipus logístic que assegurin un posicionament òptim.

6.2. Conclusions secundaries

- S'ha constatat que l'etapa d'emmagatzematge primari és una de les més crítiques a la que estan sotmeses les dovelles de formigó prefabricat en termes de vida útil. Històricament s'ha considerat que la situació més exigent correspon al moment en que la TBM es suportada per la cara lateral del anell de les dovelles durant el procés d'excavació. No obstant en aquest cas el formigó ja ha assolit la seva resistència de disseny.
- S'ha observat que la col·locació del suport dret i esquerre actuen com a successos no dependents entre ells i es distribueixen en forma de Log-Normal.

- El valor mitjà de l'excentricitat és 109 mm i el valor característic és 245 mm, per tant, quasi tots els valors estan dins l'excentricitat màxima establerta en el projecte constructiu.
- Les dovelles tipus K comprenen uns valors d'excentricitat més petits que els de les dovelles tipus S. Així com també, la tendència del posicionament dels suports de les dovelles tipus K és cap a la dreta mentre que les de tipus S és cap a l'esquerra. E
- Emprant la calculadora s'han estudiat diverses hipòtesis per tal de conèixer les casuístiques més i menys favorables estructuralment respecte la posició dels suports. S'ha observat que malgrat que sigui el pitjor cas no generarà fissures almenys degut exclusivament a la influència de la col·locació dels suports.
- Es comprova que el formigó prefabricat des del primer moment ja està de cara la seguretat. Aleshores, les fissures generades no poden ser degudes només a l'excentricitat dels suports de les dovelles en l'etapa d'emmagatzematge primari. Sí que pot contribuir aquest factor a una sèrie de factors els quals poden desencadenar a la generació de fissures però en cap cas no serà degut únicament a la incidència de la posició dels suports.
- Es precis definir mesures de tipus logístic per tal d'assegurar una mínima excentricitat accidental, mitjançant la disposició de marques o calats a l'extradós i llistons de suports compatibles amb aquestes marques o calats.

Capítol 7. Futures línies d'investigació

Aquesta tesi avalua la influència de la col·locació dels suports de les dovelles durant l'etapa d'emmagatzematge primari respecte l'aparició de fissures. S'ha comprovat que les fissures generades en les dovelles d'estudi no són degudes exclusivament a l'excentricitat adoptada.

L'etapa d'emmagatzematge primari constitueix una de les fases menys industrialitzades en el procés de construcció de revestiments de túnels mitjançant TBM. Conseqüentment, s'haurien d'estudiar millores en el procés logístic tant en aquesta etapa d'emmagatzematge primari com en les etapes de manipulacions primeres i en el transport al pou d'atac.

Es podria estudiar la suma dels factors que provoquen la fissuració de les dovelles. Com pot ser el procés de curat accelerat al vapor, la temperatura, la humitat durant l'etapa de curat ambient o altres defectes durant les etapes de fabricació de les dovelles prefabricades de formigó armat.

Referències bibliogràfiques

- Reyes Rodríguez, A. M. (2015). *Autocad 2016*. España: Anaya Multimedia.
- Canavos, G.C. (1988). *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. México: McGraw Hill.
- Cervera Ruiz, M; Blanco Díaz, E. (2002). *Mecánica de estructuras*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Gere, J.M. (2002). *Resistencia de materiales (Timoshenko)*. España: International Thomson Editores.
- MIDAS Information Technology. (20/02/2017). *On-line Manual - Civil structure design system*. Recuperado de http://manual.midasuser.com/EN_TW/Civil/830/index.htm.
- Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de Hormigón EHE-08*. España.
- Free-Ed.Net Home. (24/05/2017). *Importance of curing to hydration*. Recuperado de <http://www.free-ed.net>.
- Ministerio de Fomento. (20/05/2017). *Estudio Informativo Variante Sur De Bilbao*. Primera Fase. Recuperado de <http://www.fomento.gob.es/ferrocarriles/Estudio13/Documento%201/09%20T%C3%BAneles.pdf>.
- American Concrete Institute. *ACI 544 Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*. United States.
- Cánovas, Manuel Fernández. (1991). *Hormigón*. Madrid: Servicio de Publicaciones Revista de Obras Públicas E.T.S. Ingenieros de Caminos Madrid.
- ITAtech Activity Group Support. (2015). *ITAtech Design Guidance For Precast Fibre, Reinforced Concrete Segments – Draft Report*. France: Longrine.
- The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers. (2004). *Tunnel lining design guide*. London: Thomas Telford.
- Association française des tunnels et de l'espace souterrain. (1997). *AFTES Recommendations*. France.
- Stoll Toaldo, G; de Azevedo Pinto dos Reis, H; Amore da Mota Cabral, R; Correa Martins Junio, W. (2013). *Análise da Concepção Estrutural E Processo de Produção Dos Anéis de Revestimento Segmentados do Metrô*. São Paulo: USP, Trabalho de Formatura.

Annexos

A) Fotografies de les dovelles

B) Validació Midas Civil

Annex A

Fotografies de les dovelles



5565 27 12 15 S



5565 27 12 15 S



5592 22 12 15 S



5595 28 12 15 K



5595 28 12 15 S



5629 29 12 15 S



5636 23 12 16 S



5658 30 12 15 S



5661 30 12 15 K



5744 26 12 15 S



5764 27 12 15 S



5774 27 12 05 K



5777 02 01 16 S



5778 28 12 15 K



5810 28 12 16 S



5850 29 12 16 K



5887 06 01 16 S



5896 31 12 15 S



5905 06 01 16 S



5939 07 01 16 S



6032 05 01 16 S



6061 11 01 16 S



6071 11 01 16 K



6087 12 01 16 K



6095 12 01 16 K



6095 12 01 16 S



6123 13 01 16 S



6147 13 01 16 K



6161 14 01 16 K



6161 14 01 16 S



6163 14 01 16 S



6215 15 01 16 K



6226 11 01 16 K



6226 11 01 16 S



6230 11 01 16 K



6230 11 01 16 S



6256 12 01 16 S



6256 12 01 16 K



6256 12 01 16 S



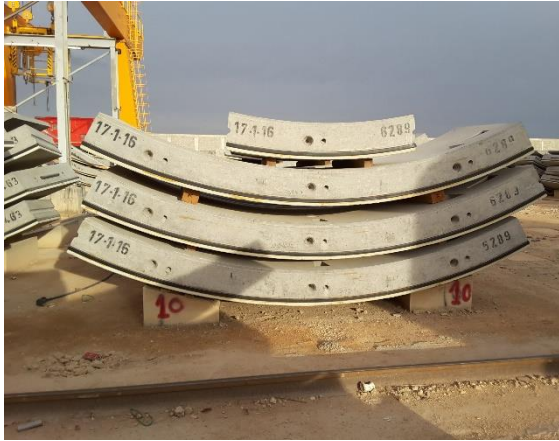
6260 12 01 16 S



6265 16 10 16 S



6269 17 01 16 S



6289 17 01 16 K



6299 17 01 16 S



6299 17 01 19 S



6301 17 01 16 K



6325 18 01 16 K



6347 19 01 16 K



6370 15 01 16 K



6370 15 01 16 S



6376 15 01 16 S



6429 21 01 16 K



6446 17 01 16 S



6472 18 01 16 S



6478 18 01 16 S



6490 18 01 16 S



6529 26 01 16 S



6572 21 01 16 S



6597 28 01 16 S



6620 23-01-16 S



6654 24 01 16 K



6740 27 01 16 S



6762 27 01 16 S



6941 07 01 16 S



7285 18 02 16 S



7309 19 02 16 K



7311 19 02 16 S



7317 19 01 16 S



7319 19 02 16 S



7345 20 02 16 S



7365 21 02 16 K



7379 21 02 16 K



7389 21 02 16 S



7391 21 02 16 S



7405 22 02 16 S



7490 19 02 16 K



7500 19 02 16 S



7512 20 02 16 S



7520 20 02 16 S



7530 20 02 16 S



7536 21 02 16 K



7544 21 02 16 S



7548 21 02 16 K



7576 22 02 16 S



7615 03 03 16 S



7758 29 02 16 S

Annex B

Validació Midas Civil

1a validació:

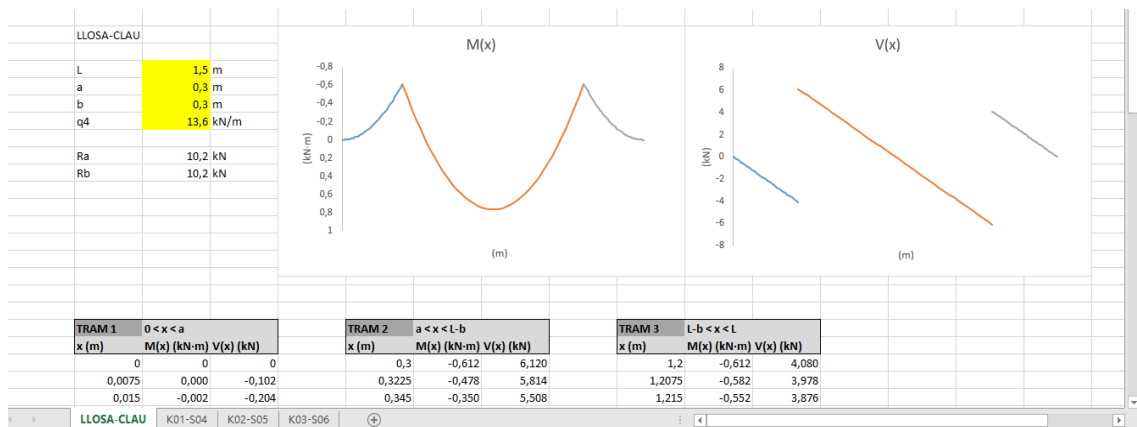


Figura 43: llosa-clau, resultats calculadora

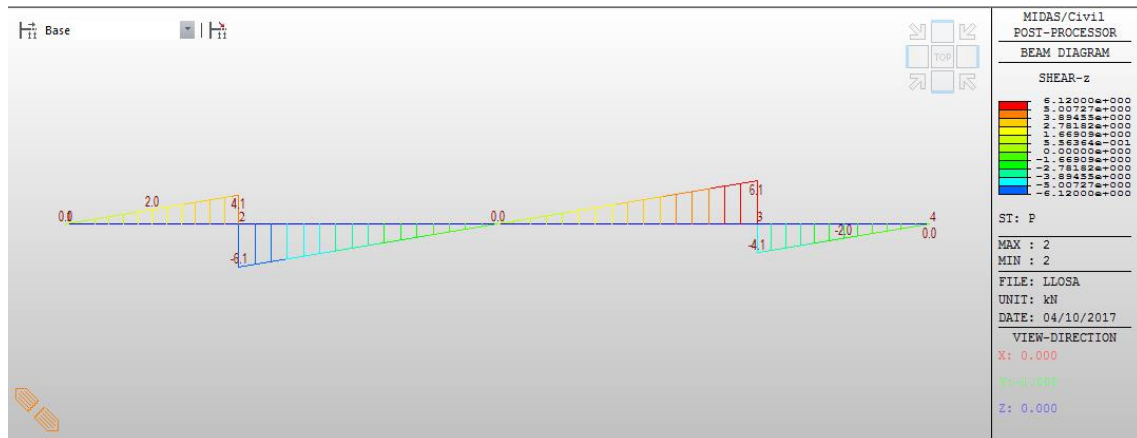


Figura 44: llosa-clau, resultat de la llei de tallants Midas Civil



Figura 45: llosa-clau, resultat de la llei de moments Midas Civil

2a validació:

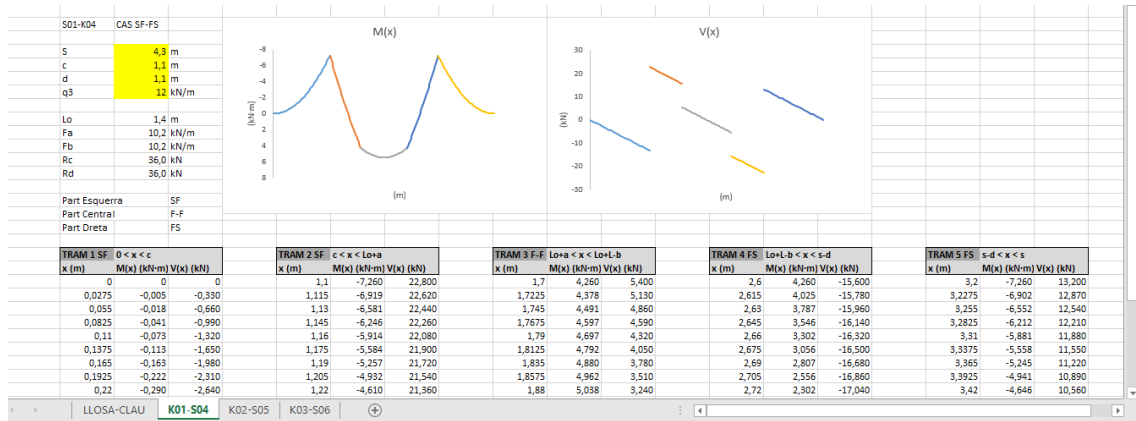


Figura 46: dovella K01-S04, resultats calculadora

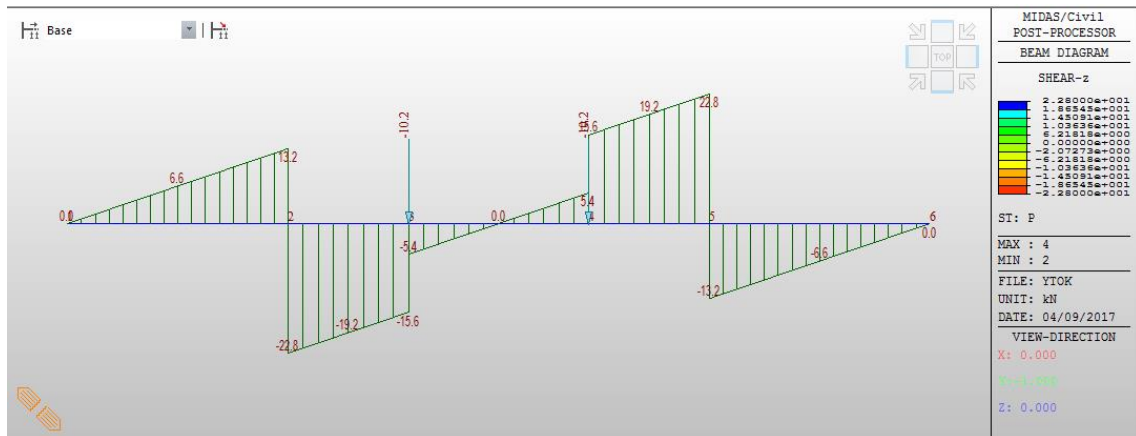


Figura 47: dovella K01-S04, resultat de la llei de tallants Midas Civil

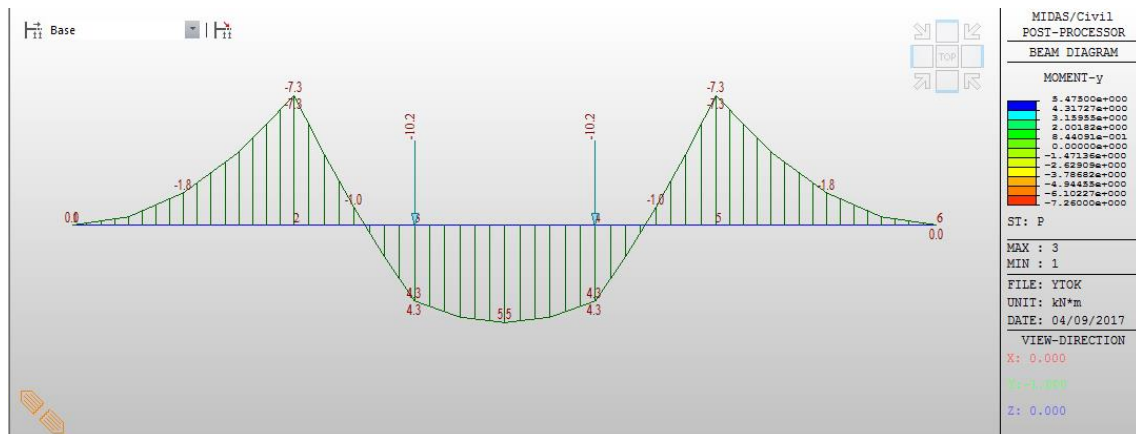


Figura 48: dovella K01-S04, resultat de la llei de moments Midas Civil

3a validació:

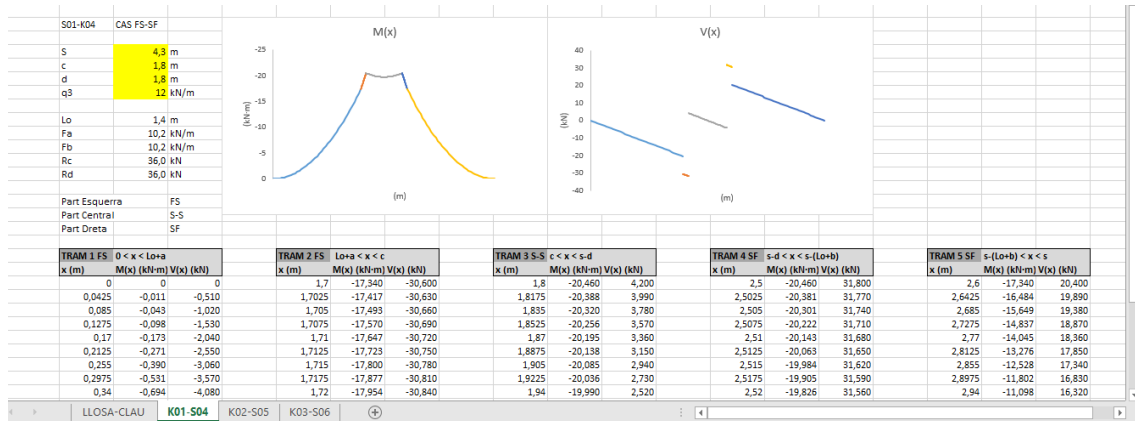


Figura 49: dovella K01-S04, resultats calculadora

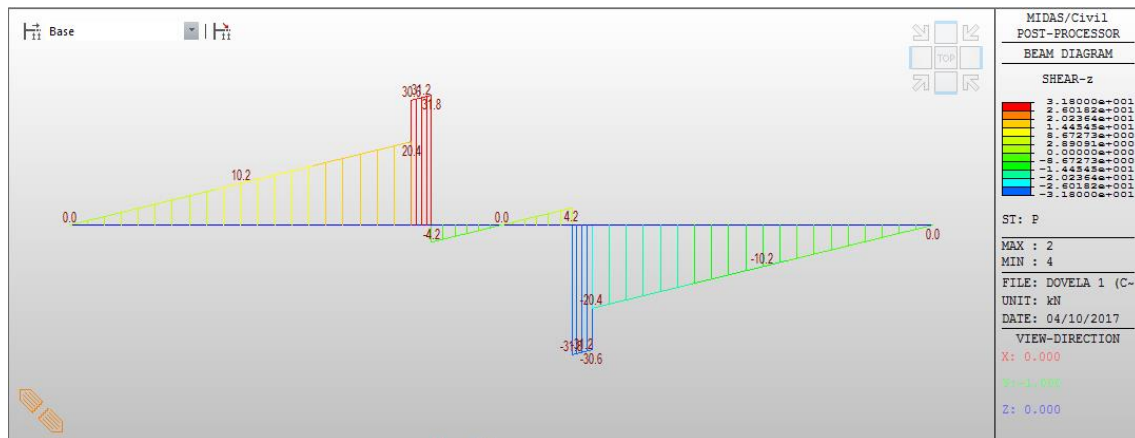


Figura 50: dovella K01-S04, resultat de la llei de tallants Midas Civil

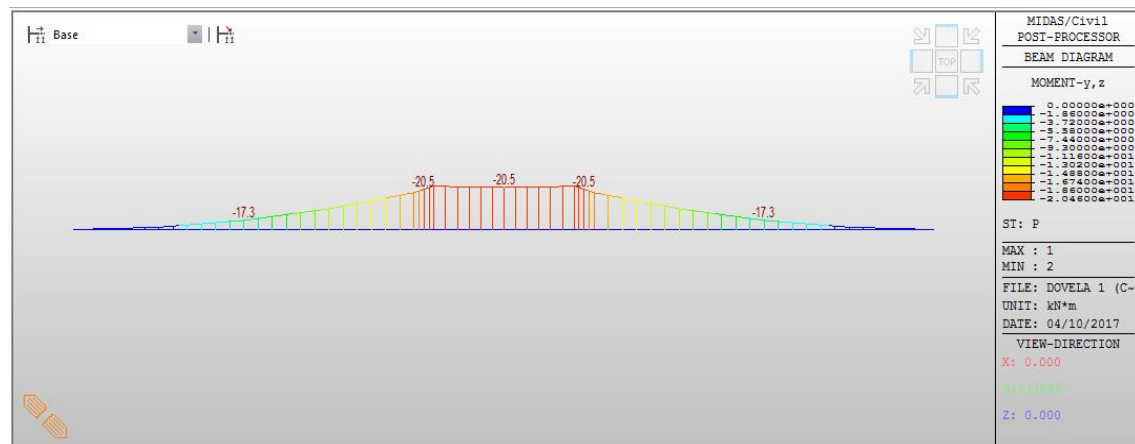


Figura 51: dovella K01-S04, resultat de la llei de moments Midas Civil