UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES DIRECTAS DE
MEDIANERÍA Y ESQUINA MEDIANTE MODELOS DE
ELEMENTOS FINITOS**

Pablo Galletero Montero

Arquitecto

Madrid 2016

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

E.T.S. INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES DIRECTAS DE MEDIANERÍA Y ESQUINA MEDIANTE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Autor: Pablo Galletero Montero
Arquitecto

Directores: D. Jaime Fernández Gómez
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. Bernardo Perepérez Ventura
Dr. Arquitecto

Madrid 2016

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES DIRECTAS DE MEDIANERÍA Y ESQUINA MEDIANTE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Autor:

Pablo Galletero Montero

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2015 para juzgar la Tesis Doctoral arriba citada, compuesto de la siguiente manera:

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Vocal Secretario:

Acuerda otorgarle la calificación de: _____

EL PRESIDENTE/A

EL SECRETARIO/A

LOS VOCALES

Madrid, ____ de _____ de 2016

*A Santos Galletero, mi padre,
que me ha transmitido el amor por la construcción
y por el trabajo bien hecho*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera mostrar mi agradecimiento a mis directores de tesis D. Jaime Fernández Gómez y D. Bernardo Perepérez Ventura, por el tiempo que me han dedicado, por los consejos y orientaciones que de ellos he recibido a lo largo del proceso de elaboración de la tesis, y por el apoyo que, muy cordialmente, me han proporcionado en todo momento.

Aprovecho asimismo la ocasión para reconocer los años previos de aprendizaje en la E.T.S. de Arquitectura de Valencia junto a mi, hoy director, D. Bernardo Perepérez Ventura. Siempre tuve una predisposición, casi innata, hacia el mundo de la construcción y del cálculo de estructuras, pero esa inclinación se ve siempre reforzada cuando en tu camino se cruzan profesores con un marcado carisma, como Bernardo.

Quiero también tener un agradecimiento especial para Carlos Neumeister Peguero, compañero y amigo en la E.T.S.I. Agrónomos y de Montes de Albacete. Su apoyo con los medios informáticos y sus conocimientos en el manejo de las herramientas de cálculo mediante elementos finitos, han sido de inestimable valor en el desarrollo y evolución de esta tesis doctoral.

Y por último, y no por ello menos importante, un merecido agradecimiento a Manoli, mi mujer y a mis hijos Marcos y Pablo. Junto con esta profesión que me apasiona, ellos llenan mi vida y son uno de los principales motivos para seguir siempre adelante.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

Existe un amplio catálogo de posibles soluciones para resolver la problemática de las zapatas de medianería así como, por extensión, las zapatas de esquina como caso particular de las anteriores. De ellas, las más habitualmente empleadas en estructuras de edificación son, por un lado, la utilización de una viga centradora que conecta la zapata de medianería con la zapata del pilar interior más próximo y, por otro, la colaboración de la viga de la primera planta trabajando como tirante.

En la primera solución planteada, el equilibrio de la zapata de medianería y el centrado de la respuesta del terreno se consigue gracias a la colaboración del pilar interior con su cimentación y al trabajo a flexión de la viga centradora. La modelización clásica considera que se logra un centrado total de la reacción del terreno, con distribución uniforme de las tensiones de contacto bajo ambas zapatas. Este planteamiento presupone, por tanto, que la viga centradora logra evitar cualquier giro de la zapata de medianería y que el pilar puede, por ello, considerarse perfectamente empotrado en la cimentación. En este primer modelo, el protagonismo fundamental recae en la viga centradora, cuyo trabajo a flexión conduce frecuentemente a unas escuadrías y a unas cuantías de armado considerables.

La segunda solución, plantea la colaboración de la viga de la primera planta, trabajando como tirante. De nuevo, los métodos convencionales suponen un éxito total en el mecanismo estabilizador del tirante, que logra evitar cualquier giro de la zapata de medianería, dando lugar a una distribución de tensiones también uniforme.

Los modelos convencionales existentes para el cálculo de este tipo de cimentaciones presentan, por tanto, una serie de simplificaciones que permiten el cálculo de las mismas, por medios manuales, en un tiempo razonable, pero presentan el inconveniente de su posible alejamiento del comportamiento real de la cimentación, con las consecuencias negativas que ello puede suponer en el dimensionamiento de estos elementos estructurales.

La presente tesis doctoral desarrolla un contraste de los modelos convencionales de cálculo de cimentaciones de medianería y esquina, mediante un análisis alternativo con modelos de elementos finitos, con el objetivo de poner de manifiesto las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos tipos de modelización, analizar cuáles son las variables que más influyen en el comportamiento real de este tipo de cimentaciones y proponer un nuevo modelo de cálculo, de tipo convencional, más ajustado a la realidad.

El proceso de investigación se desarrolla mediante una etapa experimental virtual que utiliza como modelo un pórtico tipo de edificación, ortogonal, de hormigón armado, con dos vanos y número variable de plantas.

Tras identificar el posible giro de la cimentación como elemento clave en el comportamiento de las zapatas de medianería y de esquina, se adoptan como variables de estudio aquellas que mayor influencia puedan tener sobre el citado giro de las zapatas y sobre la rigidez del conjunto del elemento estructural. Así, se han estudiado luces de 3 m a 7 m, diferente número de plantas desde baja+1 hasta baja+4, resistencias del terreno desde 100 kN/m² hasta 300 kN/m², relaciones de forma de la zapata de medianería de 1,5 : 1 y 2 : 1, aumento y reducción de la cuantía de armado de la viga centradora y variación del canto de la viga centradora desde el mínimo canto compatible con el anclaje de la armadura de los pilares hasta un incremento del 75% respecto del citado canto mínimo.

El conjunto de pórticos generados al aplicar las variables indicadas, se ha calculado tanto por métodos convencionales como por el método de los elementos finitos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto importantes discrepancias entre ambos métodos que conducen a importantes diferencias en el dimensionamiento de este tipo de cimentaciones. El empleo de los métodos tradicionales da lugar, por un lado, a un sobredimensionamiento de la armadura de la viga centradora y, por otro, a un infradimensionamiento, tanto del canto de la viga centradora, como del tamaño de la zapata de medianería y del armado de la viga de la primera planta.

Finalizado el análisis y discusión de resultados, la tesis propone un nuevo método alternativo, de carácter convencional y, por tanto, aplicable a un cálculo manual en un tiempo razonable, que permite obtener los parámetros clave que regulan el comportamiento de las zapatas de medianería y esquina, conduciendo a un dimensionamiento más ajustado a las necesidades reales de este tipo de cimentación.

ABSTRACT

There is a wide catalogue of possible solutions to solve the problem of party shoes and, by extension, corner shoes as a special case of the above. From all of them, the most commonly used in building structures are, on one hand, the use of a centering beam that connects the party shoe with the shoe of the nearest interior pillar and, on the other hand, the collaboration of the beam of the first floor working as a tie rod.

In the first proposed solution, the balance of the party shoe and the centering of the ground response is achieved thanks to the collaboration of the interior pillar with his foundation along with the bending work of the centering beam. Classical modeling considers that a whole centering of the ground reaction is achieved, with uniform contact stress distribution under both shoes. This approach to the issue presupposes that the centering beam manages to avoid any rotation of the party shoe, so the pillar can be considered perfectly embedded in the foundation. In this first model, the leading role lies in the centering beam, whose bending work usually leads to important section sizes and high amounts of reinforced.

The second solution, considers the collaboration of the beam of the first floor, working as tie rod. Again, conventional methods involve a total success in the stabilizing mechanism of the tie rod, that manages to avoid any rotation of the party shoe, resulting in a stress distribution also uniform.

Existing conventional models for calculating such foundations show, therefore, a series of simplifications which allow calculation of the same, by manual means, in a reasonable time, but have the disadvantage of the possible distance from the real behavior of the foundation, with the negative consequences this could bring in the dimensioning of these structural elements.

The present thesis develops a contrast of conventional models of calculation of party and corner foundations by an alternative analysis with finite element models with the aim of bring to light the differences between the results obtained with both types of modeling, analysis which are the variables that influence the real behavior of this type of foundations and propose a new calculation model, conventional type, more adjusted to reality.

The research process is developed through a virtual experimental stage using as a model a typical building frame, orthogonal, made of reinforced concrete, with two openings and variable number of floors.

After identifying the possible spin of the foundation as the key element in the behavior of the party and corner shoes, it has been adopted as study variables, those that may have greater influence on the spin of the shoes and on the rigidity of the whole structural element. So, it have been studied lights from 3 m to 7 m, different number of floors from lower floor + 1 to lower floor + 4, maximum ground stresses from 100 kN/m² 300 kN/m², shape relationships of party shoe 1,5:1 and 2:1, increase and decrease of the amount of reinforced of the centering beam and variation of the height of the centering beam from the minimum compatible with the anchoring of the reinforcement of pillars to an increase of 75% from the minimum quoted height.

The set of frames generated by applying the indicated variables, is calculated both by conventional methods such as by the finite element method. The results show significant discrepancies between the two methods that lead to significant differences in the dimensioning of this type of foundation. The use of traditional methods results, on one hand, to an overdimensioning of the reinforced of the centering beam and, on the other hand, to an underdimensioning, both the height of the centering beam, such as the size of the party shoe and the reinforced of the beam of the first floor.

After the analysis and discussion of results, the thesis proposes a new alternative method, conventional type and, therefore, applicable to a manual calculation in a reasonable time, that allows to obtain the key parameters that govern the behavior of party and corner shoes, leading to a dimensioning more adjusted to the real needs of this type of foundation.

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL	1
1.2. OBJETIVOS	6
1.3. ESQUEMA GENERAL DE LA TESIS	7
CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	9
2.1. ZAPATAS DE MEDIANERÍA Y ESQUINA. CONCEPTO Y TIPOLOGÍA	9
2.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA	13
2.2.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO	13
2.2.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA	16
2.3. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE LA VIGA SUPERIOR	20
2.3.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO	20
2.3.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LA VIGA Y EN EL PILAR	24
2.4. ZAPATA DE ESQUINA CON DOS VIGAS CENTRADORAS	26
2.4.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO	26
2.4.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LAS VIGAS CENTRADORAS	31
2.5. VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS MODELOS CONVENCIONALES	37
CAPÍTULO 3. PLAN EXPERIMENTAL	43
3.1. PLANTEAMIENTO GENERAL. DISEÑO EXPERIMENTAL	43
3.1.1. PÓRTICOS TIPO	43
3.1.2. ACCIONES	45
3.1.3. VARIABLES Y CASOS PLANTEADOS	49
3.1.3.1. ETAPA I	52

ÍNDICE GENERAL

3.1.3.2. ETAPA II	56
3.1.3.3. ETAPA III	61
3.1.3.4. ETAPA IV	68
3.2. MODELIZACIÓN CONVENCIONAL	71
3.2.1. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LOS PÓRTICOS	71
3.2.2. CÁLCULO DE MODELOS CONVENCIONALES	71
3.2.2.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA	72
3.2.2.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE VIGA SUPERIOR	73
3.2.2.3. ZAPATA DE ESQUINA CON VIGAS CENTRADORAS	74
3.3. MODELIZACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	75
3.3.1. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPA I	76
3.3.1.1. PREPROCESO	76
3.3.1.2. CÁLCULO	86
3.3.1.3. POSTPROCESO	87
3.3.2. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPAS II Y III	91
3.3.2.1. PREPROCESO. DEFINICIÓN DE MATERIALES	91
3.3.2.2. PREPROCESO. MODELADO	94
3.3.2.3. PREPROCESO. MALLADO	97
3.3.2.4. CÁLCULO Y POSTPROCESO	99
3.3.3. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPA IV	101
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	103
4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA I	103
4.1.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES	103
4.1.1.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA	103
4.1.1.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE LA VIGA SUPERIOR	108
4.1.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	112

ÍNDICE GENERAL

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA II	123
4.2.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES	123
4.2.1.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA	123
4.2.1.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE LA VIGA SUPERIOR	130
4.2.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	137
4.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA III	165
4.3.1. REDUCCIÓN DE ARMADURA	165
4.3.2. ELIMINACIÓN DE LA VIGA CENTRADORA	169
4.3.3. AUMENTO DE ARMADURA	172
4.3.4. INCREMENTO DEL CANTO DE LA VIGA CENTRADORA	176
4.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA IV	183
4.4.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES	183
4.4.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	185
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	193
5.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA I	193
5.1.1. ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA	193
5.1.2. ESFUERZOS EN LA VIGA SUPERIOR	203
5.1.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE CONTACTO	207
5.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA II	212
5.2.1. ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA	212
5.2.2. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE CONTACTO	215
5.2.3. ESFUERZOS EN LA VIGA SUPERIOR	217
5.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA III	219
5.3.1. AUMENTO DE ARMADURA DE LA VIGA CENTRADORA	219
5.3.2. REDUCCIÓN DE ARMADURA DE LA VIGA CENTRADORA	221
5.3.3. ELIMINACIÓN DE LA VIGA CENTRADORA	223
5.3.4. AUMENTO DEL CANTO DE LA VIGA CENTRADORA	225

ÍNDICE GENERAL

5.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA IV	228
5.5. PROPUESTA DE MEJORA DEL MÉTODO CONVENCIONAL	231
5.5.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA	231
5.5.2. ZAPATA DE ESQUINA CON DOS VIGAS CENTRADORAS	243
5.6. RECOMENDACIONES DE RELACIÓN LUZ - CANTO	246

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

249

6.1. INTRODUCCIÓN	249
6.2. CONCLUSIONES	249
6.2.1. CONCLUSIONES DE LA ETAPA I	249
6.2.2. CONCLUSIONES DE LA ETAPA II	251
6.2.3. CONCLUSIONES DE LA ETAPA III	252
6.2.4. CONCLUSIONES DE LA ETAPA IV	253
6.2.5. PROPUESTA DE MEJORA DEL MÉTODO CONVENCIONAL	254
6.2.6. RECOMENDACIONES DE RELACIÓN LUZ - CANTO	256
6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	257

BIBLIOGRAFÍA

259

ANEJOS

ANEJO I. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

ANEJO II. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL MATERIAL HORMIGÓN

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Variables planteadas en la Etapa I	55
Tabla 2.	Variables planteadas en la Etapa II	59
Tabla 3.	Variables planteadas en la Etapa III	67
Tabla 4.	Variables planteadas en la Etapa IV	70
Tabla 5.	Hoja de cálculo para resolución de zapata de medianería con viga centradora	72
Tabla 6.	Hoja de cálculo para resolución de zapata de medianería con colaboración de la viga superior	73
Tabla 7.	Hoja de cálculo para resolución de zapata de esquina con dos vigas centradoras	74
Tabla 8.	Módulo de elasticidad longitudinal de suelos	79
Tabla 9.	Tensiones admisibles de suelos	80
Tabla 10.	Ángulo de rozamiento interno de suelos	85
Tabla 11.	Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 300	105
Tabla 12.	Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 450	106
Tabla 13.	Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 600	107
Tabla 14.	Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I. Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 300	109
Tabla 15.	Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I. Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 450	110
Tabla 16.	Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I. Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 600	111
Tabla 17.	Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno. Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 300	114
Tabla 18.	Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno. Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 450	115
Tabla 19.	Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno. Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 600	116
Tabla 20.	Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos. Etapa I. Pórtico tipo h = 300	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 21. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos.	
Etapa I. Pórtico tipo h = 450	121
Tabla 22. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos.	
Etapa I. Pórtico tipo h = 600	122
Tabla 23. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	124
Tabla 24. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	125
Tabla 25. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	126
Tabla 26. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	127
Tabla 27. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	128
Tabla 28. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II	
Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	129
Tabla 29. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	131
Tabla 30. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	132
Tabla 31. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	133
Tabla 32. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	134
Tabla 33. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	135
Tabla 34. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional.	
Etapa II. Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	136
Tabla 35. Dimensionamiento y armado de pórticos con Baja +1 plantas.	
Modelos de elementos finitos. Etapa II	139
Tabla 36. Dimensionamiento y armado de pórticos con Baja +2 plantas.	
Modelos de elementos finitos. Etapa II	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 37. Dimensionamiento y armado de pórticos con Baja +3 plantas. Modelos de elementos finitos. Etapa II	141
Tabla 38. Dimensionamiento y armado de pórticos con Baja +4 plantas. Modelos de elementos finitos. Etapa II	142
Tabla 39. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	145
Tabla 40. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	146
Tabla 41. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	147
Tabla 42. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	148
Tabla 43. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	149
Tabla 44. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1. Modelos de elementos finitos. Etapa II	150
Tabla 45. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	152
Tabla 46. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	153
Tabla 47. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	154
Tabla 48. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	155
Tabla 49. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	156
Tabla 50. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1	157
Tabla 51. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	158
Tabla 52. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 53. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	160
Tabla 54. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	161
Tabla 55. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	162
Tabla 56. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	163
Tabla 57. Dimensionamiento cimentación. Reducción de armadura. M.E.F. Etapa III $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	166
Tabla 58. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Red. Arm. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	167
Tabla 59. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Red. Armadura. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	168
Tabla 60. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en viga superior. M.E.F. Sin V.CEN.. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1 ...	170
Tabla 61. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Sin V. Centradora. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	171
Tabla 62. Dimensionamiento cimentación. Incremento de armadura. M.E.F. Etapa II $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	173
Tabla 63. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. Inc. Arm. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	174
Tabla 64. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Inc. Armadura. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	175
Tabla 65. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. $H = 1,25 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1 ..	177
Tabla 66. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,25 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	178
Tabla 67. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. $H = 1,50 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1 ..	179
Tabla 68. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,50 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 69.	Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1 ..	181
Tabla 70.	Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H \text{ II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	182
Tabla 71.	Zapata de esquina con vigas centradoras. Modelo convencional. Etapa IV Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	184
Tabla 72.	Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina. M.E.F. $H = H \text{ min (I)}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	186
Tabla 73.	Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina. M.E.F. $H = H \text{ min (II)}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	187
Tabla 74.	Distribución de tensiones de contacto. Zapata de esquina. M.E.F. $H = H \text{ min}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	188
Tabla 75.	Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H \text{ min (I)}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	189
Tabla 76.	Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H \text{ min. (II)}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	190
Tabla 74.	Distribución de tensiones de contacto. Zapata de esquina. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H \text{ min}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1	191
Tabla 75.	Resultados M.E.F. Baja+1. Posición y Resultantes	233
Tabla 76.	Resultados M.E.F. Baja+2. Posición y Resultantes	234
Tabla 77.	Resultados M.E.F. Baja+3. Posición y Resultantes	235
Tabla 78.	Resultados M.E.F. Baja+4. Posición y Resultantes	236
Tabla 79.	Resultados M.E.F. zapata de esquina. Posiciones y Resultantes	243

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.	Modelización simplificada para cálculo manual	2
Fig.2.	Modelización por elementos finitos	3
Fig.3.	Concepto de zapata de medianería y zapata de esquina	9
Fig.4.	Soluciones más frecuentes para las de zapatas de medianería	10
Fig.5.	Solución habitual para las zapatas de esquina	12
Fig.6.	Zapata de medianería con viga centradora. Modelización convencional	15
Fig.7.	Cálculo de esfuerzos en la viga centradora	17
Fig.8.	Zapata de medianería con colaboración de la viga superior. Modelización convencional	21
Fig.9.	Cálculo de esfuerzos en la viga y en el pilar	24
Fig.10.	Esquema de la cimentación en el entorno de una zapata de esquina	27
Fig.11.	Zapata de esquina con vigas centradoras. Modelización convencional	28
Fig.12.	Zapata de esquina con vigas centradoras. Acciones y reacciones	29
Fig.13.	Cálculo de esfuerzos en la viga centradora 1	32
Fig.14.	Cálculo de esfuerzos en la viga centradora 2	35
Fig.15.	Valoración crítica de los modelos convencionales	37
Fig.16.	Zapata de medianería con colaboración de la viga superior y diagrama trapecial	41
Fig.17.	Pórtico tipo para el estudio de las zapatas de medianería	44
Fig.18.	Pórticos tipo para el estudio de las zapatas de esquina	44
Fig.19.	Acciones. Peso Propio y Carga Permanente	47
Fig.20.	Acciones. Sobrecarga de Uso	48
Fig.21.	Deformada de una zapata de medianería con viga centradora	51
Fig.22.	Pórtico tipo y niveles de rigidez planteados en la Etapa I	53
Fig.23.	Relaciones de forma consideradas en la zapata de medianería	55
Fig.24.	Luces de vano consideradas en el pórtico tipo	58
Fig.25.	Número de plantas consideradas en el pórtico tipo	58
Fig.26.	Relaciones de forma consideradas en la Etapa II	59
Fig.27.	Eliminación de la viga centradora	63
Fig.28.	Sección fisurada de hormigón armado	64
Fig.29.	Dominios de deformación	65
Fig.30.	Incremento del canto de la cimentación	66
Fig.31.	Luces y número de plantas consideradas en el pórtico tipo	69
Fig.32.	Programa de cálculo matricial CYPE Metal 3D	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.33. Esquema de cálculo de zapata de medianería con viga centradora	72
Fig.34. Esquema de cálculo de zapata de medianería con colaboración de la viga superior	73
Fig.35. Esquema de cálculo de zapata de esquina con dos vigas centradoras	74
Fig.36. Modelado de un caso tipo de la Etapa I	77
Fig.37. Concepto de mallado	81
Fig.38. Elemento hexaédrico recto de 8 nodos	82
Fig.39. Modelo tipo mallado	83
Fig.40. Método de cálculo numérico de Newton - Raphson	86
Fig.41. Salida gráfica de resultados con indicación de valor por escala cromática	87
Fig.42. Listado con relación de tensiones correspondientes a diferentes nodos	88
Fig.43. Sección transversal y relación de elementos y nodos que la componen	89
Fig.44. Proceso de integración de tensiones para una sección	90
Fig.45. Comportamiento elástico lineal isótropo	91
Fig.46. Diagrama parabólico rectangular del hormigón y fisuración de zonas traccionadas	92
Fig.47. Modelado de pórtico tipo. Vista general exterior	94
Fig.48. Modelado de las armaduras del pórtico tipo	95
Fig.49. Detalle del modelado de las armaduras de vigas y pilares	95
Fig.50. Detalle del modelado de las armaduras de vigas y pilares	96
Fig.51. Detalle del modelado de las armaduras de la cimentación	96
Fig.52. Concepto de adherencia	97
Fig.53. Mallado del material hormigón	98
Fig.54. Mallado del material acero	98
Fig.55. Integración de resultados en el hormigón	100
Fig.56. Integración de resultados en la armadura de acero	100
Fig.57. Resultados de los modelos de elementos finitos	112
Fig.58. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos	117
Fig.59. Posición absoluta y relativa de la resultante de la zapata de medianería	118
Fig.60. Diagramas lineales de distribución de tensiones de contacto	119
Fig.61. Armado tipo en pilares	138
Fig.62. Armado tipo en vigas	138
Fig.63. Armado tipo en zapatas	143
Fig.64. Armado tipo en vigas centradoras	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.65. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la rigidez del pórtico	193
Fig.66. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la tensión admisible del terreno	194
Fig.67. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la relación de forma	195
Fig.68. Giro de la cimentación según el modelo de elementos finitos	196
Fig.69. Modelo convencional de zapata de medianería con viga centradora	197
Fig.70. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función del nivel de rigidez del pórtico	198
Fig.71. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función de la tensión admisible del terreno	199
Fig.72. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función de la relación de forma	200
Fig.73. Desplazamiento de la resultante de tensiones de la zapata de medianería	201
Fig.74. Reducción de eficacia de las zonas de la zapata de medianería próximas al centro del vano	202
Fig.75. Variación del esfuerzo axial en la viga de la primera planta en función de la rigidez del pórtico	203
Fig.76. Variación del esfuerzo axial en la viga de la primera planta en función de la tensión admisible del terreno	204
Fig.77. Variación del esfuerzo axial en la viga de la primera planta en función de la relación de forma	205
Fig.78. Distribución de tensiones de contacto en modelos de elementos finitos	207
Fig.79. Diagrama de distribución de tensiones lineal equivalente	207
Fig.80. Verificación de tensiones de contacto con modelo de elementos finitos	208
Fig.81. Contraste de resultantes de tensiones de contacto en zapata de medianería y viga centradora	209
Fig.82. Relación resultante viga centradora - resultante zapata	210
Fig.83. Viga centradora como viga de cimentación	210
Fig.84. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la relación de forma y de la tensión admisible del terreno	212
Fig.85. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la luz y el número de plantas del pórtico	212

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.86. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería. Etapa II ..	213
Fig.87. Aumento de la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería	214
Fig.88. Distribución de tensiones triangular estricta	215
Fig.89. Relación resultante viga centradora - resultante zapata medianería. Etapa II	215
Fig.90. Verificación de tensiones de contacto. Etapa II	216
Fig.91. Contraste del esfuerzo axil en la viga superior en función de la relación de forma y de la tensión admisible del terreno	217
Fig.92. Contraste del axil en la viga superior en función de la luz y el número de plantas del pórtico	217
Fig.93. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería con aumento de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III	220
Fig.94. Verificación de tensiones de contacto con aumento de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III	220
Fig.95. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería con reducción de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III	222
Fig.96. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería sin viga centradora. Contraste Etapa II - Etapa III	223
Fig.97. Contraste del axil en la viga superior en función de la luz y el número de plantas del pórtico	224
Fig.98. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$	225
Fig.99. Verificación de tensiones de contacto. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$	226
Fig.100. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora	227
Fig.101. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de esquina	228
Fig.102. Verificación de tensiones de contacto en la zapata de esquina	229
Fig.103. Contraste del valor del momento flector en las vigas centradoras	230
Fig.104. Comparación método convencional - resultados M.E.F.	231
Fig.105. Posición de la resultante de la zapata de medianería en función de la rigidez ...	237
Fig.106. Gráfico de ajuste por mínimos cuadrados	238
Fig.107. Resultantes de tensiones de contacto en zapata de medianería y viga centradora	239
Fig.108. Evolución del porcentaje de área de la viga centradora	240
Fig.109. Resultante en la viga centradora en función de su rigidez	240
Fig.110. Correlación del ajuste de la resultante de la viga centradora	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.111. Método operativo	242
Fig.112. Gráficos de ajuste por mínimos cuadrados	244
Fig.113. Correlación de los ajustes de las resultantes de las vigas centradoras	245
Fig.114. Recomendación de relación luz canto en zapatas de medianería	246
Fig.115. Recomendación de relación luz canto en zapatas de esquina	246

SÍMBOLOS

ϕ	Ángulo de rozamiento interno del terreno
γ_{ho}	Peso específico del hormigón armado
γ_{so}	Peso específico de la solera
γ_{su}	Peso específico del suelo
μ	Coeficiente de rozamiento
ν_c	Coeficiente de Poisson del hormigón armado
ν_{su}	Coeficiente de Poisson del suelo
σ_{adm}	Tensión admisible en el terreno
σ_e	Tensión de contacto en la zapata de esquina
$\sigma_{(e-1)}$	Fracción de la tensión de contacto de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$\sigma'_{(e-1)}$	Fracción de la tensión de contacto reducida de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$\sigma_{(e-2)}$	Fracción de la tensión de contacto de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
$\sigma'_{(e-2)}$	Fracción de la tensión de contacto reducida de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
σ_i	Tensión de contacto en la zapata interior
σ'_i	Tensión de contacto reducida en la zapata interior
σ_m	Tensión de contacto en la zapata de medianería
σ'_m	Tensión de contacto reducida en la zapata de medianería
σ_{m1}	Tensión de contacto en la zapata de medianería 1
σ'_{m1}	Tensión de contacto reducida en la zapata de medianería 1
σ_{m2}	Tensión de contacto en la zapata de medianería 2
σ'_{m2}	Tensión de contacto reducida en la zapata de medianería 2
$\sigma_{max.}$	Tensión de contacto máxima
$\sigma_{med.}$	Tensión de contacto media
$\sigma_{min.}$	Tensión de contacto mínima
a	Dimensión de la zapata paralela al pórtico
a_c	Dimensión de la viga centradora paralela al pórtico
a_{c1}	Dimensión de la viga centradora 1 en dirección x
a_{c2}	Dimensión de la viga centradora 2 en dirección x

SÍMBOLOS

a_e	Dimensión de la zapata de esquina en dirección x
a_i	Dimensión de la zapata interior paralela al pórtico
a_m	Dimensión de la zapata de medianería paralela al pórtico
a_{m1}	Dimensión de la zapata de medianería 1 en dirección x
a_{m2}	Dimensión de la zapata de medianería 2 en dirección x
a'_i	Dimensión del pilar interior paralela al pórtico
a'_m	Dimensión del pilar de medianería paralela al pórtico
a_R	Posición de la resultante respecto del extremo de la zapata
b_e	Dimensión de la zapata de esquina en dirección y
b_c	Dimensión de la viga centradora perpendicular al pórtico
b_{c1}	Dimensión de la viga centradora 1 en dirección y
b_{c2}	Dimensión de la viga centradora 2 en dirección y
b_i	Dimensión de la zapata interior perpendicular al pórtico
b_m	Dimensión de la zapata de medianería perpendicular al pórtico
b_{m1}	Dimensión de la zapata de medianería 1 en dirección y
b_{m2}	Dimensión de la zapata de medianería 2 en dirección y
b'_i	Dimensión del pilar interior perpendicular al pórtico
b'_m	Dimensión del pilar de medianería perpendicular al pórtico
c.d.g.	Centro de gravedad
d	Canto útil de una sección de hormigón armado
e	Excentricidad
e_i	Excentricidad de la resultante de tensiones de la zapata interior
e_m	Excentricidad de la resultante de tensiones de la zapata de medianería
e_v	Excentricidad de la resultante de tensiones de la viga centradora
E	Módulo de elasticidad longitudinal
E_{cm}	Módulo de deformación longitudinal secante a 28 días de edad
E_{su}	Módulo de elasticidad longitudinal del suelo
f_{ck}	Resistencia característica a compresión del hormigón a 28 días de edad
f_{cm}	Resistencia media a compresión del hormigón a 28 días de edad
F_r	Fuerza de rozamiento
h	Canto de un elemento de hormigón armado
h_{so}	Espesor de la solera
I_b	Inercia bruta de una sección de hormigón armado
I_e	Inercia equivalente de una sección de hormigón armado

SÍMBOLOS

I_f	Inercia fisurada de una sección de hormigón armado
L	Luz del pórtico
L_c	Distancia del centro de la viga centradora al centro de la zapata interior
L_{ex}	Distancia del eje del pilar de esquina al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{ey}	Distancia del eje del pilar de esquina al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
L_{c1y}	Distancia del centro de la viga centradora 1 al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
L_{c1x}	Distancia del centro de la viga centradora 1 al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{c2x}	Distancia del centro de la viga centradora 2 al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{c2y}	Distancia del centro de la viga centradora 2 al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
L_m	Distancia del centro de la zapata de medianería al centro de la zapata interior
L_{m1x}	Distancia del eje del pilar de medianería 1 al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{m2y}	Distancia del eje del pilar de medianería 2 al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
L_{zex}	Distancia del centro de la zapata de esquina al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{zey}	Distancia del centro de la zapata de esquina al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
L_{zm1x}	Distancia del centro de la zapata de medianería 1 al centro de la zapata de medianería 2 en dirección x
L_{zm2y}	Distancia del centro de la zapata de medianería 2 al centro de la zapata de medianería 1 en dirección y
M_a	Momento flector aplicado en una sección de hormigón armado
M_{ex}	Momento flector en la base del pilar de esquina respecto del eje x
M_{ey}	Momento flector en la base del pilar de esquina respecto del eje y
M_f	Momento de fisuración de una sección de hormigón armado
M_i	Momento flector en la base del pilar interior
M_m	Momento flector en la base del pilar de medianería

SÍMBOLOS

M_{m1x}	Momento flector en la base del pilar de medianería 1 respecto del eje x
M_{m1y}	Momento flector en la base del pilar de medianería 1 respecto del eje y
M_{m2x}	Momento flector en la base del pilar de medianería 2 respecto del eje x
M_{m2y}	Momento flector en la base del pilar de medianería 2 respecto del eje y
M_{ms}	Momento flector en la cabeza del pilar de medianería
$M_{v\max}$	Momento máximo en la viga de cimentación imaginaria
M_{1v}	Momento flector en la sección inicial de la viga centradora
M_{1c1}	Momento flector en la sección inicial de la viga centradora 1
M_{1c2}	Momento flector en la sección inicial de la viga centradora 2
N_e	Esfuerzo axil en la base del pilar de esquina
$N_{(e-1)}$	Fracción del esfuerzo axil del pilar de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$N_{(e-2)}$	Fracción del esfuerzo axil del pilar de esquina correspondiente a la viga centradora 2
N_i	Esfuerzo axil en la base del pilar interior
N_m	Esfuerzo axil en la base del pilar de medianería
N_{m1}	Esfuerzo axil en la base del pilar de medianería 1
N_{m2}	Esfuerzo axil en la base del pilar de medianería 2
N_{ms}	Esfuerzo axil en la cabeza del pilar de medianería
P_{pm}	Peso del pilar de medianería
P_{sc}	Peso de la solera sobre la viga centradora
P_{sc1}	Peso de la solera sobre la viga centradora 1
P_{sc2}	Peso de la solera sobre la viga centradora 2
P_{se}	Peso de la solera sobre la zapata de esquina
$P_{s(e-1)}$	Fracción del peso de la solera sobre la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$P_{s(e-2)}$	Fracción del peso de la solera sobre la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
P_{si}	Peso de la solera sobre la zapata interior
P_{sm}	Peso de la solera sobre la zapata de medianería
P_{sm1}	Peso de la solera sobre la zapata de medianería 1
P_{sm2}	Peso de la solera sobre la zapata de medianería 2
P_{vc}	Peso de la viga centradora
P_{vc1}	Peso de la viga centradora 1

SÍMBOLOS

P_{vc2}	Peso de la viga centradora 2
P_{ze}	Peso de la zapata de esquina
$P_{z(e-1)}$	Fracción del peso de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$P_{z(e-2)}$	Fracción del peso de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
P_{zi}	Peso de la zapata interior
P_{zm}	Peso de la zapata de medianería
P_{zm1}	Peso de la zapata de medianería 1
P_{zm2}	Peso de la zapata de medianería 2
q_p	Carga de peso propio y carga permanente
q_s	Carga de sobrecarga de uso
R_e	Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de esquina
$R_{(e-1)}$	Fracción de la resultante de las tensiones de contacto de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$R'_{(e-1)}$	Fracción de la resultante de las tensiones de contacto reducidas de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 1
$R_{(e-2)}$	Fracción de la resultante de las tensiones de contacto de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
$R'_{(e-2)}$	Fracción de la resultante de las tensiones de contacto reducidas de la zapata de esquina correspondiente a la viga centradora 2
R_i	Resultante de las tensiones de contacto en la zapata interior
R_m	Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de medianería
R_{m1}	Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de medianería 1
R'_{m1}	Resultante de las tensiones de contacto reducidas en la zapata de medianería 1
R_{m2}	Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de medianería 2
R'_{m2}	Resultante de las tensiones de contacto reducidas en la zapata de medianería 2
R_v	Resultante de las tensiones de contacto en la viga centradora
T	Esfuerzo axil de tracción en la viga de la primera planta
V_{ex}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de esquina en dirección x
V_{ey}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de esquina en dirección y
V_i	Esfuerzo cortante en la base del pilar interior

SÍMBOLOS

V_m	Esfuerzo cortante en la base del pilar de medianería
V_{m1x}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de medianería 1 en dirección x
V_{m1y}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de medianería 1 en dirección y
V_{m2x}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de medianería 2 en dirección x
V_{m2y}	Esfuerzo cortante en la base del pilar de medianería 2 en dirección y
V_{ms}	Esfuerzo cortante en la cabeza del pilar de medianería
V_{1v}	Esfuerzo cortante en la sección inicial de la viga centradora
V_{1c1}	Esfuerzo cortante en la sección inicial de la viga centradora 1
V_{1c2}	Esfuerzo cortante en la sección inicial de la viga centradora 2
V_{2v}	Esfuerzo cortante a un canto útil del pilar de medianería
x	Profundidad de la fibra neutra

ABREVIATURAS

C.T.E.	Código Técnico de la Edificación
DB SE - AE	Documento Básico. Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación
DB SE - C	Documento Básico. Seguridad Estructural: Cimientos
D.E.A.	Diploma de Estudios Avanzados
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
E.L.U.	Estado Límite Último
Fig.	Figura
M.E.F.	Método de Elementos Finitos

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Desde tiempos remotos la humanidad ha tenido la aspiración de llegar a apropiarse de la complejidad de los procesos naturales y su comportamiento real, mediante algoritmos de cálculo que simulen y reproduzcan fielmente dicho comportamiento.

Ante el hecho constatado de lo utópico del planteamiento, llega el momento de la humildad, del reconocimiento de las limitaciones propias y, como consecuencia, del planteamiento de algoritmos o modelos de cálculo simplificados, que aspiran a aproximarse lo más posible a la realidad, dentro de las posibilidades de las herramientas de cálculo disponibles.

Como caso particular de lo comentado, el proceso de cálculo de una estructura comienza por una fase inicial consistente en la definición de un modelo teórico que se asemeja, todo lo posible, a la estructura real y cuyo cálculo arroja resultados que se aproximan, todo lo posible, al comportamiento real de la estructura.

La modelización o idealización que se adopta para una estructura supone una solución de compromiso entre diversos factores:

- Precisión deseada en el resultado
- Potencia de las herramientas de cálculo disponibles
- Tiempo de cálculo disponible

La precisión del resultado va asociada al proceso de decisiones a tomar en el dimensionamiento de la estructura. Si el resultado es muy grosero, será preciso adoptar planteamientos muy conservadores en el dimensionamiento para quedar del lado de la seguridad. Por el contrario, alcanzado un determinado nivel de precisión, no compensa incrementar la precisión del resultado, si las decisiones de dimensionamiento a las que conduce son las mismas. En cuanto a la potencia de las herramientas de cálculo, evidentemente las aspiraciones de modelización deben ser muy diferentes si se trabaja con cálculo estrictamente manual, regla de cálculo, calculadora u ordenador. Finalmente, los dos parámetros anteriores vienen condicionados por el tiempo de cálculo disponible para realizar el proyecto estructural, que queda limitado por los plazos de entrega. Conviene comentar, en este sentido, que el progresivo incremento de la potencia de las herramientas de cálculo, en muchos casos se ha invertido solamente en reducir los plazos de entrega y no en mejorar las modelizaciones utilizadas.

El objetivo es, por tanto, lograr los resultados más precisos posibles, en un tiempo razonable, en función de las herramientas de cálculo disponibles.

Si el proceso de cálculo ha de ser manual (entendiendo por tal el que se realiza hoy en día con calculadoras) la modelización debe ser necesariamente simplificada, pues de lo contrario será imposible alcanzar resultados prácticos en un tiempo razonable. Este tipo de cálculos suele estar plagado de modelos sencillos, lineales, isostáticos o hiperestáticos con un grado de hiperestaticidad muy reducido. A modo de ejemplo, en la Fig.1.a se muestra una clásica modelización de un pórtico de edificación de nudos rígidos, planteado como un conjunto de vigas continuas apoyadas sobre pilares. Dicha modelización puede abordarse manualmente en un tiempo razonable con el empleo de prontuarios. Una modelización clásica más compleja, considerando propiamente el pórtico de nudos rígidos (Fig.1.b), solo es abordable de forma manual (por ejemplo por el método de Cross) si el número de plantas y vanos es reducido, en caso contrario, la única solución viable es el empleo de otros métodos de cálculo, pero ya no manualmente, sino mediante el uso de ordenadores.

(a)

(b)

Fig.1. Modelización simplificada para cálculo manual

La aparición de los ordenadores y el progresivo incremento de su potencia de cálculo ha permitido el empleo de métodos de cálculo cada vez más complejos, hasta llegar al Método de Elementos Finitos (M.E.F.) que aproxima el viejo sueño de llegar a calcular los elementos estructurales con toda la complejidad de la estructura real (Cervenka, V., 2002). En la Fig.2 puede observarse una modelización por elementos finitos de un pórtico de edificación junto con su cimentación y el terreno que la recibe.

Fig.2. Modelización por elementos finitos

No obstante, a fecha de hoy, incluso con ordenadores muy potentes, una modelización por elementos finitos tan precisa como la representada en la Fig.2 (con elementos de pequeño tamaño, considerando todos los materiales implicados con sus correspondientes contactos y con programas informáticos de elementos finitos que aún deben mejorar su facilidad de manejo) puede llegar a suponer un tiempo de cálculo considerable y, por ello, es preciso seguir haciendo un ejercicio de racionalidad y encontrar el punto óptimo de equilibrio entre precisión en el resultado, tiempo de cálculo necesario para alcanzarla y repercusiones reales del incremento de la precisión sobre las decisiones de dimensionamiento del proyecto estructural.

Las modelizaciones empleadas en cada momento han de ir evolucionando al ritmo que se incrementa la potencia de las herramientas de cálculo. No tiene sentido seguir empleando modelizaciones de la época del cálculo estrictamente manual con ordenadores de última generación. El momento actual puede considerarse como un momento de transición. Los métodos clásicos o convencionales resultan hoy excesivamente simplificados y poco ajustados a la realidad, pero la alternativa del cálculo por elementos finitos todavía no es de aplicación práctica, de forma generalizada, en la vida cotidiana del ejercicio profesional del cálculo de estructuras. El pasado parece quedar muy atrás, pero el futuro todavía no ha llegado.

En este momento de transición, el empleo de modelizaciones por elementos finitos es perfectamente aplicable en el ámbito de la investigación y ello permite utilizar el método de elementos finitos, con todas sus posibilidades, para contrastar los métodos convencionales (llenos de simplificaciones) y deducir ajustes de los mismos que les acerquen más al comportamiento real de los elementos estructurales, optimizando así el dimensionamiento de éstos. Se trata de seguir disfrutando de la sencillez de los métodos tradicionales mejorando la precisión de sus resultados y su ajuste a la realidad, gracias a un proceso de investigación con elementos finitos, mientras llega el momento (tal vez no muy lejano) de trabajar directamente y de forma cómoda y práctica con modelos de elementos finitos en el ejercicio profesional cotidiano del cálculo de estructuras, momento que supondrá el abandonando definitivo de los métodos clásicos.

La presente tesis doctoral pretende realizar una aplicación concreta de este planteamiento. Se ha elegido como tema de estudio un caso de cimentaciones superficiales, las zapatas de medianería y esquina con viga centradora. La modelización de este tipo de cimentación por métodos convencionales presenta una serie de simplificaciones que permiten el cálculo de las mismas, por medios manuales, en un tiempo razonable, pero que claramente la alejan del comportamiento real de las mismas, con las consecuencias negativas que ello puede suponer en el dimensionamiento de estos elementos estructurales.

Constituye, por ello, un interesante ejemplo para un proceso de investigación, que desarrolla un contraste de los modelos convencionales de cálculo de cimentaciones de medianería y esquina, mediante un análisis alternativo con modelos de elementos finitos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto importantes discrepancias entre ambos métodos que conducen a importantes diferencias en el dimensionamiento de este tipo de cimentaciones. El empleo de los métodos tradicionales da lugar, por un lado, a un sobredimensionamiento de

la armadura de la viga centradora y, por otro, a un infradimensionamiento, tanto del canto de la viga centradora, como del tamaño de la zapata de medianería y del armado de la viga de la primera planta.

Asimismo, los resultados obtenidos evidencian el papel protagonista del giro de la zapata de medianería como elemento clave en el comportamiento de este tipo de cimentación y la necesidad de disponer de un suficiente canto en la viga centradora, como único recurso realmente eficaz para lograr la rigidización del conjunto del elemento estructural, como mecanismo para conseguir un correcto funcionamiento de las zapatas de medianería y esquina, limitando los giros excesivos de las mismas.

Finalmente, la tesis propone un nuevo método alternativo, de carácter convencional y, por tanto, aplicable a un cálculo manual, que permite obtener de forma sencilla los parámetros clave que regulan el comportamiento de las zapatas de medianería y esquina, conduciendo a un dimensionamiento más ajustado a las necesidades reales de este tipo de cimentación.

Todo ello constituye una aportación práctica de gran utilidad en el ejercicio profesional del cálculo de estructuras, ya que permite la optimización del dimensionamiento de un elemento estructural que se presenta habitualmente en los proyectos de edificación en ámbito urbano, donde el caso de las medianerías es muy frecuente.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis doctoral es la optimización de los actuales métodos de cálculo de zapatas de medianería y esquina, con el fin de lograr una optimización de los dimensionamientos obtenidos para las mismas con el empleo de los citados métodos.

Este objetivo general se desarrolla mediante los siguientes objetivos específicos:

- Contrastar los modelos convencionales de cálculo de cimentaciones superficiales de medianería y esquina, con un análisis alternativo realizado mediante modelos de elementos finitos, con el fin de poner de manifiesto las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos tipos de modelización.
- Identificar las variables que presentan mayor influencia sobre el comportamiento real de este tipo de cimentación.
- Proponer un nuevo método alternativo, de carácter convencional y, por tanto, aplicable a un cálculo manual, que permita obtener los parámetros clave que regulan el comportamiento de las zapatas de medianería y esquina y que conduzca, por tanto, a un dimensionamiento más ajustado a las necesidades reales de este tipo de cimentación.

1.3. ESQUEMA GENERAL DE LA TESIS

La presentación de este trabajo de investigación se ha organizado siguiendo el esquema clásico de una tesis doctoral, con 6 capítulos principales y 1 anejo, cuyo contenido se describe a continuación:

- **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentan la justificación de la tesis doctoral y los objetivos de la misma.

- **CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO**

En este capítulo se describe en primer lugar el concepto de zapata de medianería y zapata de esquina, indicando las soluciones más habitualmente empleadas para abordar la problemática que implican. A continuación, se analizan detalladamente los métodos de cálculo convencionales actualmente empleados para el cálculo y dimensionamiento de este tipo de cimentaciones. Finalmente, se realiza una valoración crítica de los citados modelos convencionales, identificando las principales simplificaciones que podrían ponerse en tela de juicio, así como las consecuencias que pueden suponer para el dimensionamiento de la cimentación.

- **CAPÍTULO 3. PLAN EXPERIMENTAL**

En este capítulo se define el plan de trabajo llevado a cabo en la fase experimental de la tesis doctoral. En primer lugar, se describen los pórticos tipo empleados en el proceso de investigación, así como las cargas contempladas en el estudio. A continuación se realiza un análisis del comportamiento real de las zapatas de medianería y esquina para seleccionar las variables que mayor influencia tienen sobre dicho comportamiento, que definen el conjunto de casos a ensayar. Por último, se describe el método experimental (virtual en este caso) empleado en el ensayo del conjunto de casos definido por las variables seleccionadas.

- **CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Dichos resultados se han organizado en una serie de tablas, en función de las variables analizadas y de forma independiente para los modelos convencionales, por un lado, y para los modelos de elementos finitos, tanto de las zapatas de medianería como las de esquina, por otro.

▪ CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se procede al análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Se aborda, en primer lugar, el estudio de los esfuerzos obtenidos en la viga centradora, especialmente el momento flector en la misma. A continuación, se analizan las distribuciones de tensiones de contacto obtenidas en los modelos de elementos finitos, incidiendo especialmente en la excentricidad de la resultante de las mismas, asociada al giro de las zapatas y analizando la influencia de las distintas variables estudiadas sobre dicha excentricidad. Seguidamente se estudia la colaboración portante de la viga centradora y su influencia sobre el comportamiento del conjunto del elemento de cimentación. Por último, se discuten los efectos que genera la cimentación sobre la viga de la primera planta. Concluido el análisis de resultados y, a partir de ellos, se propone una alternativa a los métodos convencionales tradicionales, con el fin de obtener resultados más ajustados al comportamiento real de la cimentación.

▪ CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen las conclusiones de la tesis doctoral, basadas en los objetivos que se habían marcado para el trabajo de investigación abordado y se plantean ciertas cuestiones de interés para futuras líneas de investigación.

▪ ANEJOS

Se incorporan dos anejos que incluyen los listados de programación de los modelos de elementos finitos empleados en la fase experimental virtual de la tesis doctoral.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1. ZAPATAS DE MEDIANERÍA Y ESQUINA. CONCEPTO Y TIPOLOGÍA

La zapata de medianería es un tipo de cimentación superficial o directa, que se presenta cuando el edificio proyectado se sitúa junto a alguno de los límites de la parcela disponible, ya sea medianería (límite con otra propiedad) o fachada (límite con la vía pública). En tal situación (Fig.3), al encontrarse los pilares extremos o de fachada tangentes al límite de la propiedad y no poder invadir con la cimentación terreno ajeno ni público, la correspondiente zapata quedará geométricamente desplazada respecto del eje del pilar y la reacción del terreno lógicamente descentrada. La zapata de esquina puede entenderse como un caso particular de la anterior, que se presenta en aquellos pilares de esquina en los que confluyen dos medianerías o límites de propiedad mutuamente perpendiculares.

Fig.3. Concepto de zapata de medianería y zapata de esquina

La solución de este caso como zapata aislada solamente es posible en edificios muy reducidos, de planta baja o, a lo sumo, baja más una. Debido a la excentricidad (e) del esfuerzo axial (N_m), si se proyectase una zapata aislada (Fig. 3), la distribución de tensiones de contacto con el terreno sería trapezoidal o incluso triangular, según los casos, produciendo un incremento de tensión hacia el borde de la zapata que recibe el pilar (con valor máximo

$\sigma_{\max}$ bajo dicho borde) y asientos diferenciales entre ambos extremos, con los consiguientes giros de la zapata y las consecuencias perjudiciales que ello puede acarrear. Si los esfuerzos transmitidos por el pilar son importantes (especialmente el esfuerzo axial N_m que aumenta considerablemente con el número de plantas), el volumen de zapata aislada necesario para equilibrar la cimentación y evitar los efectos negativos descritos resulta excesivo, por lo cual, el planteamiento de zapatas de medianería o esquina aisladas es inviable en la inmensa mayor parte de las estructuras de edificación habituales, siendo necesario recurrir a otro tipo de soluciones que se describen a continuación.

Fig.4. Soluciones más frecuentes para las de zapatas de medianería

Existe un amplio catálogo de posibles soluciones para el caso de la zapata de medianería (Calavera, J. 2000, Perepérez, B. 2005 y Rodríguez, J.M. 1982). De ellas, las más utilizadas habitualmente en estructuras de edificación son las que se recogen en la Fig.4.

La primera solución que se plantea (Fig.4.a), tal vez con diferencia la más empleada como solución al problema de la medianería, es la utilización de una viga centradora que conecta la zapata de medianería con la zapata del pilar interior más próximo. De esta manera, el

equilibrio de la zapata de medianería y el centrado de la respuesta del terreno se consigue gracias a la colaboración del pilar interior con su cimentación y al trabajo a flexión de la viga centradora. En caso de no disponer de un pilar interior a una distancia razonable, la misión del citado pilar interior con su cimentación puede ser desarrollada por un contrapeso. La modelización clásica considera un éxito completo en la misión de la viga centradora, que logra un centrado total de la reacción del terreno, con distribución de tensiones uniforme tanto en la zapata de medianería como en la interior. Este planteamiento presupone, por tanto, que la viga centradora logra evitar cualquier giro de la zapata de medianería y que el pilar puede, por ello, considerarse perfectamente empotrado en la cimentación, sin ningún incremento adicional de la flexión en el mismo debido al comportamiento de la cimentación. En este primer modelo, el protagonismo fundamental recae en la viga centradora, cuyo trabajo a flexión conduce frecuentemente a unas escuadrías y a unas cuantías de armado bastante considerables.

La segunda solución (Fig.4.b.), no tan empleada como la anterior, plantea la colaboración de la viga de la primera planta (o en su caso el forjado de la misma), trabajando como tirante a flexotracción. La fuerza de tracción en la viga de la primera planta (T) encuentra su equilibrio horizontal gracias al rozamiento entre la zapata y el terreno (F_r). Dicho par de fuerzas genera un momento estabilizador que equilibra al producido por la excentricidad del esfuerzo axial (N_{ms}) logrando centrar la reacción del terreno y dando lugar a una distribución de tensiones también uniforme. En este caso, la fuerza estabilizadora que resuelve el problema se introduce en la cabeza del pilar de la planta baja, por lo cual, esta solución implica un incremento en la flexión del pilar al encontrarse físicamente colocado en una posición intermedia entre el origen del problema y la solución del mismo.

En el caso de la zapata de esquina, como generalización tridimensional de la zapata de medianería, también son aplicables las dos soluciones indicadas, es decir, el empleo de vigas centradoras, por un lado, o la colaboración de la viga y el forjado de la primera planta trabajando a flexotracción, por otro.

En este caso, tal vez de forma más acentuada que en la zapata de medianería, la solución más ampliamente empleada es el uso de vigas centradoras, que conectan la zapata de esquina, habitualmente cuadrada, con las dos zapatas vecinas, previsiblemente dos zapatas de medianería, dada la confluencia de dos límites de la propiedad en la esquina. Al ser un problema tridimensional, la zapata de esquina presenta una doble excentricidad del pilar respecto de la zapata, que requiere una viga centradora por cada una de las dos direcciones implicadas.

Fig.5. Solución habitual para las zapatas de esquina

2.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA

La solución más frecuente al problema de la medianería es la utilización de una viga centradora que conecta la zapata de medianería con la zapata del pilar interior más próximo. De esta manera, el equilibrio de la zapata de medianería y el centrado de la respuesta del terreno se consigue gracias a la colaboración del pilar interior con su cimentación y al trabajo a flexión de la viga centradora (Fig.4.a).

En el cálculo y dimensionamiento de una zapata de medianería con viga centradora pueden distinguirse tres fases:

- Verificación del Estado Límite Último (E.L.U.) de Equilibrio
- Cálculo de esfuerzos en la viga centradora
- Armado de las zapatas y de la viga centradora

La presente tesis doctoral de investigación se centra en el estudio de las posibles modelizaciones de las zapatas de medianería y su influencia sobre los esfuerzos que se generan, tanto en el contacto zapata terreno, como en la viga centradora. Por ello, se van a abordar los contrastes de modelizaciones respecto de las dos primeras fases y no se va a entrar en los métodos de cálculo del armado, si bien se incidirá en las consecuencias que tienen sobre el armado de la viga centradora los esfuerzos obtenidos con las distintas modelizaciones.

2.2.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO

La verificación del E.L.U. de Equilibrio supone la comprobación de la estabilidad del conjunto del elemento de cimentación (zapata de medianería, zapata interior y viga centradora), que implica la ausencia global en la misma de giros y desplazamientos (tanto horizontales como verticales). En el caso de estructuras de edificación con varias plantas de forjados, los esfuerzos axiales transmitidos por los pilares a la cimentación suelen ser considerables y muy superiores a los momentos flectores y a los esfuerzos cortantes, por lo cual, las comprobaciones de ausencia de vuelco y de desplazamiento horizontal no suelen plantear ningún problema, siendo la comprobación relativa a los posibles desplazamientos verticales la que determina el tamaño de la cimentación. La comprobación de equilibrio en dirección vertical consiste, en esencia, en verificar que las tensiones de contacto transmitidas por la

cimentación al terreno sean inferiores a la tensión admisible de éste, para lo cual, han de disponerse unas zapatas de suficiente tamaño y adecuada proporción. Por tratarse de una comprobación geotécnica, la verificación de tensiones de contacto ha de realizarse a partir de las cargas con su valor de servicio o característico.

En la Fig.6 se muestra detalladamente la modelización convencional que permite el cálculo de la tensión transmitida al terreno. Se parte de un determinado predimensionamiento de las zapatas, de dimensiones $a_m \cdot b_m \cdot h$ para la de medianería y $a_i \cdot b_i \cdot h$ para la interior. La zapata de medianería suele disponerse de forma rectangular con lado menor a_m paralelo al plano principal de cargas, para reducir al máximo la excentricidad de la misma y la flexión en la viga centradora. Se predimensiona también la viga centradora, de dimensiones $a_c \cdot b_c \cdot h_c$. Dada la importante flexión que soporta la viga centradora, suele aprovecharse al máximo el canto de la cimentación, haciendo la viga centradora solamente con 50 mm menos de canto para facilitar el cruce de la ferralla en el encuentro entre las zapatas y la viga.

Las acciones incluyen, por un lado, los pesos propios de los elementos de cimentación y su entorno y, por otro lado, las cargas transmitidas por los pilares. Se ha considerado en la Fig.6 tanto el peso propio de ambas zapatas como el de la viga centradora (P_{zm} , P_{zi} , P_{vc}). Asimismo, se ha tenido en cuenta el peso de las tierras o soleras que gravitan sobre la cimentación (P_{sm} , P_{si} , P_{sc}) que incluyen, en su caso, las posibles sobrecargas de uso sobre la solera. Por lo que respecta a las cargas transmitidas por los pilares, se contemplan tanto el esfuerzo axial como el momento flector y el esfuerzo cortante de ambos pilares, calculados previamente a partir del análisis del pórtico en cuestión con la hipótesis de pilares perfectamente empotrados en la cimentación. Ciertos autores (Calavera, J. 2000, Rodríguez, J.M. 1982) plantean únicamente los esfuerzos axiales como carga transmitida por los pilares, argumentando que el valor de los momentos flectores y esfuerzos cortantes es reducido y, por tanto, despreciable. No obstante, la inclusión de dichos momentos y cortantes aumenta la precisión del modelo sin un incremento considerable en su complejidad.

Las cargas descritas se equilibran gracias a las tensiones que se generan en el contacto entre la cimentación y el terreno. Todos los autores que describen la modelización clásica de este tipo de cimentación (Calavera, J. 2000, Perepérez, B. 2005 y Rodríguez, J.M. 1982), coinciden en plantear una distribución de tensiones uniformemente repartida, tanto bajo la zapata de medianería como en la interior, considerando nula la tensión de contacto bajo la viga centradora. Como consecuencia de ello, el modelo clásico presente solamente dos incógnitas a resolver, las resultantes R_m y R_i de los diagramas uniformes de tensiones de contacto que, lógicamente, están aplicadas en el centro de las respectivas zapatas.

Fig.6. Zapata de medianería con viga centradora. Modelización convencional

Para la resolución de las dos incógnitas que presenta el modelo (R_m y R_i) es preciso plantear dos ecuaciones, que se obtienen de aplicar las condiciones de equilibrio estático de fuerzas en el eje vertical y de momentos, al sólido representado en la Fig.6, resultando las siguientes expresiones:

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_m + R_i - N_m - N_i - P_{zm} - P_{sm} - P_{vc} - P_{sc} - P_{zi} - P_{si} = 0 \quad (\text{ec.1})$$

$$\Sigma M_i = 0 \quad - N_m \cdot L + (R_m - P_{zm} - P_{sm}) \cdot L_m - (P_{vc} + P_{sc}) \cdot L_c - (V_m + V_i) \cdot h - M_m - M_i = 0 \quad (\text{ec.2})$$

Sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas cuya solución es:

$$R_m = N_m \cdot \frac{L}{L_m} + P_{zm} + P_{sm} + (P_{vc} + P_{sc}) \cdot \frac{L_c}{L_m} + (V_m + V_i) \cdot \frac{h}{L_m} + \frac{(M_m + M_i)}{L_m} \quad (\text{ec.3})$$

$$R_i = N_i - N_m \cdot \left(\frac{L}{L_m} - 1 \right) + P_{zi} + P_{si} + (P_{vc} + P_{sc}) \cdot \left(1 - \frac{L_c}{L_m} \right) - (V_m + V_i) \cdot \frac{h}{L_m} - \frac{(M_m + M_i)}{L_m} \quad (\text{ec.4})$$

Solución que pone de manifiesto que la reacción resultante para la zapata de medianería es superior a la que tendría si trabajase como zapata aislada, mientras que la correspondiente a la zapata interior es inferior.

Conocidas las reacciones R_m y R_i , las tensiones transmitidas al terreno por cada una de las zapatas serán:

$$\sigma_m = \frac{R_m}{a_m \cdot b_m} \quad \sigma_i = \frac{R_i}{a_i \cdot b_i} \quad (\text{ec.5})$$

La verificación de tensiones de contacto se cumplirá siempre y cuando:

$$\sigma_m \leq \sigma_{adm} \quad \sigma_i \leq \sigma_{adm} \quad (\text{ec.6})$$

En caso contrario será preciso incrementar la superficie de contacto entre la cimentación y el terreno, con el fin de reducir las tensiones transmitidas al suelo hasta que cumplan.

2.2.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA

Calculadas las tensiones transmitidas al terreno y determinado el tamaño de la cimentación, se procede al cálculo de esfuerzos internos o solicitaciones en la viga centradora, de cara al dimensionamiento y armado de la misma. En la Fig.7.(a) se representa el esquema de la cimentación como sólido libre, con las acciones y reacciones que actúan sobre ella. Por ser el cálculo y dimensionamiento del armado de la viga centradora una comprobación estructural,

las solicitaciones a emplear en dicho cálculo deberán estar mayoradas, con los correspondientes coeficientes de seguridad. Como notación se ha empleado el subíndice d para indicar que se trata de valores mayorados. Dado que la actual normativa EHE 08 plantea distintos valores del coeficiente de seguridad para las diferentes hipótesis de carga según sean permanentes o variables, habrá que recalcular las tensiones mayoradas aplicando, con las cargas mayoradas, el mismo procedimiento planteado en el apartado 2.2.1.

Fig.7. Cálculo de esfuerzos en la viga centradora

El cálculo de solicitaciones en la viga centradora implica un nuevo proceso de modelización que se representa en la Fig.7.(b). El modelo convencional asimila el conjunto formado por las dos zapatas y la viga centradora a una única viga que va de extremo a extremo de la cimentación y que se encuentra apoyada en la base de los respectivos pilares. Con este planteamiento se entiende el conjunto de la cimentación como un único elemento lineal, en el que se invierte el punto de vista acción - reacción, al considerar la respuesta del terreno como la carga y los esfuerzos en la base de los pilares como las reacciones.

Planteado el modelo de la forma indicada, se obtienen los diagramas de esfuerzos internos de la viga en cuestión, representados en la Fig.7.(c y d). Dado el reducido valor que presentan habitualmente los cortantes de los pilares, su efecto puede considerarse equilibrado directamente por el rozamiento entre la respectiva zapata y el terreno, por lo cual, los axiales en la viga centradora serán nulos o despreciables y la viga, en su conjunto, podrá considerarse como un elemento trabajando a flexión simple, solicitado solamente por esfuerzos cortantes y momentos flectores.

A la hora de calcular la armadura longitudinal de la viga centradora, es preciso tener en cuenta la distribución de momentos de la viga imaginaria conjunta y los cambios de sección reales que se producen a lo largo de la misma. Ciertamente el máximo momento suele producirse en una posición que se corresponde con la zapata de medianería, cuya sección transversal es considerablemente superior a la de la viga centradora. Por ello, la sección realmente más desfavorable es aquella que presenta mayor momento flector dentro de las que pertenecen propiamente a la viga centradora, lo cual se produce en la sección de contacto de la viga centradora con la zapata de medianería. A partir de los esquema de la Fig.7.(a y b) se deduce que el momento flector mayorado en dicha sección (M_{1vd}) viene dado por la expresión:

$$M_{1vd} = \left(\sigma_{md} - \gamma_{hod} \cdot h - \gamma_{sod} \cdot h_{so} \right) \cdot b_m \cdot \frac{a_m^2}{2} - N_{md} \cdot \left(a_m - \frac{a'_m}{2} \right) - V_{md} \cdot h - M_{md} \quad (ec.7)$$

Por su parte, para el esfuerzo cortante habrá que considerar el valor del mismo en dos secciones de referencia. La primera, al inicio propiamente dicho de la viga centradora en el contacto de ésta con la zapata de medianería (V_{1vd}) y, la segunda, al plantear el modelo el conjunto de la cimentación como un único elemento lineal, a un canto útil de la zapata de medianería medido a partir del borde del pilar de medianería (V_{2vd}). El valor de dichos esfuerzos cortantes será:

$$V_{1vd} = (\sigma_{md} - \gamma_{ho\ d} \cdot h - \gamma_{so\ d} \cdot h_{so}) \cdot b_m \cdot a_m - N_{md} \quad (ec.8)$$

$$V_{2vd} = (\sigma_{md} - \gamma_{ho\ d} \cdot h - \gamma_{so\ d} \cdot h_{so}) \cdot b_m \cdot (a'_m + d) - N_{md} \quad (ec.9)$$

De forma parecida a lo que ocurría con el momento flector, en muchos casos puede ser mayor el esfuerzo cortante V_{2vd} , pero al ser la sección transversal en dicho punto la de la zapata de medianería (de considerable tamaño) no suele demandar armadura transversal o, en su caso, la demanda de pequeña cuantía. Por ello, la sección realmente más desfavorable es la del inicio de la viga centradora, calculando con la propia sección de la viga centradora y el esfuerzo cortante V_{1vd} .

Es preciso llamar la atención, de manera especial, sobre la considerable escuadría que suele requerir la viga centradora y la elevada cuantía que resulta para la armadura de tracción situada en la cara superior de la misma, debido todo ello, al enorme momento flector que soporta dicha viga en su función de centrado, de acuerdo con el modelo convencional.

2.3. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE LA VIGA SUPERIOR

La segunda solución al problema de la medianería (Fig.4.b.), no tan empleada como la anterior, plantea la colaboración de la viga de la primera planta (o en su caso el forjado de la misma), trabajando como tirante a flexotracción. La fuerza de tracción en la viga de la primera planta encuentra su equilibrio horizontal gracias al rozamiento entre la zapata y el terreno. Dicho par de fuerzas genera un momento estabilizador que equilibra al producido por la excentricidad del esfuerzo axial y que logra centrar la reacción del terreno, dando lugar a una distribución de tensiones de contacto uniforme.

Al igual que en el caso de la zapata de medianería con viga centradora, cuando el equilibrio se logra gracias a la colaboración de la viga superior, el cálculo y dimensionamiento de los elementos estructurales implicados para por tres fases:

- Verificación del E.L.U. de Equilibrio
- Cálculo de esfuerzos en la viga superior y en el pilar
- Armado de la zapata, de la viga superior y del pilar

Tal y como ya se ha planteado en el apartado 2.2. es objeto de esta tesis doctoral el estudio de la influencia de las posibles modelizaciones sobre las dos primeras fases, por lo cual, no se abordan cuestiones relativas a métodos de cálculo de armado.

2.3.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO

La verificación del E.L.U. de Equilibrio implica la comprobación de la ausencia de giros y desplazamientos (tanto horizontales como verticales) de valor inadmisibles en la cimentación. En este segundo tipo de solución, debido a que la tracción de la viga superior se equilibra gracias al rozamiento entre la zapata y el terreno, además de la evidente comprobación de validez de las tensiones de contacto, resulta importante la comprobación de ausencia de desplazamientos horizontales o deslizamiento en el plano de contacto cimentación-suelo. Por lo que respecta a la comprobación de giro o vuelco, no suele ser decisiva en estructuras de edificación con sucesivas plantas de forjados que transmiten a la cimentación importantes esfuerzos axiales que se oponen al vuelco. Las comprobaciones en cuestión se realizan con cargas en valor de servicio o característico; la de tensiones de contacto por ser una comprobación geotécnica que incorpora el coeficiente de seguridad en el valor de la tensión admisible y la de deslizamiento porque introduce la seguridad en el término de comparación de la misma, tal y como se expone más adelante.

En la Fig.8 se representa el modelo convencional que permite calcular la distribución de tensiones transmitida al terreno, la fuerza de tracción adicional que se produce en la viga superior y la fuerza horizontal generada en la cara de contacto zapata-suelo para equilibrar a la anterior.

Se parte de un predimensionamiento de la zapata de medianería, de dimensiones $a_m \cdot b_m \cdot h$. Es recomendable disponer la menor dimensión en planta de la zapata (a_m) paralela al plano de las cargas, con el fin de reducir la excentricidad del esfuerzo axial del pilar respecto del centro de la zapata y, por tanto, el momento de desequilibrio que se genera en la medianería.

Por lo que respecta a las acciones (Fig.8), se consideran tanto los pesos de los distintos elementos implicados, como las acciones transmitidas por el pilar. Los pesos en cuestión son el peso propio de la zapata (P_{zm}), el del pilar (P_{pm}) y la carga permanente debida a las tierras o soleras que gravitan sobre la zapata (P_{sm}). Por su parte, han de tenerse en cuenta como acciones tanto el esfuerzo axial como el momento flector y el esfuerzo cortante recibidos por el pilar de medianería en su nudo superior (N_{ms} , M_{ms} , V_{ms}). Dichos esfuerzos se habrán obtenido previamente a partir del análisis del pórtico en cuestión (supuestamente también por métodos convencionales) bajo la hipótesis de pilares perfectamente empotrados en la cimentación.

Fig.8. Zapata de medianería con colaboración de la viga superior. Modelización convencional

Como respuesta a las acciones planteadas surgen las reacciones del modelo, constituidas por las presiones y el rozamiento en el contacto zapata-suelo, así como por la tracción en la viga superior actuando como tirante. El modelo convencional plantea una distribución de tensiones de contacto con el terreno uniformemente repartida, lo cual implica un éxito completo de la viga superior en su misión de equilibrado y centrado de la respuesta del terreno y una confirmación de la hipótesis de pilares perfectamente empotrados en la cimentación.

Como consecuencia de ello, el modelo clásico presente tres incógnitas a resolver, la resultante del diagrama uniforme de tensiones de contacto (R_{my}) aplicada en el centro de la cara inferior de la zapata de medianería, la reacción horizontal por rozamiento en la cara de contacto zapata suelo (R_{mx}) y la fuerza de tracción (T) generada en la viga superior para equilibrar los efectos de la excentricidad del esfuerzo axial del pilar de medianería. Para resolver estas tres incógnitas, es preciso plantear tres ecuaciones, que se obtienen de aplicar las condiciones de equilibrio estático de momentos y de fuerzas, tanto en el eje horizontal como vertical, al sólido representado en la Fig.7, resultando las siguientes expresiones:

$$\Sigma M_M = 0 \quad (T - V_{ms}) \cdot (H + h) + M_{ms} - (N_{ms} + N_{pm}) \cdot \left(\frac{a_m - a'_m}{2} \right) = 0 \quad (\text{ec.10})$$

$$\Rightarrow T = \frac{(N_{ms} + N_{pm}) \cdot \left(\frac{a_m - a'_m}{2} \right) - M_{ms}}{(H + h)} + V_{ms} = 0 \quad (\text{ec.11})$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad T - V_{ms} - R_{mx} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_{mx} = T - V_{ms} \quad (\text{ec.12})$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_{my} - N_{ms} - P_{pm} - P_{zm} - P_{sm} = 0 \quad (\text{ec.13})$$

$$\Rightarrow R_{my} = N_{ms} + P_{pm} + P_{zm} + P_{sm} \quad (\text{ec.14})$$

Conocida la reacción vertical R_{my} , la tensión transmitida al terreno por la zapata de medianería vendrá dada por:

$$\sigma_m = \frac{R_{my}}{a_m \cdot b_m} \quad (\text{ec.15})$$

La comprobación de tensiones de contacto del E.L.U. de Equilibrio se cumplirá siempre y cuando:

$$\sigma_m \leq \sigma_{adm} \quad (\text{ec.16})$$

En caso contrario será preciso incrementar la superficie de contacto entre la cimentación y el terreno, con el fin de reducir las tensiones transmitidas al suelo hasta que cumplan.

Por su parte, la comprobación de deslizamiento del E.L.U. de Equilibrio vendrá dada por la expresión:

$$\frac{F_{\text{Antideslizantes}}}{F_{\text{Deslizante}}} \geq 1,5 \quad \Rightarrow \quad \frac{F_{\text{Roz. Disponible}}}{F_{\text{Roz. Demandada}}} \geq 1,5 \quad \Rightarrow \quad \frac{\mu \cdot N}{R_{mx}} \geq 1,5 \quad (\text{ec.17})$$

Se cumplirá la comprobación de deslizamiento si la máxima fuerza de rozamiento que es capaz de proporcionar el suelo ($F_{\text{Roz. Disponible}}$) supera en un 50% a la fuerza de rozamiento demandada para lograr el equilibrio del sistema R_{mx} , siendo μ el coeficiente de rozamiento entre zapata y suelo y N el valor de la normal o fuerza con la que se comprimen ambas superficies. El valor 1,5 es el coeficiente de seguridad establecido por el Código Técnico de la Edificación (C.T.E.) en el DB SE - C. Expresando el coeficiente de rozamiento en función del ángulo de rozamiento interno del suelo (ϕ) y desarrollando el término de la normal, queda finalmente la comprobación de deslizamiento del siguiente modo:

$$\frac{\text{tg}\left(\frac{2}{3} \cdot \phi\right) \cdot (N_{ms} + P_{pm} + P_{zm} + P_{sm})}{R_{mx}} \geq 1,5 \quad (\text{ec.18})$$

En caso de no cumplirse la expresión anterior será preciso, o bien aumentar el tamaño de la cimentación con el fin de lograr mayor fuerza de rozamiento aumentando el peso, tanto de la zapata como de la tierra o solera que gravita sobre ella, o bien cambiar la proporción de la zapata disminuyendo la dimensión en el plano de las cargas con el fin de reducir la excentricidad del esfuerzo axial del pilar y la tracción T en la viga superior.

2.3.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LA VIGA Y EN EL PILAR

Si bien en este caso la cimentación propiamente dicha está integrada por un único elemento (la zapata de medianería), tanto el pilar de medianería de la planta baja como la viga superior desempeñan un papel protagonista en el modelo conjunto para estabilizar la zapata de medianería. La viga superior, actuando como tirante, es la encargada de desarrollar la fuerza de tracción que equilibra la excentricidad del esfuerzo axial del pilar, centrando la distribución de tensiones que se transmite al terreno (Fig.9). Por su parte, el pilar de medianería de la planta baja, al encontrarse físicamente en una posición intermedia entre el origen del problema (zapata de medianería) y la solución del mismo (viga superior), actúa como intermediario, transmitiendo mediante su trabajo a flexión, el efecto estabilizador de la viga superior. Por ello, en el cálculo del armado de la viga y del pilar deberán tenerse en cuenta tanto la tracción inducida en la viga como el incremento de momento flector en el pilar. Dichos esfuerzos han de calcularse mayorados, con los correspondientes coeficientes de seguridad.

Fig.9. Cálculo de esfuerzos en la viga y en el pilar

La viga superior combina, por tanto, la doble función de viga propiamente dicha y de tirante. Por ello, la armadura resultante de su habitual trabajo a flexión como viga, tendrá que incrementarse con una sección adicional, que le permita soportar la solicitación conjunta a flexotracción.

Por su parte el pilar, además de hacer frente a los esfuerzos correspondientes a su pertenencia al pórtico en cuestión, tendrá que soportar el momento flector originado por la tracción en la viga superior (Fig.9), que vendrá dado por:

$$M_d = T_d \cdot H \quad (\text{ec.19})$$

A pesar de que el momento en cuestión es de signo contrario al habitualmente generado por las cargas gravitatorias, el reducido valor de éste último hace que la combinación de ambos momentos suponga un considerable incremento neto de la magnitud de la flexión en el pilar.

2.4. ZAPATA DE ESQUINA CON DOS VIGAS CENTRADORAS

La solución más habitualmente empleada en el caso de las zapatas de esquina es el empleo de dos vigas centradoras que conectan la zapata de esquina con las dos zapatas más próximas (Fig. 5). Al confluir en la esquina dos medianerías o líneas de fachada, lo normal es que las dos zapatas auxiliares sean dos zapatas de medianería. El equilibrio de la zapata de esquina y el centrado de la respuesta del terreno se logra gracias a la colaboración de los pilares de medianería indicados junto con su cimentación y al trabajo a flexión de las dos vigas centradoras.

En el cálculo y dimensionamiento de una zapata de esquina con vigas centradoras pueden distinguirse tres fases:

- Verificación del E.L.U. de Equilibrio
- Cálculo de esfuerzos en las vigas centradoras
- Armado de las zapatas y de las vigas centradoras

Tal y como ya se ha indicado en los dos casos anteriores, el objetivo de la presente tesis doctoral es el estudio de las posibles modelizaciones sobre las dos primeras fases, por lo cual, no se abordan cuestiones relativas a métodos de cálculo de armado.

2.4.1. E.L.U. DE EQUILIBRIO

Tal y como se indicó para la zapata de medianería con viga centradora, en el caso de estructuras de edificación con varias plantas de forjados, los esfuerzos axiales transmitidos por los pilares a la cimentación suelen ser muy superiores a los momentos flectores y a los esfuerzos cortantes, por lo cual, es la verificación relativa al equilibrio vertical la que determina el tamaño de la cimentación. La comprobación de equilibrio en dirección vertical (estado límite último de hundimiento) consiste en verificar que las tensiones de contacto transmitidas por la cimentación al terreno sean inferiores a la tensión admisible de éste, para lo cual, han de disponerse unas zapatas de suficiente tamaño y adecuada proporción. Por tratarse de una comprobación geotécnica, la verificación de tensiones de contacto se realiza a partir de las cargas con su valor de servicio o característico.

El estudio en profundidad del caso de una zapata de esquina equilibrada gracias a la colaboración de dos zapatas de medianería auxiliares, mediante las correspondientes vigas centradoras, es realmente complejo. Al desequilibrio de la zapata de esquina por la doble excentricidad respecto de su pilar se le añade, a su vez, el desequilibrio de las dos zapatas de medianería auxiliares, que requieren la colaboración de un cuarto pilar interior mediante

otras dos vigas centradoras (Fig.10). Se genera así un conjunto de cimentación integrado por cuatro pilares y cuatro vigas centradoras.

Fig.10. Esquema de la cimentación en el entorno de una zapata de esquina

Los autores que describen la modelización clásica de este tipo de cimentación (Calavera, J. 2000, Perepérez, B. 2005), plantean la separación, por superposición, de los dos problemas implicados en la Fig.10, estudiando, por un lado, la zapata de esquina con sus dos vigas centradoras y, por otro lado, de forma independiente, las zapatas de medianería equilibradas con la cuarta zapata interior. De este modo, el equilibrio de las zapatas de medianería es responsabilidad exclusiva de la cuarta zapata interior y su viga centradora, sin ninguna participación por torsión de las vigas centradoras de la zapata de esquina (Fig.11).

En las Fig. 11 y 12 se muestra detalladamente la modelización convencional de la zapata de esquina y sus vigas centradoras. Se parte de un predimensionamiento de las zapatas, de dimensiones $a_e \cdot b_e \cdot h$ para la de esquina y $a_{m1} \cdot b_{m1} \cdot h$ y $a_{m2} \cdot b_{m2} \cdot h$ para las dos zapatas de medianería auxiliares. Al presentar dos excentricidades con magnitudes habitualmente similares en ambas direcciones, la zapata de medianería suele disponerse de forma cuadrada, mientras que las dos zapatas de medianería suelen proyectarse de forma rectangular con lado menor perpendicular a la alineación medianera, para reducir al máximo la excentricidad de la misma. Se predimensionan también las dos vigas centradoras, de dimensiones $b_{c1} \cdot a_{c1} \cdot h_c$ y $a_{c2} \cdot b_{c2} \cdot h_c$ respectivamente. Dada la importante flexión que soporta la viga centradora, suele aprovecharse al máximo el canto de la cimentación, haciendo la viga centradora solamente con 50 mm menos de canto para facilitar el cruce de la ferralla en el encuentro entre las zapatas y las vigas.

Fig.11. Zapata de esquina con vigas centradoras. Modelización convencional

Las acciones incluyen, por un lado, los pesos propios de los elementos de cimentación y, por otro, las cargas transmitidas por los pilares. Se ha considerado en la Fig.12, el peso propio de la zapata de esquina (P_{ze}) y el de las dos vigas centradoras (P_{vc1} , P_{vc2}). Asimismo, se ha tenido en cuenta el peso de las tierras o soleras que gravitan sobre la cimentación (P_{se} , P_{sc1} , P_{sc2}) que incluyen, en su caso, las posibles sobrecargas de uso sobre la solera. Por lo que respecta a la carga transmitida por el pilar de esquina, se contemplan tanto el esfuerzo axial como los momentos flectores y los esfuerzos cortantes en las dos direcciones consideradas (análisis tridimensional), calculados previamente a partir del estudio del pórtico en cuestión con la hipótesis de pilares perfectamente empotrados en la cimentación.

Fig.12. Zapata de esquina con vigas centradoras. Acciones y reacciones

Para independizar el problema del propio equilibrio de las zapatas de medianería auxiliares, no se ha considerado, ni el peso de las mismas, ni la resultante de sus tensiones de contacto con el terreno, ya que dichas fuerzas quedarían excéntricas respecto de su pilar y obligarían a la zapata de esquina y a la otra zapata de medianería a hacerse responsables de contrarrestar el desequilibrio que generan, mediante el trabajo a torsión de la viga centradora de esquina más próxima. Solamente se consideran en los pilares de medianería los momentos y cortantes orientados según los planos que contienen a las dos vigas centradoras de esquina, junto con las fuerzas R_{m1} y R_{m2} , aplicadas en el eje de los pilares de medianería, que permiten evaluar el efecto estabilizador que las zapatas de medianería auxiliares ejercen sobre la zapata de esquina. Dichas fuerzas R_{m1} y R_{m2} suponen un efecto de levantamiento sobre las zapatas de medianería que deberá tenerse en cuenta al estudiar el equilibrio de dichas zapatas de medianería junto con la cuarta zapata interior.

Las cargas descritas se equilibran gracias a las tensiones que se generan en el contacto entre la zapata de esquina y el terreno. En el modelo convencional se plantea una distribución de tensiones uniformemente repartida, considerando nula la tensión de contacto bajo las dos vigas centradoras. Como consecuencia de ello, el modelo clásico presente solamente tres incógnitas a resolver (Fig. 12), la resultante R_e del diagrama uniforme de tensiones de contacto de la zapata de esquina aplicada en el centro de la misma y las fuerzas R_{m1} y R_{m2} , que evalúan el efecto estabilizador de las zapatas de medianería auxiliares sobre la zapata de esquina

Para la resolución de la tres incógnitas que presenta el modelo (R_e , R_{m1} y R_{m2}) es preciso plantear tres ecuaciones, que se obtienen de aplicar, al sólido representado en la Fig. 12, las condiciones de equilibrio estático de fuerzas en el eje vertical y equilibrio estático de momentos respecto de dos ejes. Como ejes de referencia para el equilibrio de momentos se han adoptado dos ejes, paralelos respectivamente a los ejes x e y , que pasan por los centros de gravedad de las correspondientes zapatas de medianería, a los que se ha denominado ejes $m1x$ y $m2y$.

Las ecuaciones de equilibrio estático indicadas responden a las siguientes expresiones:

$$\Sigma F_z = 0 \quad R_e - R_{m1} - R_{m2} - N_e - P_{ze} - P_{se} - P_{vc1} - P_{sc1} - P_{vc2} - P_{sc2} = 0 \quad (\text{ec.20})$$

$$\Sigma M_{m1x} = 0 \quad N_e \cdot L_{ey} + (P_{ze} + P_{se} - R_e) \cdot L_{zey} + R_{m2} \cdot L_{zm2y} + (P_{vc1} + P_{sc1}) \cdot L_{c1y} + (P_{vc2} + P_{sc2}) \cdot L_{c2y} + (V_{ey} + V_{m1y}) \cdot h + M_{ex} + M_{m1x} = 0 \quad (\text{ec.21})$$

$$\Sigma M_{m2y} = 0 \quad N_e \cdot L_{ex} + (P_{ze} + P_{se} - R_e) \cdot L_{zex} + R_{m1} \cdot L_{zm1x} + (P_{vc1} + P_{sc1}) \cdot L_{c1x} + (P_{vc2} + P_{sc2}) \cdot L_{c2x} + (V_{ex} + V_{m2x}) \cdot h + M_{ey} + M_{m2y} = 0 \quad (\text{ec.22})$$

Resuelto el sistema de ecuaciones y obtenidas las tres reacciones incógnita R_e , R_{m1} y R_{m2} , la tensión de contacto transmitida al terreno por la zapatas de esquina será:

$$\sigma_e = \frac{R_e}{a_e \cdot b_e} \quad (\text{ec.23})$$

La verificación de tensiones de contacto se cumplirá siempre y cuando:

$$\sigma_e \leq \sigma_{adm} \quad (\text{ec.24})$$

En caso contrario será preciso incrementar la superficie de contacto entre la cimentación y el terreno, con el fin de reducir las tensiones transmitidas al suelo hasta que cumplan.

2.4.2. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LAS VIGAS CENTRADORAS

Determinado el tamaño de la cimentación, se procede al cálculo de esfuerzos internos en las dos vigas centradoras, de cara al dimensionamiento del armado de las mismas. En las Fig. 13 y 14 se representan los esquemas de cálculo de las vigas centradoras 1 y 2 respectivamente. Es preciso indicar, que los esquemas de sólido libre de las vigas centradoras representados en las Fig.13 y 14, son esquemas bidimensionales obtenidos a partir del esquema tridimensional completo del conjunto de la cimentación de esquina junto con las dos zapatas de medianería auxiliares (Fig. 12). La superposición de los dos esquemas bidimensionales indicados debe dar lugar al esquema tridimensional original sin duplicidad de acciones ni reacciones en el pilar y zapata de esquina. Por ello, en cada uno de los esquemas dibujados en las Fig. 13 y 14 debe representarse solamente la fracción de las acciones y reacciones de la zapata de esquina correspondiente al esquema en cuestión.

VIGA CENTRADORA 1

Comienza el cálculo por la viga centradora 1 que conecta la zapata de esquina con la zapata de medianería 1 (Fig. 13). Por ser el cálculo del armado una comprobación estructural, las solicitaciones a emplear en dicho cálculo deben estar mayoradas, con los correspondientes coeficientes de seguridad establecidos por la EHE 08.

Las acciones y reacciones, tanto de la zapata de medianería 1 como de la viga centradora 1, son las acciones y reacciones íntegras correspondientes a dichos elementos (Fig.13.(a)). En cambio al pilar y la zapata de esquina se le asigna únicamente la fracción de las acciones y reacciones correspondiente al plano bidimensional de la viga centradora 1. Los vectores que forman parte de dicha fracción de acciones y reacciones se identifican con la notación (e -1).

El valor de la fracción de acciones y reacciones a asignar al pilar y la zapata de esquina es, a priori, desconocido. Ahora bien, dicho valor ha de ser compatible con los resultados obtenidos para la zapata de medianería 1 a partir del esquema tridimensional conjunto (Fig.12). Por ello, dicho valor debe ser aquel que permita el cumplimiento de las ecuaciones de equilibrio estático del esquema bidimensional de la Fig.13:

$$\sum F_z = 0 \quad \left(R_{(e-1)d} - P_{z(e-1)d} - P_{s(e-1)d} \right) - \left(P_{vc1d} + P_{sc1d} \right) - R_{m1d} - N_{(e-1)d} = 0 \quad (\text{ec.25})$$

$$\sum M_{m1} = 0 \quad N_{(e-1)d} \cdot L_{ey} + \left(P_{vc1d} + P_{sc1d} \right) \cdot L_{c1y} - \left(R_{(e-1)d} - P_{z(e-1)d} - P_{s(e-1)d} \right) \cdot L_{zey} + \left(V_{eyd} + V_{m1yd} \right) \cdot h + M_{exd} + M_{m1xd} = 0 \quad (\text{ec.26})$$

Fig.13. Cálculo de esfuerzos en la viga centradora 1

Denominando reacción reducida de la zapata de esquina $R'_{(e-1)d}$ al valor obtenido al descontar a la reacción del terreno los pesos, tanto de la zapata como de la solera (Fig.13.(b), dicha reacción reducida vendrá dada por la expresión:

$$R'_{(e-1)d} = R_{(e-1)d} - P_{z(e-1)d} - P_{s(e-1)d} \quad (\text{ec.27})$$

Finalmente, sustituyendo la expresión de la reacción efectiva en las ec. 25 y 26, se obtiene la expresión simplificada de las mismas, que queda del siguiente modo:

$$\Sigma F_z = 0 \quad R'_{(e-1)d} - (P_{vc1d} + P_{sc1d}) - R_{m1d} - N_{(e-1)d} = 0 \quad (\text{ec.28})$$

$$\Sigma M_{m1} = 0 \quad N_{(e-1)d} \cdot L_{ey} + (P_{vc1d} + P_{sc1d}) \cdot L_{c1y} - R'_{(e-1)d} \cdot L_{zey} + (V_{eyd} + V_{m1yd}) \cdot h + M_{exd} + M_{m1xd} = 0 \quad (\text{ec.29})$$

Sistema de dos ecuaciones que permite resolver las dos incógnitas, $R'_{(e-1)d}$ y $N_{(e-1)d}$ del modelo bidimensional de la viga centradora 1.

Conocida la reacción reducida $R'_{(e-1)d}$ la tensión reducida $\sigma'_{(e-1)d}$ que debe ser tenida en cuenta para el cálculo estructural de la cimentación vendrá dada por la expresión:

$$\sigma'_{(e-1)d} = \frac{R'_{(e-1)d}}{a_e \cdot b_e} \quad (\text{ec.30})$$

Al igual que se indicó en el apartado 2.2.2. para la zapata de medianería, también en el caso de la zapata de esquina, la modelización convencional aborda cada uno de los esquemas bidimensionales de la misma asimilándolos a un único elemento lineal conjunto, solicitado fundamentalmente a flexión simple, con axiles despreciables. En la Fig.13.(c) y (d) se ofrecen los diagramas de momentos y cortantes correspondientes al elemento lineal conjunto equivalente.

Dichos diagramas muestran que los esfuerzos máximos se producen en el interior de la zapata de esquina. Ahora bien, dado que la sección transversal de la zapata es muy superior a la de la viga centradora, debe considerarse como sección más desfavorable para el dimensionamiento de la viga centradora, la sección de contacto de la viga con la zapata. De acuerdo con los esquemas de la Fig.13, los esfuerzos (momento y cortante) en la citada sección vendrán dados por:

$$M_{1c1d} = \sigma'_{(e-1)d} \cdot a_e \cdot \frac{b_e^2}{2} - N_{(e-1)d} \cdot \left(b_e - \frac{b'_e}{2} \right) - V_{eyd} \cdot h - M_{exd} \quad (\text{ec.31})$$

$$V_{1c1d} = \sigma'_{(e-1)d} \cdot a_e \cdot b_e - N_{(e-1)d} \quad (\text{ec.32})$$

VIGA CENTRADORA 2

Por lo que respecta a la viga centradora 2, se muestra en la Fig.14 el esquema de cálculo de la misma junto con la zapata de esquina y la zapata de medianería 2. Las acciones y reacciones, tanto de la zapata de medianería 2 como de la viga centradora 2, son las acciones y reacciones íntegras correspondientes a dichos elementos (Fig.14.(a)). En cambio al pilar y la zapata de esquina se le asigna únicamente la fracción de las acciones y reacciones correspondiente al plano bidimensional de la viga centradora 2. Los vectores que forman parte de dicha fracción de acciones y reacciones se identifican con la notación (e - 2).

El valor de la fracción de acciones y reacciones a asignar al pilar y la zapata de esquina es, a priori, desconocido. Ahora bien, dicho valor ha de ser compatible con los resultados obtenidos para la zapata de medianería 2 a partir del esquema tridimensional conjunto (Fig.12). Por ello, dicho valor debe ser aquel que permita el cumplimiento de las ecuaciones de equilibrio estático del esquema bidimensional de la Fig.14:

$$\Sigma F_z = 0 \quad (R_{(e-2)d} - P_{z(e-2)d} - P_{s(e-2)d}) - (P_{vc2d} + P_{sc2d}) - R_{m2d} - N_{(e-2)d} = 0 \quad (ec.33)$$

$$\Sigma M_{m2} = 0 \quad N_{(e-2)d} \cdot L_{ex} + (P_{vc2d} + P_{sc2d}) \cdot L_{c2x} + (V_{exd} + V_{m2xd}) \cdot h + M_{eyd} + M_{m2yd} - (R_{(e-2)d} - P_{z(e-2)d} - P_{s(e-2)d}) \cdot L_{zex} = 0 \quad (ec.34)$$

Denominando reacción reducida de la zapata de esquina $R'_{(e-2)d}$ al valor obtenido al descontar a la reacción del terreno los pesos, tanto de la zapata como de la solera (Fig.13.(b)), dicha reacción reducida vendrá dada por la expresión:

$$R'_{(e-2)d} = R_{(e-2)d} - P_{z(e-2)d} - P_{s(e-2)d} \quad (ec.35)$$

Finalmente, sustituyendo la expresión de la reacción efectiva en las ec. 25 y 26, se obtiene la expresión simplificada de las mismas, que queda del siguiente modo:

$$\Sigma F_z = 0 \quad R'_{(e-2)d} - (P_{vc2d} + P_{sc2d}) + R_{m2d} - N_{(e-2)d} = 0 \quad (ec.36)$$

$$\Sigma M_{m1} = 0 \quad N_{(e-2)d} \cdot L_{ex} + (P_{vc2d} + P_{sc2d}) \cdot L_{c2x} - R'_{(e-2)d} \cdot L_{zex} + (V_{exd} + V_{m2xd}) \cdot h + M_{eyd} + M_{m2yd} = 0 \quad (ec.37)$$

Sistema de dos ecuaciones que permite resolver las dos incógnitas, $R'_{(e-2)d}$ y $N_{(e-2)d}$ del modelo bidimensional de la viga centradora 2.

Fig.14. Cálculo de esfuerzos en la viga centradora 2

Conocida la reacción reducida $R'_{(e-2)d}$ la tensión reducida $\sigma'_{(e-2)d}$ que debe ser tomada en cuenta para el cálculo estructural de la cimentación vendrá dada por la expresión:

$$\sigma'_{(e-2)d} = \frac{R'_{(e-2)d}}{a_e \cdot b_e} \quad (\text{ec.38})$$

Tal y como se hizo para la viga centradora 1, en la Fig.14.(c) y (d) se ofrecen los diagramas de momentos y cortantes correspondientes al elemento lineal conjunto equivalente a la viga centradora 2. De igual manera, dichos diagramas muestran que los esfuerzos máximos se producen en el interior de la zapata de esquina, si bien, debido a que la sección transversal de la zapata es muy superior a la de la viga centradora, debe considerarse como sección más desfavorable para el dimensionamiento de la viga centradora, la sección de contacto de la viga con la zapata. De acuerdo con los esquemas de la Fig.14, los esfuerzos (momento y cortante) en la citada sección vendrán dados por:

$$M_{1c2d} = \sigma'_{(e-2)d} \cdot b_e \cdot \frac{a_e^2}{2} - N_{(e-2)d} \cdot \left(a_e - \frac{a'_e}{2} \right) - V_{\text{exd}} \cdot h - M_{\text{eyd}} \quad (\text{ec.39})$$

$$V_{1c2d} = \sigma'_{(e-2)d} \cdot b_e \cdot a_e - N_{(e-2)d} \quad (\text{ec.40})$$

2.5. VALORACIÓN CRÍTICA DE LOS MODELOS CONVENCIONALES

Los modelos convencionales descritos para el cálculo de cimentaciones directas de medianería y esquina, plantean una serie de simplificaciones respecto de los modelos reales ideales. Dichas simplificaciones tienen la ventaja de permitir el cálculo de las citadas cimentaciones, por medios manuales, en un tiempo razonable pero, como toda simplificación, presentan el inconveniente de alejarse del comportamiento real de la cimentación, conduciendo a decisiones de dimensionamiento no ajustadas a la realidad. En esta línea, es preciso incidir sobre la idea de que no tiene sentido luchar por un incremento en la precisión del cálculo si realmente dicho aumento de precisión no conduce a decisiones de dimensionamiento diferentes, por lo cual, es necesario analizar sólo aquellas cuestiones que conduzcan a cambios significativos.

Fig.15. Valoración crítica de los modelos convencionales

Las principales simplificaciones de los modelos convencionales que podrían ponerse en tela de juicio, por las posibles consecuencias que suponen para el dimensionamiento de la cimentación, son las siguientes:

- No integración en un modelo único de la interacción suelo - cimiento - estructura
- Independencia de los modelos de viga centradora y tirante
- Simplificación de las cargas transmitidas por los pilares
- Modelización del conjunto zapata de medianería - viga centradora - zapata interior como un único elemento lineal global
- Consideración de diagramas de distribución de tensiones de contacto uniformemente repartidos bajo las zapatas
- Ausencia de interacción con el terreno bajo las vigas centradoras
- No consideración del pilar interior ni de las vigas centradoras de las zapatas de medianería auxiliares de la zapata de esquina

NO INTEGRACIÓN EN UN MODELO ÚNICO DE LA INTERACCIÓN SUELO - CIMIENTO - ESTRUCTURA

Los modelos convencionales abordan el cálculo de los diferentes elementos estructurales de un edificio separándolos en tres partes claramente diferenciadas:

- Por un lado, se considera la parte aérea de la estructura (el pórtico) realizando un cálculo del mismo (por método matricial o método de Cross) para obtener las reacciones en la base de los pilares como dato de carga para la cimentación.
- Por otro lado, se considera la cimentación como elemento estructural aislado que recibe la carga del pórtico por medio de sus pilares y la respuesta del terreno para equilibrarla.
- Por último aparece el suelo que, por medio de las tensiones de contacto, recibe finalmente la carga como último eslabón de esta cadena de transmisión.

La consideración de estos tres elementos en modelos separados, obliga a introducir las correspondientes condiciones de contorno en las fronteras entre ellos. Así, en la base de los pilares se presupone empotramiento perfecto, con ausencia de giro, que conduce también a la hipótesis de distribución de tensiones de contacto uniformemente repartida. Estas condiciones de contorno son unas hipótesis simplificadoras, que facilitan el cálculo pero desvirtúan la realidad.

La creación de un modelo de cálculo único, que considerase simultáneamente la interacción pórtico - cimentación - suelo, permitiría un estudio más real del comportamiento de estos tres elementos estructurales en las fronteras entre unos y otros, pero hay que comprender que un modelo de tal calibre resultaría inviable en un cálculo manual.

INDEPENDENCIA DE LOS DOS MODELOS DE VIGA CENTRADORA Y TIRANTE

Continuando con la línea introducida en el punto anterior, cabe preguntarse, si es posible el funcionamiento independiente de los modelos de viga centradora y tirantes o, por el contrario, se dan simultáneamente. Ciertamente es posible construir cimentaciones de medianería sin viga centradora y con equilibrio gracias a la colaboración de la viga superior, sin embargo, no es posible plantear en la práctica el modelo de viga centradora en estado puro (equilibrio con viga centradora pero sin colaboración de la viga superior). Se quiera o no se quiera, la viga superior existe y, cuando se emplea viga centradora también trabaja simultáneamente la viga de la primera planta. Ello trae como consecuencia un posible dimensionamiento por exceso de la viga centradora y un dimensionamiento por defecto de la viga superior. Esto es debido a que cuando se trabaja con el modelo de tirante se tiene muy presente que hay que incrementar la armadura de la viga superior debido a su trabajo a flexotracción, pero cuando se trabaja con el modelo de viga centradora se suele ignorar que la viga superior sigue funcionando como tirante aunque no figure en el modelo y, por ello, se infradimensiona su armadura.

La crítica es por tanto evidente: el modelo de viga centradora no existe en estado puro. Cuando se emplea viga centradora siempre se produce una combinación de ambos modelos. El motivo por el que los modelos convencionales no contemplan esta cuestión parece bastante claro. Los modelos convencionales buscan, sobre todo, soluciones isostáticas, que puedan ser resueltas manualmente en un tiempo reducido. Si además de la viga centradora, se considera la intervención de la viga superior trabajando como tirante, se plantearía un esquema hiperestático de más compleja solución.

SIMPLIFICACIÓN DE LAS CARGAS TRANSMITIDAS POR LOS PILARES

Es frecuente en muchos autores, la consideración únicamente de los axiles transmitidos por los pilares, ignorando los posibles momentos y cortantes que se producen en la base de éstos. El argumento planteado, totalmente válido, es que la magnitud de dichos esfuerzos suele ser muy reducida y, por tanto, despreciable frente al efecto producido por los axiles.

Puede intuirse un segundo motivo, normalmente no explicitado. Cuando se crearon estos modelos, la potencia de las herramientas de cálculo disponibles era reducida y calcular la distribución de momentos en un pórtico de tamaño medio resultaba muy complejo, frente a la sencillez de la evaluación de los axiles transmitidos por los pilares. Ello, evidentemente unido al reducido valor de dichos esfuerzos, invitaba aún más a despreciarlos. Hoy por hoy, si se dispone de herramientas para calcular cómodamente los esfuerzos en el pórtico, no tiene mucho sentido ignorar los citados esfuerzos, teniendo en cuenta además, que su inclusión en el modelo convencional no supone un incremento considerable en el tiempo de cálculo.

MODELIZACIÓN DEL CONJUNTO DE LA CIMENTACIÓN COMO ELEMENTO LINEAL

Cuando se utiliza viga centradora se plantea que el conjunto de la cimentación (zapata de medianería - viga centradora - zapata interior) constituye un único elemento lineal tipo viga, que recibe como cargas las de contacto con el terreno y que se apoya en los dos pilares que arrancan en las citadas zapatas (Fig.15.(a)). El planteamiento es sumamente sencillo y simplifica considerablemente el cálculo de esfuerzos en el conjunto, pero resulta evidente su alejamiento de la realidad, ya que se ignoran por completo las zonas de discontinuidad que se producen entre la viga centradora y las dos zapatas y se obvia el hecho de que las zapatas en cuestión no tienen nada de elemento lineal.

DIAGRAMAS DE TENSIONES UNIFORMEMENTE REPARTIDOS

Posiblemente, una de las cuestiones más discutibles de los modelos convencionales sea la utilización de diagramas de tensiones uniformemente repartidos en el contacto entre las zapatas y el terreno (Fig.15). Dicho planteamiento supone la total ausencia de giro en las zapatas de cimentación y la condición de empotramiento perfecto en la base de los pilares y en el arranque de la viga centradora. Cualquier análisis que se haga al respecto conduce rápidamente a la sospecha de lo alejado que se encuentra dicha hipótesis de la realidad. El motivo de la utilización de tal simplificación es obvio. Al hacerlo, cada zapata aporta una única incógnita, el valor de la resultante centrada del diagrama de tensiones, con lo cual, todos los modelos convencionales se convierten en modelos isostáticos de fácil aplicación.

Algunos autores (Calavera, J. 2000), desarrollan una variante del modelo de tirante con distribución de tensiones variable trapezoidal en la cara de contacto entre la cimentación y el terreno (Fig.16). Dicho planteamiento se ajusta más a la realidad pero convierte el esquema

de cálculo en hiperestático, debiendo recurrir para su solución, al estudio de la compatibilidad de deformaciones entre el terreno, la zapata de medianería y el arranque del pilar.

Fig.16. Zapata de medianería con colaboración de la viga superior y diagrama trapecial

Ninguno de los autores consultados hace un planteamiento similar en el caso de la zapata de medianería con viga centradora, ya que ello implicaría un mayor grado de hiperestaticidad, al contar con dos zapatas con distribución trapecial conectadas por una viga centradora. La solución de dicho modelo requeriría contemplar una múltiple compatibilidad de deformaciones entre varios elementos: el terreno, dos zapatas, una viga centradora y dos pilares, lo cual complicaría considerablemente el proceso de cálculo.

AUSENCIA DE INTERACCIÓN CON EL TERRENO BAJO LA VIGA CENTRADORA

Ninguno de los autores consultados plantea distribución de tensiones de contacto entre la viga centradora y el terreno bajo la misma. Dicha hipótesis simplificadora se apoya, por un lado, en la idea de que la magnitud de la viga centradora es despreciable en planta frente al tamaño de las zapatas y, por otro, en el hecho de que la flexión negativa en la viga centradora tiende, con su curvatura, a despegarla del terreno, eliminando el contacto con éste. Siendo lógicos los dos argumentos citados, vuelve a intuirse la idea de que la consideración de la tensión de contacto entre la viga centradora y el terreno convertiría el esquema de cálculo en hiperestático y complicaría, de nuevo, la resolución del mismo.

NO CONSIDERACIÓN DEL PILAR INTERIOR NI DE LAS VIGAS CENTRADORAS DE LAS ZAPATAS DE MEDIANERÍA AUXILIARES DE LA ZAPATA DE ESQUINA

El modelo convencional para la zapata de esquina plantea el centrado de la respuesta del terreno bajo la zapata de esquina mediante el empleo de dos vigas centradoras que la conectan con las dos zapatas más próximas que se encuentran a su alrededor (Fig.5). Debido a la confluencia de una doble medianería o doble alineación de fachada en la zapata de esquina, las dos zapatas auxiliares deben ser, por lógica, zapatas de medianería, que requerirían ser estabilizadas mediante otras dos vigas centradoras conectadas a un cuarto pilar con su cimentación, esta vez interior (Fig.10).

El modelo convencional para la zapata de esquina (Fig.5, 10, 11 y 12) no contempla para nada la interacción ni del cuarto pilar ni de las dos últimas vigas centradoras que estabilizan a las zapatas de medianería planteando, por superposición, la total independencia de la zapata de esquina del problema de excentricidad de las zapatas de medianería, que no le transmiten ningún esfuerzo por este motivo. Nuevamente el asunto remite a la complejidad del proceso de cálculo. La puesta en escena del cuarto pilar interior con su cimentación introduciría una cuarta reacción incógnita en el cálculo, que convertiría el sistema en esquema hiperestático difícil de abordar.

CAPÍTULO 3

PLAN EXPERIMENTAL

3. PLAN EXPERIMENTAL

3.1. PLANTEAMIENTO GENERAL. DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente tesis doctoral plantea una etapa experimental inicial (de carácter virtual), seguida por un proceso de análisis e interpretación de resultados.

La etapa experimental supone la ejecución de las siguientes fases:

- Definición de los pórticos tipo objeto de estudio, así como de las cargas o acciones a considerar sobre los mismos.
- Selección de variables y definición de los casos objeto de estudio.
- Cálculo del catálogo de casos resultantes, tanto por métodos convencionales como por elementos finitos.

Posteriormente, finalizado el cálculo de todos los casos de la fase experimental, se procederá al contraste, análisis e interpretación de los resultados obtenidos por ambos métodos, así como a la propuesta de un método alternativo de carácter convencional más ajustado al comportamiento real de este tipo de cimentación.

3.1.1. PÓRTICOS TIPO

El estudio de las zapatas de medianería se lleva a cabo tomando como referencia un pórtico tipo, ortogonal, de dos y número variable de plantas (Fig.17). Los vanos son de igual luz, siendo ésta variable según los casos de estudio. La altura de las plantas es de 4 m para la planta baja y 3 m para cada una de las plantas superiores. La crujía entre pórticos sucesivos es de 5 m.

Se considera, como hipótesis, que el pilar izquierdo se encuentra en el límite de la propiedad y, por tanto, en medianería (Fig.17). La cimentación de dicho pilar es una zapata de medianería, la del pilar central hace las funciones, en su caso, de zapata interior que sirve de apoyo para el centrado de la zapata de medianería y, por último, la zapata del pilar derecho es una zapata aislada normal.

El pórtico es de hormigón armado y las uniones del mismo se consideran rígidas. Las bases de los pilares (unión de los pilares con la cimentación) están perfectamente empotradas en la cimentación en los modelos convencionales, mientras que en los modelos de elementos finitos, el propio funcionamiento del M.E.F. permite evaluar el grado de empotramiento de las mismas.

Fig.17. Pórtico tipo para el estudio de las zapatas de medianería

Por su parte, el estudio de las zapatas de esquina se lleva a cabo tomando como referencia dos pórticos consecutivos similares a los anteriores, también con dos vanos y número variable de plantas (Fig.18). Al igual que en el caso anterior, los vanos son de igual luz, siendo ésta variable según los casos de estudio, la altura de las plantas es de 4 m para la planta baja y de 3 m para cada una de las plantas superiores y la separación entre pórticos igual a la luz considerada en los vanos. Dicho entramado presenta un pilar, con su correspondiente zapata, en posición de esquina y dos alineaciones perpendiculares en medianería.

Fig.18. Pórticos tipo para el estudio de las zapatas de esquina

3.1.2. ACCIONES

Las acciones sobre los pórticos objeto de estudio se han determinado de acuerdo con el C.T.E. Documento Básico Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación (DB SE - AE). Se han considerado las siguientes hipótesis de carga:

- Peso propio y carga permanente
- Sobrecarga de uso

PESO PROPIO Y CARGA PERMANENTE

En la hipótesis de peso propio y carga permanente se tiene en cuenta: el peso propio de los elementos estructurales del pórtico (vigas y pilares), las cargas gravitatorias asociadas a los forjados de las plantas intermedias (peso propio del forjado y carga permanente de pavimentos, enlucidos y tabiquerías), las cargas gravitatorias asociadas al forjado de cubierta (peso propio del forjado y carga permanente del enlucido y de la cubierta plana) y la carga permanente debida al peso del cerramiento exterior y al antepecho de cubierta. Los elementos constructivos de referencia empleados, tanto en los casos de zapata de medianería como en los casos de zapata de esquina, son los mismos, por lo cual, se adoptan las mismas cargas unitarias en ambos casos.

El peso propio de los elementos de los pórticos (vigas y pilares) se obtiene a partir de las dimensiones de los mismos y del peso específico del material. Al ser los pórticos de hormigón armado se ha adoptado para el mismo un peso específico de $\gamma_{ho} = 25 \text{ kN/m}^3$. Las diferentes herramientas informáticas utilizadas para el cálculo de esfuerzos (CYPE 3D y ANSYS) contemplan de forma automática el peso propio de los elementos estructurales definidos en el fichero de cálculo.

La carga unitaria correspondiente a los forjados de las plantas intermedias responde al siguiente desglose:

▪ Peso propio forjado	3,00 kN/m ²
▪ Enlucido yeso (e = 15 mm)	
12,00 (kN/m ³) · 0,015 (m)	0,18 kN/m ²
▪ Pavimento (Terrazo sobre mortero)	0,80 kN/m ²
▪ Tabiquería	1,00 kN/m ²
TOTAL	4,98 kN/m²

Asimismo, la carga unitaria correspondiente al forjado de cubierta viene dada por la siguiente descomposición:

▪ Peso propio forjado	3,00 kN/m ²
▪ Enlucido yeso (e = 15 mm)	
12,00 (kN/m ³) · 0,015 (m)	0,18 kN/m ²
▪ Cubierta plana invertida	2,50 kN/m ²
TOTAL	5,68 kN/m²

Por su parte, la carga unitaria del cerramiento exterior se obtiene a partir de la definición de capas del mismo:

▪ Fábrica lad. perforado C/V (e = 120 mm)	
15,00 (kN/m ³) · 0,120 (m)	1,80 kN/m ²
▪ Enfoscado mortero cemento (e = 15 mm)	
20,00 (kN/m ³) · 0,015 (m)	0,30 kN/m ²
▪ Aislamiento térmico (e = 40 mm)	
0,02 (kN/m ²) · 4	0,08 kN/m ²
▪ Fábrica ladrillo hueco (e = 70 mm)	
12,00 (kN/m ³) · 0,070 (m)	0,84 kN/m ²
▪ Enlucido de yeso (e = 15 mm)	
12,00 (kN/m ³) · 0,015 (m)	0,18 kN/m ²
TOTAL	3,20 kN/m²

Finalmente, la carga unitaria correspondiente al antepecho de cubierta, en función de su composición es:

▪ Fábrica lad. perforado C/V (e = 120 mm)	
15,00 (kN/m ³) · 0,120 (m)	1,80 kN/m ²
▪ Fábrica lad. perforado (e = 120 mm)	
15,00 (kN/m ³) · 0,120 (m)	1,80 kN/m ²
▪ Enfoscado mortero cemento (e = 15 mm)	
20 (kN/m ³) · 0,015 (m)	0,30 kN/m ²
TOTAL	3,90 kN/m²

Conocidas las cargas unitarias correspondientes a los distintos elementos constructivos empleados, se procede al cálculo de los vectores de carga a aplicar sobre los pórticos. La carga correspondiente a cada forjado se transmite a los pórticos en cuestión como un vector uniformemente repartido. Para el cálculo del mismo, en los casos de medianería, es preciso

tener en cuenta que el pórtico elegido es uno de los pórticos interiores del edificio, que la crujía o separación entre pórticos sucesivos es de 5 m y que se va a considerar el efecto de la continuidad del forjado sobre la distribución de cargas a los distintos pórticos, adoptando un coeficiente de incremento de carga por continuidad para los pórticos interiores de valor 1,15. Con estos datos, la carga uniformemente repartida a aplicar en las vigas del pórtico es:

$$\text{Forjado Plantas Interm.} \quad q_p = 4,98 \cdot 5 \cdot 1,15 = \mathbf{28,64 \text{ kN/m}} \quad (\text{ec.41})$$

$$\text{Forjado Cubierta} \quad q_p = 5,68 \cdot 5 \cdot 1,15 = \mathbf{32,66 \text{ kN/m}} \quad (\text{ec.42})$$

Por su parte, la carga correspondiente, tanto al cerramiento exterior como al antepecho de cubierta, llega al pórtico en forma de vectores puntuales aplicados en los nudos correspondientes. Para el cálculo de los citados vectores puntuales, además de los comentarios realizados en el párrafo anterior para el cálculo de los vectores repartidos, hay que considerar que la altura de las plantas es de 3 m y que el antepecho de la cubierta tiene una altura de 1,1 m.

$$\text{Cerramiento Exterior} \quad q_p = 3,20 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 1,15 = \mathbf{55,20 \text{ kN}} \quad (\text{ec.43})$$

$$\text{Antepecho Cubierta} \quad q_p = 3,90 \cdot 5 \cdot 1,1 \cdot 1,15 = \mathbf{24,67 \text{ kN}} \quad (\text{ec.44})$$

En la Fig.19 se representa el esquema del pórtico con los vectores de carga correspondientes a la hipótesis de Peso Propio y Carga Permanente

Fig.19. Acciones. Peso Propio y Carga Permanente

SOBRECARGA DE USO

Se plantea como hipótesis un edificio de viviendas. Por ello, de acuerdo con la vigente normativa C.T.E. DB SE - AE, para los forjados de las plantas intermedias se considera una sobrecarga de uso de valor:

$$q_s = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

Por lo que respecta a la cubierta, es preciso tener en cuenta una sobrecarga de mantenimiento de cubierta de valor:

$$q_s = 1,00 \text{ kN/m}^2$$

Las cargas en cuestión gravitan sobre los forjados, los cuales transmiten dicha carga a las vigas del pórtico en forma de vectores uniformemente repartidos. Para el cálculo de dichos vectores es preciso tener en cuenta, como ya se hizo con la hipótesis de peso propio, que el pórtico elegido es uno de los pórticos interiores del edificio, que la crujía o separación entre pórticos sucesivos es de 5 m y que se considera el efecto de la continuidad del forjado sobre la distribución de cargas a los distintos pórticos. Con estos datos, la carga uniformemente repartida a aplicar en las vigas del pórtico será:

$$\text{Forjado Plantas Interm.} \quad q_s = 2,00 \cdot 5 \cdot 1,15 = 11,50 \text{ kN/m} \quad (\text{ec.45})$$

$$\text{Forjado Cubierta} \quad q_s = 1,00 \cdot 5 \cdot 1,15 = 5,75 \text{ kN/m} \quad (\text{ec.46})$$

En la Fig.20 se representa el esquema del pórtico con los vectores de carga correspondientes a la hipótesis de Sobrecarga de Uso.

Fig.20. Acciones. Sobrecarga de Uso

El cálculo de los vectores que actúan sobre los pórticos, en los casos de zapata de esquina, se realiza del mismo modo planteado para los casos de zapata de medianería. En esta ocasión se considera que, de los dos pórticos consecutivos empleados, el pórtico medianero ocupa una posición extrema mientras que el segundo pórtico es un pórtico interior del edificio. Por ello, el pórtico medianero cuenta con una superficie tributaria igual a la mitad del pórtico interior y los coeficientes de continuidad a emplear son 1,15 para el pórtico interior y 0,80 para el pórtico extremo.

3.1.3. VARIABLES Y CASOS PLANTEADOS

El núcleo central del trabajo de investigación de la tesis doctoral ha sido el estudio de las zapatas de medianería, entendiendo las zapatas de esquina como un caso particular de las anteriores. El plan experimental diseñado para el caso de las zapatas de medianería ha constituido un proceso de búsqueda cuyo objetivo ha sido identificar cuáles son las variables que controlan el auténtico comportamiento de este tipo de cimentación. Una vez localizadas las citadas variables se procede a su aplicación concreta al caso de las zapatas de esquina, pero el verdadero terreno de estudio es el campo de las zapatas de medianería.

A la hora de decidir las variables con las que se va a trabajar en la fase experimental, es preciso volver a reflexionar sobre la valoración crítica de los modelos convencionales realizada en el apartado 2.5. Los modelos convencionales plantean una serie de simplificaciones que, evidentemente, agilizan el proceso de cálculo, pero conducen a resultados alejados de la realidad y a decisiones de dimensionamiento posiblemente incorrectas. La relación de las citadas simplificaciones, puesta de manifiesto en el apartado 2.5, es la siguiente:

- No integración en un modelo único de la interacción suelo - cimiento - estructura
- Independencia de los modelos de viga centradora y tirante
- Simplificación de las cargas transmitidas por los pilares
- Modelización del conjunto zapata de medianería - viga centradora - zapata interior como un único elemento lineal global
- Consideración de diagramas de distribución de tensiones de contacto uniformemente repartidos bajo las zapatas
- Ausencia de interacción con el terreno bajo las vigas centradoras
- No consideración del pilar interior ni de las vigas centradoras de las zapatas de medianería auxiliares de la zapata de esquina

De todas estas cuestiones, es preciso seleccionar cuáles son las que pueden tener un mayor protagonismo a la hora de alejar el modelo de la realidad, desvirtuando el dimensionamiento de la cimentación.

La tercera cuestión planteada (simplificación de las cargas transmitidas por los pilares) no supone en la práctica ningún problema. Ciertamente es que muchos autores desprecian el momento y el cortante transmitido por el pilar a la cimentación, pero también es cierto, que los propios métodos convencionales permiten contemplarlos (si así se desea) y alcanzar un resultado adecuado en un tiempo razonable, incluso en un cálculo manual con calculadora.

La primera, la segunda, la cuarta y la sexta cuestión planteadas son evidentemente ciertas. Cuando se utiliza viga centradora, se quiera o no se quiera, la viga superior existe y, por ello, el efecto de la viga de la primera planta, trabajando como tirante, siempre es simultáneo con el efecto estabilizador de la viga centradora trabajando a flexión. Por su parte, resulta claro que la zapata de medianería y la zapata interior no son elementos lineales, por lo cual, hay discontinuidades volumétricas a lo largo del conjunto de la cimentación. Y, finalmente, es un hecho que entre la viga centradora y el terreno debe producirse algún tipo de contacto. Los modelos convencionales no contemplan ninguna de estas cuestiones y, por contraste, se toma la decisión de generar modelos de elementos finitos que contemplen todos estos aspectos para conocer, a la vista de la comparación de resultados, la incidencia que puede tener el hecho de ponerlos en escena o no.

Ahora bien, la decisión de generar modelos de elementos finitos que integren simultáneamente pórtico cimentación y suelo, que contemplen la función de la viga superior simultáneamente con la viga centradora, que consideren las discontinuidades volumétricas a lo largo de la cimentación y que tengan en cuenta el contacto de la viga centradora con el terreno, supone solamente una declaración de intenciones que no conduce ni a un conjunto de variables ni a un abanico de casos de estudio.

La simplificación más susceptible de no ser cierta y que probablemente tenga mayor influencia sobre el dimensionamiento final de la cimentación es la quinta. Plantear diagramas de tensiones uniformemente repartidos con resultante totalmente centrada, supone aceptar la idea de que las zapatas no experimentan el más mínimo giro y que, por tanto, las bases de los pilares y los arranques de la viga centradora están perfectamente empotrados. Esta afirmación es poco creíble, como puede observarse en la Fig.21, que presenta la deformada de una zapata de medianería con viga centradora, en la que quedan de manifiesto los giros de ambas zapatas.

Fig.21. Deformada de una zapata de medianería con viga centradora

Intuida la importancia clave del giro de las zapatas como origen del problema objeto de estudio el trabajo de investigación desarrollado en la tesis doctoral se convierte en un proceso de búsqueda que persigue identificar cuáles son las variables que controlan el mecanismo del giro de la zapata.

La expresión *proceso de búsqueda* transmite perfectamente la idea de la evolución del trabajo de investigación. No se trata de un estudio estanco, con unas variables fijas y definitivas desde el primer momento, que conducen a un conjunto cerrado de casos a estudiar, como si se conociese a priori el resultado que se va a obtener. Al contrario, se trata de un proceso vivo, en evolución, en el que se van ensayando variables de forma sucesiva, de modo que las ideas e intuiciones conducen a proponer variables que, una vez ensayadas generan certezas, por un lado, e incertidumbres, por otro, que conducen a una nueva etapa de reflexión sobre el problema y propuesta de nuevas variables, en un proceso cíclico de propuesta - ensayo - reflexión en busca de la respuesta al problema planteado.

Planteado el trabajo de investigación como proceso, pueden identificarse en él cuatro etapas. Las tres primeras constituyen el auténtico proceso de búsqueda llevada a cabo sobre las zapatas de medianería, la cuarta consiste en la aplicación a las zapatas de esquina de los resultados obtenidos para las zapatas de medianería.

3.1.3.1. ETAPA I

La primera etapa de la presente tesis doctoral está constituida por el trabajo de investigación desarrollado por el doctorando para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (D.E.A.) (Galletero, P., 2009). Los pórticos empleados en esta Etapa I son de dos vanos y tres plantas (baja más dos) (Fig.22). Se plantea una luz de 6 m para cada uno de los vanos, altura de la planta baja de 4 m y altura de 3 m para cada una de las plantas superiores. Se considera, como hipótesis, que el pilar izquierdo se encuentra en el límite de la propiedad, por lo cual, dicho pilar cuenta con una zapata de medianería equilibrada mediante una viga centradora conectada al pilar interior.

Analizado el papel clave del giro de las zapatas, la primera reflexión acerca de los factores que pueden incidir sobre dicho giro conduce a dos posibles frentes: por un lado, la rigidez del pórtico que arranca de la cimentación y, por otro, la flexión en la viga centradora como consecuencia de la excentricidad de la zapata de medianería.

El primer frente procede de la intuición de que cuanto mayor sea la rigidez del pórtico más oposición ejercerá éste al giro de la zapata. El segundo frente nace de la idea de que cuanto mayor sea la flexión en la viga centradora mayor será el giro en las zapatas que se unen a la citada viga. Dicha flexión en la viga centradora depende directamente de la excentricidad de la zapata de medianería y ésta, a su vez, depende de la relación entre la dimensión de la zapata en el plano del pórtico y la luz de éste. Cuanto mayor sea el tamaño de la zapata de medianería en la dirección del pórtico mayor será su excentricidad, mayor la flexión de la viga y, como consecuencia, mayor el giro de la propia zapata. Son dos los factores que conducen a incrementar el tamaño de la cimentación en el plano del pórtico: la tensión admisible del terreno y la relación de forma que se adopta en el diseño de la zapata de medianería. Cuanto menos resistente sea el terreno mayor será la zapata de medianería y su excentricidad y, cuanto más cuadrada sea dicha zapata también será mayor su excentricidad.

Por todo ello, a modo de resumen, se plantean como variables a estudiar en la Etapa I las siguientes:

- Rigidez del pórtico
- Tensión admisible del terreno
- Relación de forma de la zapata de medianería

RIGIDEZ DEL PÓRTICO

Esta variable pretende evaluar la oposición del propio pórtico al giro de sus zapatas de cimentación. Se consideran tres niveles de rigidez para el pórtico (Fig.22):

Fig.22. Pórtico tipo y niveles de rigidez planteados en la Etapa I

- El primer nivel de rigidez, identificado como **h 300**, corresponde a un pórtico flexible, con pilares y vigas planos, cuya sección es de 700 x 300 (mm) para las vigas y 450 x 300 (mm) para los pilares.
- El segundo nivel de rigidez, identificado como **h 450**, corresponde a un pórtico intermedio, con pilares y vigas prácticamente cuadrados, de 550 x 450 (mm) de sección para las vigas y 400 x 400 (mm) para los pilares.
- El tercer nivel de rigidez, identificado como **h 600**, corresponde a un pórtico rígido, con pilares y vigas de canto, cuya sección es de 350 x 600 (mm) para las vigas y 300 x 500 (mm) para los pilares.

Dentro de la idea general de plantear pórticos con secciones de barras planas, cuadradas o de canto, las dimensiones de las secciones no se han elegido de forma arbitraria. Al contrario, se ha procedido al cálculo y dimensionamiento del pórtico en cada una de las tres versiones, con el fin de trabajar con secciones reales que permitan alojar los correspondientes armados que sean constructivamente correctos y que verifiquen los diferentes Estados Límites Últimos y de Servicio a cumplir.

TENSIÓN ADMISIBLE DEL TERRENO

Una reducción en la tensión admisible del terreno supone un incremento del tamaño de la zapata de medianería y, por tanto, de su excentricidad, con la consiguiente influencia sobre la flexión de la viga centradora y el posible giro de la cimentación. Para valorar el grado de incidencia de este parámetro sobre el giro de la cimentación se proponen tres niveles de tensión admisible del terreno, que son:

- $\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$

RELACIÓN DE FORMA DE LA ZAPATA DE MEDIANERÍA

La relación de forma de la zapata de medianería, entendida como proporción que guardan las dos dimensiones en planta de la misma, tiene una evidente influencia sobre la excentricidad de la zapata, de tal modo que cuanto más cuadrada sea dicha zapata mayor será su excentricidad. Ciertamente es que, a la vista de los propios modelos convencionales, resulta siempre recomendable disponer las zapatas con su menor dimensión en planta paralela al

plano del pórtico, pero cabe preguntarse cómo valorar la influencia de la relación de forma sobre la flexión de la viga centradora y el intuido giro de la zapata y, si dicha influencia es siempre constante o no. Por ello, se van a estudiar tres relaciones de forma diferentes (Fig.23) 2:1, 1,5:1 y 1:1 :

Fig.23. Relaciones de forma consideradas en la zapata de medianería

ETAPA I. CASOS PLANTEADOS

Se muestra en la Tabla 1 el abanico de variables planteadas en la Etapa I. Se proponen tres variables distintas con tres valores diferentes para cada una de ellas. La combinación de todas las variables planteadas conduce, por tanto, a un total de **27 CASOS**.

RIGIDEZ PÓRTICO	TENSIÓN ADMISIBLE (kN/m ²)	RELACIÓN FORMA
h 300	100	2 : 1
h 450	200	1,5 : 1
h 600	300	1 : 1

Tabla 1. Variables planteadas en la Etapa I

Definidos los 27 casos que se obtienen de las posibles permutaciones con las variables de la Tabla 1, se procede al cálculo de cada uno de ellos, tanto con los modelos convencionales como con el correspondiente modelo de elementos finitos, con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

Para que los resultados puedan ser comparables, el tamaño de la cimentación considerado en el modelo de elementos finitos ha de ser el mismo que el considerado en el respectivo

modelo convencional. Por ello, se calculará en primer lugar el caso en cuestión con los modelos convencionales (siendo el modelo de viga centradora el que suele condicionar el dimensionamiento) y, una vez conocidas las dimensiones de las zapatas, se le impondrán como dato al modelo de elementos finitos, ya que el contraste de resultados entre los distintos modelos ha de realizarse en igualdad de condiciones y, por ello, el punto de partida ha de ser el mismo para todos.

Asimismo, hay que indicar que, tal y como se expone más ampliamente en el apartado 3.3.1, los modelos de elementos finitos de la Etapa I se calculan bajo la hipótesis de comportamiento elástico lineal de todos los materiales implicados (hormigón y suelo).

3.1.3.2. ETAPA II

Los resultados de la fase experimental de la Etapa I (apartado 4.1), ponen de manifiesto la clara influencia, tanto de la tensión admisible del terreno como de la relación de forma de la zapata de medianería, sobre los giros de la cimentación (apartado 5.1). Por el contrario, la rigidez del pórtico resulta tener prácticamente nula incidencia sobre dichos giros.

La primera parte del análisis de los resultados de la Etapa I (apartado 5.1) resulta lógica y esperable. Tensiones admisibles del terreno bajas, ciertamente conducen a zapatas de mayor tamaño, más excéntricas y, por tanto, con resultantes de reacción más hacia el centro de la viga centradora, incrementando así la flexión de ésta y el correspondiente giro de las zapatas. Por su parte, la relación de forma incide de forma similar. Cuanto más cuadrada sea la zapata de medianería más excéntrica resulta, generando la misma secuencia de incremento de la flexión de la viga centradora y del correspondiente giro de las zapatas.

En cambio, la prácticamente nula influencia de la variable rigidez (apartado 5.1), en un estudio relacionado con una cuestión de giros, resulta sorprendente y, hasta cierto punto, desconcertante, pues es sobradamente conocida la relación entre ambos parámetros.

La reflexión sobre este asunto conduce a dos posibles vías de actuación. La primera sería continuar insistiendo en la rigidez del pórtico. Ciertamente, en la Etapa I, se ha jugado con diferentes anchos y cantos de sección, tanto en pilares como en vigas, pero todos ellos de un rango similar. Probablemente, para observar una clara coacción del giro de la cimentación por parte del pórtico, sería necesario poner en escena pilares mucho más apantallados, que

generasen un salto cualitativo en la rigidez del pórtico, convirtiéndolo en un elemento autoportante que impidiese los giros de las zapatas.

La segunda vía conduce a estudiar la rigidez de la propia viga centradora, es decir, el elemento directamente implicado en el proceso, cuya flexión condiciona, en primera instancia, el giro de las zapatas que de ella dependen. Dado el papel protagonista de la viga centradora en el problema objeto de estudio, se opta por seguir este segundo camino.

Entendida la rigidez a flexión de un elemento estructural como la oposición que ejerce el mismo a ser curvado ante la aplicación de cargas exteriores, son dos los parámetros fundamentales que definen dicha rigidez: la longitud del elemento en cuestión y la inercia del mismo, que depende especialmente del canto de la sección transversal. La forma más sencilla de contemplar ambos parámetros (luz y canto) es jugar con la geometría del pórtico, estudiando luces variables para los vanos del mismo, a diferencia de la Etapa I en la que los vanos eran de luz constante de 6 m. Luces variables de vano, automáticamente generan luces variables de viga centradora, no siendo necesario introducir la variable canto de forma explícita ya que el propio dimensionamiento del pórtico y su cimentación, en función de la geometría y las cargas de cada caso, conduce a un abanico variado de cantos.

Por otra parte, una vez abierta la vía geométrica de la variación de las luces del pórtico, parece indicado también plantear casos con número de plantas variable. Tal y como se ha comentado, las variables con influencia confirmada sobre el problema (tensión admisible del terreno y relación de forma) tienen dicha influencia no por sí mismas sino por los tamaños de cimentación y excentricidades a que dan lugar. Por ello, la consideración de un número variable de plantas enriquece el abanico de resultados, ya que al aumentar el número de plantas se incrementan las cargas transmitidas a la cimentación y, por ello, el tamaño de las zapatas obtenidas, que es uno de los factores clave.

Estas son las dos nuevas variables introducidas, en sustitución de la rigidez del pórtico, junto con las dos variables que se confirman, tensión admisible del terreno y relación de forma de la zapata de medianería. Por todo ello, la relación de variables a estudiar en la Etapa II es la siguiente:

- Luz de vano
- Número de plantas
- Tensión admisible del terreno
- Relación de forma de la zapata de medianería

LUZ DE VANO

Se consideran tres luces para los vanos del pórtico tipo (Fig. 24), $L = 3\text{ m}$, $L = 5\text{ m}$ y $L = 7\text{ m}$.

Fig.24. Luces de vano consideradas en el pórtico tipo

NÚMERO DE PLANTAS

Se consideran cuatro valores distintos para el número de plantas del pórtico tipo (Fig. 25), desde Baja +1 hasta Baja +4.

Fig.25. Número de plantas consideradas en el pórtico tipo

TENSIÓN ADMISIBLE DEL TERRENO

Se mantienen en la Etapa II los mismos tres niveles de tensión admisible del terreno planteados en la Etapa I, es decir:

- $\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$

RELACIÓN DE FORMA DE LA ZAPATA DE MEDIANERÍA

Se mantiene la relación de forma de la zapata de medianería como variable de estudio, si bien se reduce el número de casos respecto de la Etapa I, eliminando la zapata de medianería cuadrada (evidentemente desfavorable y nada recomendable) y manteniendo las relaciones de forma 2:1 y 1,5:1 (Fig.26)

Fig.26. Relaciones de forma consideradas en la Etapa II

ETAPA II. CASOS PLANTEADOS

Se muestra en la Tabla 2 el abanico de variables planteadas en la Etapa II. Se proponen cuatro variables con cuatro valores diferentes para la primera, tres para la segunda y la tercera y dos para la cuarta.

NÚMERO PLANTAS	LUZ VANO (m)	TENSIÓN ADM. (kN / m ²)	RELACIÓN FORMA
Baja +1	3	100	2 : 1
Baja +2	5	200	1,5 : 1
Baja +3	7	300	
Baja +4			

Tabla 2. Variables planteadas en la Etapa II

La combinación de las variables indicadas con sus correspondientes valores conduce en algunas ocasiones a casos, o bien imposibles, o bien dudosos. Se trata, en general de casos de poca luz, reducida tensión admisible en el terreno y elevado número de plantas, que generan zapatas de gran tamaño que, o bien se solapan físicamente, o bien quedan tan próximas que seguramente produzcan efectos adicionales por solape de bulbos de tensiones.

Teniendo en cuenta este hecho, descontando del conjunto de permutaciones de variables y valores los casos imposibles o dudosos, se obtienen para la Etapa II un total de **65 CASOS**.

Al igual que en la Etapa I, una vez definidos los 65 casos a estudiar, se procede al cálculo de cada uno de ellos, tanto con los modelos convencionales como con el correspondiente modelo de elementos finitos, imponiéndole a los modelos de elementos finitos los dimensionamientos obtenidos con métodos convencionales, con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos por los diferentes métodos en igualdad de condiciones.

Se utilizan para los pórticos pilares cuadrados, con escuadrías que oscilan según los casos entre 300 x 300 (mm x mm) y 400 x 400 (mm x mm). Para las vigas se emplean secciones tipo plano (mayor ancho que canto) con suficiente canto para cumplir las distintas comprobaciones establecidas por la normativa vigente. La escuadría de dichas vigas varía, según los casos, desde 450 x 300 (mm x mm) hasta 650 x 400 (mm x mm).

Por su parte, para las cimentaciones se proponen zapatas con el mínimo canto compatible con la condición de anclaje de las armaduras de los pilares que de ellas arrancan, oscilando dicho canto desde $h = 500$ mm hasta $h = 700$ mm. Las vigas centradoras aprovechan al máximo el canto de la cimentación presentando ancho variable con valores comprendidos entre $b = 450$ mm y $b = 800$ mm.

No obstante, es preciso señalar que, por encima de los cambios introducidos en las variables a estudiar y en las dimensiones de los pórticos, la diferencia fundamental entre la Etapa I y la Etapa II radica en la manera de abordar las propiedades de los materiales en los modelos de elementos finitos. En la Etapa I se realiza un cálculo con comportamiento elástico lineal por parte de todos los materiales. En el caso concreto del hormigón armado, dicha consideración queda muy alejada de la realidad. El hormigón no tiene comportamiento elástico (salvo en situaciones iniciales de aplicación de carga con pequeñas solicitaciones), su diagrama tensión - deformación no responde a un diagrama rectilíneo lineal (al contrario, es parabólico rectangular) y, además, es un material anisótropo con distinto comportamiento a tracción y a compresión, que fisura cuando se encuentra solicitado a tracción, siendo esa fisuración

variable en función de la cuantía de armado del elemento. En la Etapa II se realiza, en los modelos de elementos finitos, un cálculo plástico con fisuración a tracción en los elementos de hormigón armado. Ello requiere, para cada pórtico, no solo el dimensionamiento de las escuadrías de pilares, vigas y zapatas, sino también la detallada definición de los armados de cada elemento, con el fin de introducir dichos armados en los correspondientes modelos de elementos finitos, para poder considerar correctamente la fisuración del hormigón y su influencia sobre la distribución de esfuerzos.

En el apartado 3.3.2. se describe detalladamente el proceso de configuración de los modelos de elementos finitos para contemplar un comportamiento del hormigón más ajustado a la realidad. Por su parte, en el Capítulo 4, se exponen los resultados del dimensionamiento previo de cada uno de los pórticos obtenido por métodos convencionales mostrando, para cada caso, las escuadrías resultantes para pilares, vigas y zapatas, así como la definición detallada de los armados necesarios en cada elemento.

3.1.3.3. ETAPA III

El análisis de los resultados de la Etapa I (apartados 4.3 y 5.3) confirma el giro de las zapatas de cimentación, que conduce a un desplazamiento de la resultante de las tensiones de contacto de la zapata de medianería hacia la medianera, alejando dicha resultante del centro de la viga centradora. Ello conduce, por un lado, a una importante reducción en el momento flector que solicita la viga centradora y, por otro, a una distribución de tensiones de contacto bajo la zapata de medianería de tipo trapecial, con tendencia al incremento de tensiones en el borde medianero.

Ahora bien, dicho análisis de resultados de la Etapa I también confirma la colaboración portante de la viga centradora, que da lugar a una descarga de la zapata de medianería, como consecuencia de la cual, no supone especial problema la distribución de tensiones de tipo trapecial que se genera bajo la zapata de medianería.

Frente al planteamiento elástico lineal de la Etapa I, en la Etapa II se desarrolla un cálculo plástico con fisuración del hormigón, fruto de la cual, se produce una pérdida rigidez de la viga centradora, al verse mermada su inercia por la fisuración de la sección (apartado 5.3). La pérdida de rigidez de la viga centradora genera un incremento en la flexión de la misma que produce un aumento en el giro de las zapatas, un mayor desplazamiento de la resultante de las tensiones de contacto de la zapata de medianería hacia el borde medianero y un aumento

en la curvatura de la viga que reduce la colaboración portante de la misma. Ciertamente este escenario resulta muy favorable para la viga centradora, que se ve solicitada por momentos flectores todavía inferiores a los de la Etapa I pero, por el contrario, se ven incrementadas las tensiones en el borde medianero de la zapata de medianería, pasando a ser un problema el comportamiento geotécnico de la misma.

Nuevamente el análisis de los resultados conduce a dos posibles caminos, en principio contradictorios. Por un lado, la reducción en el momento flector de la viga centradora invita a disminuir el armado de la misma. Ahora bien, una reducción de armadura podría conducir a una mayor fisuración de la viga con la consecuente pérdida de rigidez y aumento en su flexión y el correspondiente incremento en el giro de las zapatas que empeoraría el problema. Surge la interesante pregunta de si la reducción de armadura a medida que la viga centradora se va viendo menos solicitada conduciría a un bucle infinito cuyo final sería la eliminación práctica de la viga centradora y ¿qué ocurriría en ese supuesto?

Por otro lado, los problemas geotécnicos surgidos en la zapata de medianería se deben a una pérdida de rigidez de la viga centradora que invita, o bien a aumentar la armadura de la viga centradora con el fin de disminuir su fisuración evitando así la pérdida de rigidez de la misma, o bien a aumentar el canto de la cimentación, que es el mecanismo más eficaz para lograr vigas centradoras de gran inercia.

Por lo que respecta a la tensión admisible del terreno y a la relación de forma de la zapata de medianería, nuevamente se confirma con los resultados de la Etapa II (apartado 4.2) su influencia sobre el giro de las zapatas. Ahora bien, sigue percibiéndose que dicha influencia no es intrínseca a la propia tensión admisible del terreno o a la relación de forma, sino indirecta a través de los tamaños de cimentación a los que dan lugar. Por ello, lo realmente importante es el tamaño de las zapatas y el porcentaje de luz de vano que invaden, independientemente de la causa que dio lugar a ese tamaño. Esta reflexión, unida a la necesidad de optimizar el número de casos a estudiar, lleva a eliminar la tensión admisible del terreno y la relación de forma de la zapata de medianería como parámetros variables seleccionando para ellos los siguientes valores fijos:

- Tensión Admisible del Terreno $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- Relación de Forma 2:1

Por su parte, se sigue manteniendo el mismo juego de luces de vano y número de plantas de pórtico contemplado en la Etapa II

Por todo ello, la relación de variables a estudiar en la Etapa III es la siguiente:

- Luz de vano
- Número de plantas
- Reducción de armadura
- Eliminación de la viga centradora
- Aumento de armadura
- Aumento del canto de la viga centradora

LUZ DE VANO

Se consideran tres luces para los vanos del pórtico tipo, tal y como se realizó en la Etapa II (Fig. 24), $L = 3$ m, $L = 5$ m y $L = 7$ m.

NÚMERO DE PLANTAS

Se consideran los mismos cuatro valores para el número de plantas del pórtico tipo contemplados en la Etapa II (Fig. 25), Baja +1, Baja +2, Baja +3 y Baja +4.

REDUCCIÓN DE ARMADURA

Además del armado de referencia de la viga centradora obtenido al dimensionar la armadura con los esfuerzos (momentos flectores) resultantes de los modelos convencionales, se realiza un juego de casos con la armadura necesaria para los esfuerzos (momentos flectores) obtenidos de los modelos de elementos finitos de la Etapa II, considerablemente inferiores a los convencionales. En el apartado 4.3 se ofrece una relación con la definición detallada del armado de la viga centradora para los diferentes casos a estudiar.

ELIMINACIÓN DE LA VIGA CENTRADORA

Fig.27. Eliminación de la viga centradora

Se realiza un juego de casos en el que se elimina la viga centradora (Fig.27). Ello permite valorar la verdadera eficacia de la viga centradora y contrastar el modelo convencional de zapata de medianería con colaboración de viga superior sin viga centradora.

AUMENTO DE ARMADURA

Los problemas detectados en la Etapa II tienen su origen en la pérdida de rigidez debida a la fisuración de la viga centradora siendo, por ello, una primera vía de actuación el aumento de armadura para intentar controlar la fisuración de la viga. Resulta ilustrativa en este sentido la fórmula (Branson, D.E., 1977) (ec.47), habitualmente empleada para determinar la inercia equivalente en el cálculo de deformaciones en elementos flectados de hormigón armado.

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \cdot I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_f \quad (\text{ec.47})$$

siendo:

- I_e : Inercia equivalente
- I_b : Inercia bruta
- I_f : Inercia fisurada
- M_a : Momento aplicado
- M_f : Momento de fisuración

La inercia eficaz realmente disponible por parte de una sección, o inercia equivalente, depende de la magnitud de los elementos no fisurados de una sección de hormigón armado. El hormigón de la zona traccionada y fisurada de la sección (Fig.28) es incapaz de aportar inercia y, por tanto, rigidez a la viga. Si la armadura de la sección es reducida, la profundidad de la fibra neutra será pequeña, la magnitud de la zona traccionada y fisurada muy grande y, como consecuencia de ello, la inercia fisurada (I_f) y el momento de fisuración (M_f) muy pequeños, obteniéndose una inercia equivalente limitada, con la correspondiente pérdida de rigidez.

Fig.28. Sección fisurada de hormigón armado

La respuesta es no. Si se produce un aumento excesivo de la cuantía de la armadura de tracción, la fibra neutra bajaría mucho y la sección llegaría un momento en que entraría en dominio 4 (Fig.29), con una enorme cantidad de acero desperdiciado por estar trabajando a una tensión muy reducida.

$$x_{lim} \approx 0,60 \cdot d \quad (\text{ec.48})$$

Acero B 500 S $x \leq 0,30 \cdot d$ (ec.49)

Acero B 500 SD $x \leq 0,50 \cdot d$ (ec.50)

$$x \leq 0,45 \cdot d \quad (\text{ec.51})$$

Esta última limitación se encuentra en la posición central dentro del rango de limitaciones planteadas y es la que se adopta como referencia. Por ello, además del armado de referencia de la viga centradora obtenido al dimensionar la armadura con los esfuerzos (momentos flectores) resultantes de los modelos convencionales, se realiza un juego de casos incrementando la armadura hasta un punto tal que se alcance una profundidad de fibra neutra próxima a:

$$x = 0,45 \cdot d \quad (\text{ec.52})$$

Ello supone incrementos de armadura considerables, superiores al doble de la armadura obtenida por métodos convencionales. En el apartado 4.3 se ofrece una relación con la definición detallada del armado de la viga centradora para los diferentes casos a estudiar al aplicar este criterio.

AUMENTO DEL CANTO DE LA VIGA CENTRADORA

La segunda vía para aumentar la rigidez de la viga centradora consiste en el aumento del canto de la viga centradora, optándose por incrementar en la misma medida el canto del conjunto de la cimentación con el fin de tener modelos homogéneos.

Fig.30. Incremento del canto de la cimentación

Tanto en la Etapa I como en la Etapa II se plantean cimentaciones con el mínimo canto compatible con el anclaje de las armaduras de los correspondientes pilares obteniéndose, en general, zapatas flexibles.

Se plantean en la Etapa III tres niveles de canto adicionales al contemplado en la Etapa II, que se obtienen al incrementar los cantos de referencia planteados en la Etapa II en un 25%, 50% y 75% respectivamente (Fig.30):

ETAPA III. CASOS PLANTEADOS

Se muestra en la Tabla 3 el abanico de variables planteadas en la Etapa III.

NÚMERO PLANTAS	LUZ VANO (m)	REDUCCIÓN ARMADURA	ELIMINACIÓN VIGA CENT.	AUMENTO ARMADURA	AUMENTO CANTO
Baja +1	3	$M_{Et II}$	Sin V. Cent.	$x \leq 0,45 \cdot d$	$1,25 \cdot H_{II}$
Baja +2	5				$1,50 \cdot H_{II}$
Baja +3	7				$1,75 \cdot H_{II}$
Baja +4					

Tabla 3. Variables planteadas en la Etapa III

Teniendo en cuenta las variables planteadas y descontando del conjunto de permutaciones de variables los casos de 3 m de luz y baja +4 plantas, por solapamiento de zapatas y bulbos de tensiones de contacto, se obtienen para la Etapa III un total de **66 CASOS**.

Al igual que en las etapas anteriores, una vez definidos los 66 casos a estudiar, se procede al cálculo de cada uno de ellos, con los correspondiente modelos de elementos finitos, imponiéndole a dichos modelos de elementos finitos las dimensiones obtenidas con métodos convencionales, con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos por los diferentes métodos en igualdad de condiciones. Es preciso indicar que, al no contemplar los modelos convencionales al armado de los elementos de hormigón de la cimentación, los modelos convencionales de referencia para el contraste de resultados son los mismos que los de la Etapa II.

Continuando con la línea abierta en la Etapa II, los modelos de elementos finitos elaborados en la Etapa III presentan un cálculo plástico con fisuración del hormigón en tracción, ajustándose así al comportamiento real del hormigón.

3.1.3.4. ETAPA IV

Los resultados de la tercera etapa experimental (apartado 4.4) ponen de manifiesto (apartado 5.4) la limitada influencia que sobre el giro de las zapatas tienen las variaciones en la cuantía de armado, ya sea por aumento o reducción de la misma, resultando ser el canto de la viga centradora el principal parámetro que controla el giro de la cimentación (elemento clave en el comportamiento de la misma).

El estudio realizado en las tres primeras etapas experimentales, utilizando casos de zapata de medianería, ha servido para estudiar en profundidad el problema, identificando los parámetros y variables que lo regulan. Una vez finalizado dicho proceso con la zapata de medianería, la Etapa IV constituye una aplicación de todo lo estudiado al caso de las zapatas de esquina, entendidas como un caso particular de las zapatas de medianería.

Lógicamente, el trabajo experimental de la Etapa IV se beneficia de la reflexión previa generada a partir de las tres primeras etapas, jugando por ello, solamente con las variables de influencia contrastada sobre el problema y descartando las que han demostrado tener poco o nulo efecto sobre el mismo. Al igual que en la Etapa III, para la tensión admisible del terreno se adopta el valor fijo $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$. En cuanto a la relación de forma de las zapatas, la zapata de esquina se plantea cuadrada, mientras que las dos zapatas de medianería auxiliares que estabilizan a la zapata de esquina se proponen con relación 2:1.

Por todo ello, la relación de variables a estudiar en la Etapa IV es la siguiente:

- Luz de vano y crujía
- Número de plantas
- Canto de las vigas centradoras

LUZ DE VANO Y CRUJÍA

Se consideran tres luces para los vanos del pórtico tipo, tal y como se realizó en la Etapa II y en la Etapa III (Fig. 31) $L = 3 \text{ m}$, $L = 5 \text{ m}$ y $L = 7 \text{ m}$. Para la separación entre los dos pórticos contemplados en el modelo tridimensional de la zapata de esquina, se utilizan crujías iguales a las luces asignadas al vano del pórtico en el caso correspondiente.

NÚMERO DE PLANTAS

Se consideran los mismos cuatro valores para el número de plantas del pórtico tipo contemplados en las Etapa II y III (Fig. 31), Baja +1, Baja +2, Baja +3 y Baja +4.

Fig.31. Luces y número de plantas consideradas en el pórtico tipo

CANTO DE LAS VIGAS CENTRADORAS

Se plantean dos niveles de rigidez en las vigas centradoras en función del canto de las mismas, de forma similar a como se hizo en las Etapas II y III. El primero de ellos, identificado como $H_{\min}$, corresponde a vigas centradoras proyectadas, junto con la cimentación, con el

mínimo canto compatible con la condición de anclaje de las armaduras de los pilares del pórtico. Dicho nivel de rigidez conduce, en muchos casos, a cimentaciones flexibles. Por lo que respecta al otro nivel de rigidez, se obtiene incrementando el canto mínimo antes citado en un 75%, identificándolo con la notación $1,75 \cdot H_{\min}$.

ETAPA IV. CASOS PLANTEADOS

Se muestra en la Tabla 4 el abanico de variables planteadas en la Etapa IV.

NÚMERO PLANTAS	LUZ VANO - CRUJÍA (m)	AUMENTO CANTO
Baja +1	3	$H_{\min}$
Baja +2	5	$1,75 \cdot H_{\min}$
Baja +3	7	
Baja +4		

Tabla 4. Variables planteadas en la Etapa IV

Teniendo en cuenta las variables planteadas y descontando del conjunto de permutaciones de variables los casos de 3 m de luz y baja +4 plantas, por solapamiento de zapatas y bulbos de tensiones de contacto, se obtienen para la Etapa IV un total de **22 CASOS**.

Al igual que en etapas anteriores, una vez definidos los 22 casos a estudiar, se procede al cálculo de cada uno de ellos, tanto con el modelo convencional como con el correspondiente modelo de elementos finitos, imponiéndole a los modelos de elementos finitos los dimensionamientos obtenidos con métodos convencionales, con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos por los diferentes métodos en igualdad de condiciones.

3.2. MODELIZACIÓN CONVENCIONAL

3.2.1. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LOS PÓRTICOS

Los modelos convencionales incluyen, como sólidos objeto de estudio, solamente los de la cimentación o, como mucho, la cimentación más el pilar de la planta baja y la viga de la primera planta. Por ello se parte, como dato inicial, de los esfuerzos transmitidos a la cimentación y su entorno por los pilares del pórtico.

El cálculo de los esfuerzos en los pórticos, para cada uno de los casos definidos en el apartado 3.1.3. en las Etapas I, II y IV, se ha realizado con ayuda del programa CYPE 3D (Fig.32). Dicho programa trabaja con cálculo matricial, llevando a cabo un cálculo elástico lineal a partir de las secciones brutas de hormigón, definidas en 3.1.3. bajo la hipótesis de bases de pilares perfectamente empotradas en la cimentación y, por tanto, sin ningún tipo de giro por parte de las zapatas.

Fig.32. Programa de cálculo matricial CYPE 3D

3.2.2. CÁLCULO DE MODELOS CONVENCIONALES

Conocidos los esfuerzos transmitidos por los pilares a la cimentación en cada uno de los casos planteados para el pórtico, en las distintas etapas de la fase experimental, se procede al cálculo de la cimentación por métodos convencionales, de acuerdo con lo descrito en los Capítulo 2, en los apartados 2.2 ,2.3 y 2.4.

3.2.2.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA

El cálculo por métodos convencionales de una zapata de medianería equilibrada mediante viga centradora se describe en el apartado 2.2. del Capítulo 2. En la Fig.33 se reproduce el esquema de cálculo de dicho modelo.

Fig.33. Esquema de cálculo de una zapata de medianería con viga centradora

Para agilizar la aplicación del proceso de cálculo del modelo convencional a los casos objeto de estudio, se han programado las ecuaciones de dicho modelo (ec. 3, 4, 5, 6 y 7) mediante una hoja de cálculo Excel que se muestra en la Tabla 5. Hay que indicar que el momento de la viga centradora que figura en dicha tabla es de servicio (sin mayorar).

ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA																	
DIMENSIONES																	
<table> <tr><th colspan="3">ZAPATA MEDIANERÍA</th></tr> <tr><td>LARGO (a)</td><td>(m)</td><td>1,350</td></tr> <tr><td>ANCHO (b)</td><td>(m)</td><td>2,700</td></tr> <tr><td>ALTO (h)</td><td>(m)</td><td>0,700</td></tr> <tr><td>RESULTANTE (d_m)</td><td>(m)</td><td>0,675</td></tr> </table>			ZAPATA MEDIANERÍA			LARGO (a)	(m)	1,350	ANCHO (b)	(m)	2,700	ALTO (h)	(m)	0,700	RESULTANTE (d _m)	(m)	0,675
ZAPATA MEDIANERÍA																	
LARGO (a)	(m)	1,350															
ANCHO (b)	(m)	2,700															
ALTO (h)	(m)	0,700															
RESULTANTE (d _m)	(m)	0,675															
<table> <tr><th colspan="3">ZAPATA INTERIOR</th></tr> <tr><td>LARGO (a)</td><td>(m)</td><td>2,250</td></tr> <tr><td>ANCHO (b)</td><td>(m)</td><td>2,250</td></tr> <tr><td>ALTO (h)</td><td>(m)</td><td>0,700</td></tr> <tr><td>RESULTANTE (d_i)</td><td>(m)</td><td>1,125</td></tr> </table>			ZAPATA INTERIOR			LARGO (a)	(m)	2,250	ANCHO (b)	(m)	2,250	ALTO (h)	(m)	0,700	RESULTANTE (d _i)	(m)	1,125
ZAPATA INTERIOR																	
LARGO (a)	(m)	2,250															
ANCHO (b)	(m)	2,250															
ALTO (h)	(m)	0,700															
RESULTANTE (d _i)	(m)	1,125															
<table> <tr><th colspan="3">VIGA CENTRADORA</th></tr> <tr><td>ANCHO (b)</td><td>(m)</td><td>0,550</td></tr> <tr><th colspan="3">ESPESOR SOLERA (m)</th></tr> <tr><td>ZAHORRA (e zah)</td><td></td><td>0,300</td></tr> <tr><td>SOLERA (e sol)</td><td></td><td>0,200</td></tr> </table>			VIGA CENTRADORA			ANCHO (b)	(m)	0,550	ESPESOR SOLERA (m)			ZAHORRA (e zah)		0,300	SOLERA (e sol)		0,200
VIGA CENTRADORA																	
ANCHO (b)	(m)	0,550															
ESPESOR SOLERA (m)																	
ZAHORRA (e zah)		0,300															
SOLERA (e sol)		0,200															
<table> <tr><th colspan="3">PILAR MEDIANERÍA</th></tr> <tr><td>LARGO (a)</td><td>(m)</td><td>0,300</td></tr> <tr><td>ANCHO (b)</td><td>(m)</td><td>0,450</td></tr> </table>			PILAR MEDIANERÍA			LARGO (a)	(m)	0,300	ANCHO (b)	(m)	0,450						
PILAR MEDIANERÍA																	
LARGO (a)	(m)	0,300															
ANCHO (b)	(m)	0,450															
<table> <tr><th colspan="3">PILAR INTERIOR</th></tr> <tr><td>LARGO (a)</td><td>(m)</td><td>0,300</td></tr> <tr><td>ANCHO (b)</td><td>(m)</td><td>0,450</td></tr> </table>			PILAR INTERIOR			LARGO (a)	(m)	0,300	ANCHO (b)	(m)	0,450						
PILAR INTERIOR																	
LARGO (a)	(m)	0,300															
ANCHO (b)	(m)	0,450															
<table> <tr><th colspan="3">LUZ (m)</th></tr> <tr><td>PÓRTICO</td><td></td><td>6,000</td></tr> <tr><td>CENTRADORA</td><td></td><td>3,675</td></tr> </table>			LUZ (m)			PÓRTICO		6,000	CENTRADORA		3,675						
LUZ (m)																	
PÓRTICO		6,000															
CENTRADORA		3,675															
ESFUERZOS																	
<table> <tr><th colspan="3">PILAR MEDIANERÍA</th></tr> <tr><td>N (kN)</td><td></td><td>517,96</td></tr> <tr><td>V (kN)</td><td></td><td>13,86</td></tr> <tr><td>M (kN·m)</td><td></td><td>18,41</td></tr> </table>			PILAR MEDIANERÍA			N (kN)		517,96	V (kN)		13,86	M (kN·m)		18,41			
PILAR MEDIANERÍA																	
N (kN)		517,96															
V (kN)		13,86															
M (kN·m)		18,41															
<table> <tr><th colspan="3">PILAR INTERIOR</th></tr> <tr><td>N (kN)</td><td></td><td>853,87</td></tr> <tr><td>V (kN)</td><td></td><td>0,00</td></tr> <tr><td>M (kN·m)</td><td></td><td>0,00</td></tr> </table>			PILAR INTERIOR			N (kN)		853,87	V (kN)		0,00	M (kN·m)		0,00			
PILAR INTERIOR																	
N (kN)		853,87															
V (kN)		0,00															
M (kN·m)		0,00															
MATERIALES																	
<table> <tr><th colspan="3">TERRENO σ_{adm} (kN/m²)</th></tr> <tr><td></td><td></td><td>200,00</td></tr> <tr><th colspan="3">ZAHORRA γ (kN/m³)</th></tr> <tr><td></td><td></td><td>18,00</td></tr> </table>			TERRENO σ_{adm} (kN/m ²)					200,00	ZAHORRA γ (kN/m ³)					18,00			
TERRENO σ_{adm} (kN/m ²)																	
		200,00															
ZAHORRA γ (kN/m ³)																	
		18,00															
RESULTADOS																	
<table> <tr><th colspan="3">REACCIÓN RESULTANTE (kN)</th></tr> <tr><td>ZAPATA MEDIANERÍA</td><td></td><td>704,97</td></tr> <tr><td>ZAPATA INTERIOR</td><td></td><td>966,19</td></tr> </table>			REACCIÓN RESULTANTE (kN)			ZAPATA MEDIANERÍA		704,97	ZAPATA INTERIOR		966,19						
REACCIÓN RESULTANTE (kN)																	
ZAPATA MEDIANERÍA		704,97															
ZAPATA INTERIOR		966,19															
<table> <tr><th colspan="3">TENSIÓN UNIFORME (kN/m²)</th></tr> <tr><td>ZAPATA MEDIANERÍA</td><td></td><td>193,41</td></tr> <tr><td>ZAPATA INTERIOR</td><td></td><td>190,85</td></tr> </table>			TENSIÓN UNIFORME (kN/m ²)			ZAPATA MEDIANERÍA		193,41	ZAPATA INTERIOR		190,85						
TENSIÓN UNIFORME (kN/m ²)																	
ZAPATA MEDIANERÍA		193,41															
ZAPATA INTERIOR		190,85															
<table> <tr><th colspan="3">VIGA CENTRADORA</th></tr> <tr><td>MOM. FLECTOR (kN·m)</td><td></td><td>242,45</td></tr> </table>			VIGA CENTRADORA			MOM. FLECTOR (kN·m)		242,45									
VIGA CENTRADORA																	
MOM. FLECTOR (kN·m)		242,45															

Tabla 5. Hoja de cálculo para resolución de zapata de medianería con viga centradora

3.2.2.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE LA VIGA SUPERIOR

El cálculo por métodos convencionales de una zapata de medianería equilibrada mediante la colaboración de la viga superior se describe en el apartado 2.3. del Capítulo 2. En la Fig.34 se reproduce el esquema de cálculo de dicho modelo.

Fig.34. Esquema de cálculo de zapata de medianería con colaboración de la viga superior

Para agilizar la aplicación del proceso de cálculo del modelo convencional a los casos objeto de estudio, se han programado las ecuaciones de dicho modelo (ec. 11, 12, 14, 15, 16 y 18) mediante una hoja de cálculo Excel que se muestra en la Tabla 6. Hay que indicar que la tracción de la viga superior que figura en dicha tabla es de servicio (sin mayorar).

ZAPATA DE MEDIANERÍA CON TIRANTE SUPERIOR																	
DIMENSIONES																	
<table> <tr> <th colspan="3">ZAPATA MEDIANERÍA</th></tr> <tr> <td>LARGO (a_m)</td><td>(m)</td><td>1,350</td></tr> <tr> <td>ANCHO (b_m)</td><td>(m)</td><td>2,700</td></tr> <tr> <td>ALTO (h)</td><td>(m)</td><td>0,700</td></tr> <tr> <td>RESULTANTE (d_m)</td><td>(m)</td><td>0,675</td></tr> </table>			ZAPATA MEDIANERÍA			LARGO (a_m)	(m)	1,350	ANCHO (b_m)	(m)	2,700	ALTO (h)	(m)	0,700	RESULTANTE (d_m)	(m)	0,675
ZAPATA MEDIANERÍA																	
LARGO (a_m)	(m)	1,350															
ANCHO (b_m)	(m)	2,700															
ALTO (h)	(m)	0,700															
RESULTANTE (d_m)	(m)	0,675															
<table> <tr> <th colspan="3">PILAR MEDIANERÍA</th></tr> <tr> <td>LARGO (a_m)</td><td>(m)</td><td>0,300</td></tr> <tr> <td>ANCHO (b_m)</td><td>(m)</td><td>0,450</td></tr> <tr> <td>ALTO (H)</td><td>(m)</td><td>4,000</td></tr> </table>			PILAR MEDIANERÍA			LARGO (a_m)	(m)	0,300	ANCHO (b_m)	(m)	0,450	ALTO (H)	(m)	4,000			
PILAR MEDIANERÍA																	
LARGO (a_m)	(m)	0,300															
ANCHO (b_m)	(m)	0,450															
ALTO (H)	(m)	4,000															
<table> <tr> <th colspan="3">ESPESOR SOLERA (m)</th></tr> <tr> <td>ZAHORRA (e zah)</td><td></td><td>0,300</td></tr> <tr> <td>SOLERA (e sol)</td><td></td><td>0,200</td></tr> </table>			ESPESOR SOLERA (m)			ZAHORRA (e zah)		0,300	SOLERA (e sol)		0,200						
ESPESOR SOLERA (m)																	
ZAHORRA (e zah)		0,300															
SOLERA (e sol)		0,200															
ESFUERZOS																	
<table> <tr> <th colspan="3">PILAR MEDIANERÍA</th></tr> <tr> <td>N_{ms} (kN)</td><td></td><td>504,72</td></tr> <tr> <td>V_{ms} (kN)</td><td></td><td>13,86</td></tr> <tr> <td>M_{ms} (kN·m)</td><td></td><td>37,01</td></tr> </table>			PILAR MEDIANERÍA			N_{ms} (kN)		504,72	V_{ms} (kN)		13,86	M_{ms} (kN·m)		37,01			
PILAR MEDIANERÍA																	
N_{ms} (kN)		504,72															
V_{ms} (kN)		13,86															
M_{ms} (kN·m)		37,01															
<table> <tr> <th colspan="3">PESOS</th></tr> <tr> <td>PILAR P_{pm} (kN)</td><td></td><td>13,50</td></tr> <tr> <td>ZAPATA P_{zm} (kN)</td><td></td><td>63,79</td></tr> <tr> <td>SOLERA P_{sm} (kN)</td><td></td><td>37,91</td></tr> </table>			PESOS			PILAR P_{pm} (kN)		13,50	ZAPATA P_{zm} (kN)		63,79	SOLERA P_{sm} (kN)		37,91			
PESOS																	
PILAR P_{pm} (kN)		13,50															
ZAPATA P_{zm} (kN)		63,79															
SOLERA P_{sm} (kN)		37,91															
MATERIALES																	
<table> <tr> <th colspan="3">TERRENO σ_{adm} (kN/m²)</th></tr> <tr> <td></td><td></td><td>200,00</td></tr> <tr> <th colspan="3">ZAHORRA γ (kN/m³)</th></tr> <tr> <td></td><td></td><td>18,00</td></tr> </table>			TERRENO σ_{adm} (kN/m ²)					200,00	ZAHORRA γ (kN/m ³)					18,00			
TERRENO σ_{adm} (kN/m ²)																	
		200,00															
ZAHORRA γ (kN/m ³)																	
		18,00															
RESULTADOS																	
<table> <tr> <th colspan="3">FUERZAS (kN)</th></tr> <tr> <td>R_{mx} (kN)</td><td></td><td>50,01</td></tr> <tr> <td>R_{my} (kN)</td><td></td><td>619,92</td></tr> <tr> <td>T (kN)</td><td></td><td>63,87</td></tr> </table>			FUERZAS (kN)			R_{mx} (kN)		50,01	R_{my} (kN)		619,92	T (kN)		63,87			
FUERZAS (kN)																	
R_{mx} (kN)		50,01															
R_{my} (kN)		619,92															
T (kN)		63,87															
<table> <tr> <th colspan="3">HUNDIMIENTO</th></tr> <tr> <td>σ (kN/m²)</td><td></td><td>170,07</td></tr> <tr> <td>VALIDEZ</td><td></td><td>CUMPLE</td></tr> </table>			HUNDIMIENTO			σ (kN/m ²)		170,07	VALIDEZ		CUMPLE						
HUNDIMIENTO																	
σ (kN/m ²)		170,07															
VALIDEZ		CUMPLE															
<table> <tr> <th colspan="3">DESPLAZAMIENTO</th></tr> <tr> <td>γ_{seg}</td><td></td><td>4,51</td></tr> <tr> <td>VALIDEZ</td><td></td><td>CUMPLE</td></tr> </table>			DESPLAZAMIENTO			γ_{seg}		4,51	VALIDEZ		CUMPLE						
DESPLAZAMIENTO																	
γ_{seg}		4,51															
VALIDEZ		CUMPLE															

Tabla 6. Hoja de cálculo para resolución de zapata de medianería con colaboración de la viga superior

3.2.2.3. ZAPATA DE ESQUINA CON VIGAS CENTRADORAS

El cálculo por métodos convencionales de una zapata de esquina equilibrada mediante dos vigas centradoras se describe en el apartado 2.4. del Capítulo 2. En la Fig.35 se reproduce el esquema de cálculo de dicho modelo.

Fig.35. Esquema de cálculo de una zapata de esquina con dos vigas centradoras

Al igual que en los dos modelos anteriores, se muestra en la Tabla 7 la hoja de cálculo utilizada para agilizar el proceso de cálculo de los diferentes casos planteados.

ZAPATA DE ESQUINA CON DOS VIGAS CENTRADORAS			
DIMENSIONES			
ZAPATA ESQUINA LARGO (a) (m) 1,350 ANCHO (b) (m) 2,700 ALTO (h) (m) 0,600		ZAPATA MEDIANERÍA 1 LARGO (a) (m) 2,300 ANCHO (b) (m) 2,300 ALTO (h) (m) 0,600	
PILAR ESQUINA LARGO (a) (m) 0,300 ANCHO (b) (m) 0,300		PILAR MEDIANERÍA 1 LARGO (a) (m) 0,300 ANCHO (b) (m) 0,300	
		ZAPATA MEDIANERÍA 2 LARGO (a) (m) 1,800 ANCHO (b) (m) 1,800 ALTO (h) (m) 0,600	
		PILAR MEDIANERÍA 2 LARGO (a) (m) 0,300 ANCHO (b) (m) 0,300	
		VIGAS CENTRADORAS ANCHO (b) (m) 0,550 ESPESOR SOLERA (m) ZAHORRA (e zah) 0,300 SOLERA (e sol) 0,200	
		LUZ (m) PÓRT. - CRUJÍA 6,000 CENTRADORAS 3,650	
ESFUERZOS			
PILAR ESQUINA (kN y kN-m) N <input type="text"/> M _y <input type="text"/> M _x 9,51 V _x <input type="text"/> V _y 12,62		PILAR MEDIANER. 1 (kN y kN-m) N <input type="text"/> M _y <input type="text"/> M _x 9,51 V _x <input type="text"/> V _y 12,62	
		PILAR MEDIANER. 2 (kN y kN-m) N <input type="text"/> M _y <input type="text"/> M _x 9,51 V _x <input type="text"/> V _y 12,62	
MATERIALES TERRENO σ_{adm} (kN/m²) 200,00 ZAHORRA γ (kN/m³) 18,00			
RESULTADOS			
ZAPATA ESQUINA RESULTANTE (kN) 139,02 TENSION σ (kN/m ²) 138,92		ZAPATA MEDIANERÍA 1 RESULTANTE (kN) <input type="text"/> TENSION σ (kN/m ²) <input type="text"/>	
		ZAPATA MEDIANERÍA 2 RESULTANTE (kN) 0,223 TENSION σ (kN/m ²) 33,75	
		VIGAS CENTRADORAS MOM. FLECTOR (kN-m) -106,86	

Tabla 7. Hoja de cálculo para resolución de zapata de esquina con dos vigas centradoras

3.3. MODELIZACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Calculados los casos planteados en las distintas etapas por métodos convencionales, se realiza un cálculo alternativo de los mismos generando modelos de elementos finitos. El desarrollo de los citados modelos se ha llevado a cabo con ayuda del programa ANSYS, tanto en su versión ANSYS Clásico, como en su versión ANSYS Workbench.

Para poder contrastar los dos tipos de modelos en igualdad de condiciones, los modelos de elementos finitos se construyen con las mismas dimensiones obtenidas para la cimentación en el cálculo por métodos convencionales. Según se expuso en el apartado 2.2.1, cuando se utiliza viga centradora la reacción resultante para la zapata de medianería es superior a la que tendría si trabajase como zapata aislada (ec.3), por ello, suele ser los modelos convencionales de zapata de medianería con viga centradora (o en su caso de esquina) los que condicionan normalmente el tamaño de la cimentación.

El cálculo de una estructura por elementos finitos se divide habitualmente en tres fases o etapas, que son:

- Preproceso
- Cálculo
- Postproceso

El preproceso corresponde a la fase inicial de definición de datos geométricos, mecánicos y de cargas de la estructura. El cálculo es la fase en la cual el ordenador, internamente, procede a averiguar la solución del problema estructural (cálculo de desplazamientos, esfuerzos y tensiones en distintos puntos de la estructura). Finalmente el postproceso implica la fase de comunicación con el ordenador para obtener físicamente los resultados que él previamente ha calculado.

Ciertamente estas mismas tres fases están presentes en el cálculo de cualquier estructura por métodos matriciales (los más frecuentes en software de cálculo de estructuras), sin embargo, en el caso del cálculo de estructuras por elementos finitos, las fases de cálculo y postproceso, debido a su mayor complejidad respecto del cálculo matricial, acaban adquiriendo entidad propia y diferenciada.

Se describen a continuación, en los siguientes apartados, los detalles de la ejecución de los modelos de elementos finitos para las distintas etapas de la fase experimental de la tesis doctoral. Asimismo, en los Anejos I y II, se ofrecen los listados de comandos, en lenguaje APDL de ANSYS, que permiten desarrollar los modelos de elementos finitos empleados.

3.3.1. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPA I

3.3.1.1. PREPROCESO

El preproceso hace referencia al conjunto de operaciones que se realizan con el fin definir los datos de partida para el cálculo de la estructura. Esquemáticamente, el preproceso está integrado por los siguientes pasos:

- Modelado
- Definición de materiales
- Mallado
- Definición de coacciones
- Definición de contactos
- Aplicación de cargas

Algunos de estos pasos deben realizarse forzosamente en el orden descrito, otros en cambio no. Así por ejemplo, es imposible llevar a cabo el mallado de los elementos finitos si previamente no se ha modelado la estructura ni se han definido las propiedades de los materiales. Asimismo, la definición de coacciones, contactos y cargas debe realizarse posteriormente al mallado del modelo, pero el orden de estas tres últimas operaciones entre sí puede alterarse.

MODELADO

La primera operación consiste en construir físicamente (más bien virtualmente) la estructura a calcular y su entorno, utilizando para ello volúmenes sólidos que reproduzcan lo más fielmente posible la forma y dimensiones de la estructura real que se quiere modelizar. Se trata, en la práctica, de construir una maqueta virtual con volúmenes sólidos.

En concreto, para los casos definidos en el Etapa I (apartado 3.1.3.1), se han modelado los siguientes elementos (Fig.36):

- Un volumen de suelo de 10 m de profundidad y 5 m de anchura a cada lado del pórtico por cada uno de sus cuatro caras
- La cimentación del pórtico con zapata de medianería y viga centradora, con su volumetría real y las mismas dimensiones obtenidas por métodos convencionales
- El pórtico analizado completo, con todas sus vigas y pilares
- Una solera, compuesta por una capa de zahorra compactada de 300 mm de espesor y la solera propiamente dicha, de hormigón armado de 200 mm de espesor

Fig.36. Modelado de un caso tipo de la Etapa I

En los modelos convencionales el pórtico, la cimentación y el suelo se contemplan por separado. Por un lado, se calcula el pórtico por métodos matriciales considerando las bases de los pilares como empotramientos perfectos. Por otro, se calcula la cimentación de forma independiente, recibiendo las reacciones de los pilares (obtenidas del pórtico) y una hipotética distribución de tensiones de contacto del terreno. Y, finalmente se estudia el comportamiento del suelo frente a las tensiones de contacto que le transmite la cimentación.

Frente a ello, la maqueta virtual descrita en la Fig.36 integra en un único modelo tanto el pórtico, como su cimentación, como el suelo que los recibe. De este modo se pueden analizar de forma simultánea las interacciones que se producen entre los distintos elementos, de una forma mucho más ajustada a la realidad, sin recurrir a condiciones de contorno simplificadas en las fronteras entre los distintos elementos.

Con el modelado adoptado en la Fig.36, además, se da respuesta a otras críticas planteadas a los métodos convencionales. En este modelo de elementos finitos se contempla el trabajo conjunto y simultáneo de la viga centradora y de la viga de la primera planta y, por su parte,

se considera la volumetría real de la cimentación, sin considerar que el conjunto de las zapatas y la viga centradora es un elemento lineal único.

A pesar de las posibilidades del método, es preciso analizar la magnitud del modelo creado con el fin de encontrar el punto óptimo entre tiempo de cálculo y precisión en el resultado. En este caso, el volumen de suelo es de tal magnitud, que el número de elementos que genera es enorme y el tiempo de cálculo disparatado. Aprovechando la simetría del modelo, es posible generar solamente una de las mitades del mismo, lo cual reduce considerablemente el tiempo de cálculo, sin renunciar lo más mínimo a la precisión en el resultado, si se establecen las adecuadas condiciones de contorno en el plano de simetría.

DEFINICIÓN DE MATERIALES

Tal y como ya se indicó en el apartado 3.1.3.1, la Etapa I de la presente tesis doctoral está constituida por el trabajo de investigación desarrollado por el doctorando para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (D.E.A.) (Galletero, P., 2009). Dicho trabajo, considerado como punto inicial de la línea de investigación, se realiza bajo la hipótesis de comportamiento elástico lineal de todos los materiales implicados en el modelo (hormigón armado y suelo).

Con dicho comportamiento, los parámetros que es preciso definir en cada uno de los materiales son los siguientes:

- Módulo de elasticidad longitudinal (E)
- Coeficiente de Poisson (μ)
- Peso específico (γ)

HORMIGÓN ARMADO

El pórtico y su cimentación se construirán con hormigón armado HA - 25, con una resistencia característica a compresión a los 28 días de edad de $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

Para el módulo de elasticidad longitudinal se utilizará (según el art.39.6 de la EHE 08) el módulo de deformación longitudinal secante a 28 días (E_{cm}) dado por la ec.53 en función de la resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días (f_{cm}):

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (\text{ec.53})$$

Cuyo valor para el caso concreto del hormigón HA - 25 es:

$$E_{cm} = 8\,500 \cdot \sqrt[3]{25 + 8} = 26\,986 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ec.54})$$

Por su parte, de acuerdo con el art.39.9 de la EHE 08, se adopta para el coeficiente de Poisson del hormigón armado el valor:

$$\nu_c = 0,2$$

Y, finalmente, se utiliza como valor del peso específico del hormigón armado:

$$\gamma_{ho} = 25 \text{ kN/m}^3$$

SUELO

Tal y como se refleja en el apartado 3.1.3.1. se contemplan en la Etapa I tres tipos de suelo, con tensiones admisibles de valor:

- $\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$

Para la determinación del módulo de elasticidad longitudinal del suelo bajo la hipótesis de comportamiento elástico lineal, se ha utilizado como referencia el Anejo D del DB SE - C del C.T.E. Dicho código presenta, por un lado, la Tabla D.23 (Tabla 8) que relaciona el tipo de suelo con el módulo de elasticidad longitudinal (E) y, por otro lado, la Tabla D.25 (Tabla 9) que relaciona el tipo de suelo con la tensión admisible del mismo.

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT} , resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	N_{SPT}	$q_u \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$E \text{ (MN/m}^2\text{)}$
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000	500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000	8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000

Tabla 8. Módulo de elasticidad longitudinal de suelos

Tabla D.25. Presiones admisibles a efectos orientativos

Terreno	Tipos y condiciones	Presión admisible [Mpa]	Observaciones
Rocas	Rocas ígneas y metamórficas sanas ⁽¹⁾ (Granito, diorita, basalto, gneis)	10	Para los valores apuntados se supone que la cimentación se sitúa sobre roca no meteorizada
	Rocas metamórficas foliadas sanas ^{(1), (2)} (Esquistos, pizarras)	3	
	Rocas sedimentarias sanas ^{(1), (2)} Pizarras cementadas, limolitas, areniscas, calizas sin karstificar, conglomerados cementados	1 a 4	
	Rocas arcillosas sanas ^{(2), (4)}	0,5 a 1	
	Rocas diaclasadas de cualquier tipo con espaciamiento de discontinuidades superior a 0,30m, excepto rocas arcillosas	1	
	Calizas, areniscas y rocas pizarrosas con pequeño espaciamiento de los planos de estratificación ⁽³⁾	-	
	Rocas muy diaclasadas o meteorizadas ⁽³⁾	-	
Suelos granulares (% finos inferior al 35% en peso)	Gravas y mezclas de arena y grava, muy densas	>0,6	Para anchos de cimentación (B) mayor o igual a 1 m y nivel freático situado a una profundidad mayor al ancho de la cimentación (B) por debajo de ésta
	Gravas y mezclas de grava y arena, medianamente densas a densas	0,2 a 0,6	
	Gravas y mezclas de arena y grava, sueltas	<0,2	
	Arena muy densa	>0,3	
	Arena medianamente densa	0,1 a 0,3	
	Arena suelta	<0,1	
Suelos finos (% de finos superior al 35% en peso)	Arcillas duras	0,3 a 0,6	Los suelos finos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados en los que sean de esperar asientos de consolidación serán objeto de un estudio especial. Los suelos arcillosos potencialmente expansivos serán objeto de un estudio especial
	Arcillas muy firmes	0,15 a 0,3	
	Arcillas firmes	0,075 a 0,15	
	Arcillas y limos blandos	<0,075	
	Arcillas y limos muy blandos		

Tabla 9. Tensiones admisibles de suelos

Enlazando ambas tablas, mediante el factor común del tipo de suelo, se obtiene la siguiente asociación de módulos de elasticidad longitudinal con tensiones admisibles:

$$\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2 \quad \Rightarrow \quad E_s = 28 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2 \quad \Rightarrow \quad E_s = 59 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2 \quad \Rightarrow \quad E_s = 88 \text{ N/mm}^2$$

Para el coeficiente de Poisson del suelo se adopta el valor:

$$\nu_{su} = 0,3$$

Y, finalmente, se ha considerado como valor del peso específico del suelo:

$$\gamma_{su} = 18 \text{ kN/m}^3$$

MALLADO

El mallado es el proceso por el cual se divide la materia de los diferentes volúmenes sólidos que componen un modelo, en una serie de porciones discretas de determinado tamaño, denominadas **elementos finitos** (Fig.37). Existe una enorme similitud entre el concepto de elemento finito y el de elemento diferencial empleado en el cálculo diferencial e integral. El proceso de mallado debe cubrir por completo la materia de los sólidos en cuestión, sin solapes, de tal forma que no puede quedar ninguna porción de materia sin asociar a un elemento finito, ni puede darse el caso de una porción de materia vinculada a varios elementos finitos al mismo tiempo.

Fig.37. Concepto de mallado

Cada elemento finito va asociado a una serie de puntos singulares llamados **nodos**, que se constituyen en puntos de integración del proceso de cálculo, es decir, puntos en los que se obtienen resultados de desplazamientos, fuerzas y tensiones. Los sucesivos elementos finitos se consideran vinculados por medio de los nodos.

Existen muchos posibles tipos de elementos finitos, tanto por las posibles formas de los mismos, como por la cantidad de nodos de referencia que emplean. En este caso, se han empleado elementos hexaédricos rectos con 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo (paralelepípedos con un nodo en cada uno de los vértices) (Fig.38) (Oñate, E. 1995). Dicho elemento presenta la denominación de SOLID 45 en el programa ANSYS empleado para el desarrollo de los modelos de elementos finitos.

Fuente: Oñate, E (1995)

Fig.38. Elemento hexaédrico recto de 8 nodos

Además del tipo de elemento elegido, una cuestión fundamental para el proceso de cálculo es la decisión del tamaño del mismo. Dicha decisión tiene una repercusión directa sobre dos parámetros muy importantes, que son, la precisión en los resultados y el tiempo necesario para el cálculo. Si el tamaño de los elementos es excesivamente grande, habrá muy pocos elementos, el tiempo de cálculo será muy reducido, pero los resultados serán muy groseros. Por el contrario, si se emplean elementos extremadamente pequeños (casi diferenciales), los resultados serán muy precisos, pero la cantidad de elementos será enorme y el tiempo de cálculo posiblemente inadmisibles. Es por ello preciso encontrar el punto óptimo entre los parámetros tamaño de elemento - precisión - tiempo.

En el caso del presente trabajo de investigación se han planteado elementos de 0,100 m de tamaño en los sólidos de hormigón armado y 0,250 m en los sólidos de suelo, mallando solamente la mitad del modelo en función de la simetría del mismo. Con dichos valores (y gracias a la simetría) se obtienen modelos de tan solo 80000 elementos que, incluso con un ordenador de última generación en este momento, supone un tiempo de cálculo de varias horas para cada uno de los casos.

En la Fig.39 se ofrece una imagen del modelo mallado, una vez asignadas las propiedades de los materiales y los tamaños de elemento.

Fig.39. Modelo tipo mallado

DEFINICIÓN DE COACCIONES

Las coacciones definen las vinculaciones del modelo con el exterior y están constituidas por grados de libertad absolutamente impedidos. El tipo de elemento elegido (hexaedro o paralelepípedo recto de 8 nodos) presenta en cada nodo tres posibles grados de libertad de tipo desplazamiento, uno por cada una de las tres direcciones del espacio (x , y , z). Por ello, la definición de coacciones supone la decisión de cuáles son los nodos que tienen impedido el desplazamiento en alguna de las direcciones indicadas.

Es importante señalar que en esta tesis doctoral se persigue conocer el comportamiento real de la estructura en el contacto cimiento terreno, por ello, en contra de lo que suele hacerse en el cálculo de pórticos por método matricial, no se va a imponer ninguna coacción al pórtico ni a su cimentación, para que sea el propio M.E.F. el que describa la interacción suelo-estructura.

Por el motivo indicado, salvo las necesarias condiciones de contorno imprescindibles para modelizar la simetría, solo se impondrán coacciones a los nodos extremos del volumen de suelo. Todos los nodos incluidos en la cara inferior del volumen de suelo tendrán coartados los tres grados de libertad, con desplazamiento impedido en todas las direcciones del espacio. Por su parte, todos los nodos incluidos en las cuatro caras perimetrales verticales del volumen de suelo, tendrán impedido el desplazamiento en la dirección perpendicular a la cara en cuestión. Finalmente, todos los nodos de la cara superior del volumen de suelo tendrán desplazamiento libre.

DEFINICIÓN DE CONTACTOS

Cuando se produce una discontinuidad entre dos materiales es preciso definir el tipo de contacto que se produce entre ellos, con el fin de poder realizar el cálculo. En caso contrario se genera un mecanismo incapaz de encontrar equilibrio estático.

En los modelos de elementos finitos utilizados en la presente tesis doctoral se han tenido en cuenta los contactos, tanto entre las zapatas y el terreno, como entre la viga centradora y el terreno. Asimismo, se ha considerado el contacto entre la solera y la zahorra compactada, así como entre ésta y la cimentación.

Todos los contactos indicados se han definido como contactos por compresión y fricción. Respecto de la compresión hay que señalar que el contacto se opone a la penetración de un sólido en el otro mediante la correspondiente tensión de contacto pero, sin embargo, no se opone al posible despegue de un sólido respecto del otro. Por su parte, los contactos definidos también implican una oposición al deslizamiento mediante la correspondiente fuerza de rozamiento. Para el cálculo de la fuerza de rozamiento se utiliza como coeficiente de rozamiento (μ) el dado por la ec.55 en función del ángulo de rozamiento interno (ϕ).

$$\mu = \operatorname{tg} \left(\frac{2}{3} \cdot \phi \right) \quad (\text{ec.55})$$

Para el valor del ángulo de rozamiento interno del suelo se ha utilizado como referencia la Tabla D.27 (Tabla 10) del DB SE - C del C.T.E.

Tabla D.27. Propiedades básicas de los suelos

Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m ³)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	Grava	19 – 22	34° - 45°
	Arena	17 – 20	30° - 36°
	Limo	17 – 20	25 – 32°
	Arcilla	15 – 22	16° – 28°
Rellenos	Tierra vegetal	17	25°
	Terraplén	17	30°
	Pedraplén	18	40°

Tabla 10. Ángulo de rozamiento interno de suelos

Dada la evidente dificultad de vinculación de esta tabla con la Tabla 8 que asocia tensiones admisibles con tipos de suelo, se ha adoptado un ángulo de rozamiento medio de valor $\phi = 30^\circ$ vinculado a la tensión admisible $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$ y una oscilación de 5° por encima y por debajo de dicho valor para las otras dos tensiones admisibles, quedando el siguiente resultado:

$$\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \phi = 25^\circ$$

$$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

$$\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \phi = 35^\circ$$

El cálculo de los contactos por compresión se desarrolla en el programa ANSYS por aplicación del algoritmo de Lagrange ampliado.

APLICACIÓN DE CARGAS

Los modelos de elementos finitos se calculan con las mismas cargas que los modelos convencionales, obtenidas previamente en el apartado 3.1.2 y reflejadas en las Fig.19 y 20.

La única particularidad que puede comentarse es que las cargas se han aplicado en los nodos de los elementos y se ha tenido que proceder al cálculo de la magnitud de la carga por nodo en función de los datos de las Fig.19 y 20 y del tamaño de los correspondientes elementos finitos.

3.3.1.2. CÁLCULO

El cálculo de los modelos de elementos finitos de la Etapa I se realiza a partir de la hipótesis de comportamiento elástico lineal de cada uno de los materiales, considerados de forma individual. Ahora bien, si se analiza el conjunto del modelo, aparece una no linealidad, constituida por la discontinuidad del material en los correspondientes contactos. Por ello, aunque de forma individual el cálculo es lineal, el modelo completo es no lineal.

Un cálculo lineal con un programa de elementos finitos es tan sencillo como con un programa de cálculo matricial, simplemente hay que ordenar el cálculo y esperar el resultado. En cambio, cuando el cálculo es no lineal por algún motivo, el proceso se complica, ya que la solución se obtiene por métodos numéricos de aproximaciones sucesivas. En el caso concreto del programa ANSYS se utiliza el método de Newton - Raphson, cuya aplicación se representa esquemáticamente en la Fig.40:

Fig.40. Método de cálculo numérico de Newton - Raphson

Con los citados métodos de cálculo numérico, la solución se obtiene por aplicación de sucesivos pasos de carga, siendo necesaria la definición de la amplitud de los pasos de carga a utilizar por parte de la persona que controla el proceso de cálculo. Si se programan pocos pasos de carga con una amplitud muy grande, es posible que el cálculo numérico no converja y no se obtenga solución. Por el contrario, si se plantean muchos pasos de carga de muy poca amplitud, es posible que el proceso de cálculo se alargue innecesariamente. Por ello, es preciso encontrar la magnitud óptima de los pasos de carga empleados, de modo que se consiga la convergencia del problema de cálculo numérico en el menor tiempo posible.

En el caso de los modelos de elementos finitos empleados en este estudio se encuentra convergencia tras 10 pasos de carga o ciclos de cálculo.

El hecho de la indeterminación en el número de ciclos de cálculo a emplear cuando el cálculo es no lineal, le concede a la fase de cálculo del M.E.F. un protagonismo propio que no tiene en modo alguno el cálculo matricial lineal y que puede conducir, si no se controla bien el proceso, a la ausencia de convergencia y a la imposibilidad de obtener la solución del modelo.

3.3.1.3. POSTPROCESO

Es la última fase del proceso del cálculo de una estructura por elementos finitos y tiene por objeto la obtención de resultados de forma cómoda e inteligible.

Al hablar de resultados del cálculo de una estructura por elementos finitos, hay que tener que el método discretiza la materia en una serie de elementos finitos asociados a nodos y que lo que se hace realmente es calcular determinados parámetros en dichos nodos. En concreto, los resultados que se obtienen son los desplazamientos y las tensiones (tanto normales como tangenciales) para todos los nodos y las fuerzas o reacciones que se generan en los nodos coaccionados.

Dichos resultados se obtienen físicamente en dos formatos, o bien gráficos de la estructura con escalas cromáticas para indicar las intensidades de los desplazamientos y/o tensiones (Fig.41), o bien listados con indicación del número del nodo y el valor numérico del desplazamiento y/o la tensión en dicho nodo (Fig.42).

Fig.41. Salida gráfica de resultados con indicación de valor por escala cromática

```

PRINT S  NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 7
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN ROTATED GLOBAL COORDINATES,
WHICH INCLUDE RIGID BODY ROTATION EFFECTS

  NODE  SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
1520 0.13420E+06 0.63183E+06 -46896. 520.78 -0.12084E+06 -410.79
1521 0.11801E+06 0.28697E+06 -28780. 1498.7 -0.12629E+06 -495.02
1522 0.13271E+06 -70658. -16112. 586.59 -0.12573E+06 920.89
1523 0.14940E+06 -0.40480E+06 545.82 -1504.2 -0.11922E+06 687.06
1524 0.16045E+06 -0.70613E+06 18112. -2104.1 -0.11045E+06 -192.28
1525 0.17897E+06 -0.98859E+06 31642. -1320.2 -0.10160E+06 -186.37
1526 0.19391E+06 -0.12461E+07 44546. -1526.1 -93971. 266.31
1527 0.19859E+06 -0.14771E+07 58962. -1339.6 -86479. -337.28
1528 0.20821E+06 -0.16923E+07 69141. -765.11 -79015. -100.85
1529 0.21051E+06 -0.18858E+07 81431. 76.570 -71698. -270.55
1530 0.22463E+06 -0.20684E+07 88277. 421.22 -64917. -241.54
1531 0.22948E+06 -0.22279E+07 97630. 487.99 -58564. 216.10
1532 0.23529E+06 -0.23708E+07 0.10526E+06 -33.239 -52592. 145.23
1533 0.24003E+06 -0.24972E+07 0.11198E+06 -191.46 -46696. 109.37
1534 0.23873E+06 -0.26067E+07 0.12044E+06 -191.27 -41126. 25.779
1535 0.24818E+06 -0.27105E+07 0.12362E+06 -265.07 -35746. 73.363
1536 0.24742E+06 -0.27973E+07 0.13102E+06 -358.75 -30647. 82.244
1537 0.26121E+06 -0.28814E+07 0.13205E+06 -466.73 -25769. 122.12

```

Fig.42. Listado con relación de tensiones correspondientes a diferentes nodos

El manejo de los resultados de un cálculo estructural por elementos finitos es una tarea laboriosa y compleja. Tras una brillante toma de contacto inicial con los gráficos cromáticos (que sorprenden por su vistosidad) es preciso pasar a los listados, ya que los gráficos permiten una rápida visión cualitativa de la solución pero, si se quieren resultados concretos de carácter cuantitativo, no queda más remedio que trabajar con los listados numéricos. Dichos listados numéricos pueden llegar a ser un auténtico problema, ya que, tan malo como no tener información, es tenerla en exceso si no se puede gestionar. De nada sirve un listado con las tensiones y desplazamientos de los nodos de 80 000 elementos si, para empezar, no se sabe quién es quién.

Así pues, la primera función importante que implica el postproceso es el desarrollo de herramientas de identificación y selección de nodos y elementos que permitan, por un lado, identificar cómodamente a quién corresponde un determinado número de nodo, dónde se encuentra, a qué sección pertenece... y, por otro, ser capaces de seleccionar un determinado conjunto de nodos o elementos para obtener resultados (desplazamientos y/o tensiones) solamente de dichos nodos o elementos. De este modo se obtienen listados manejables e interpretables de componentes conocidos.

Superada esta primera cuestión, surge un segundo problema. Los modelos convencionales y los de elementos finitos no hablan el mismo idioma y sus resultados no son, en principio, comparables. Efectivamente, los modelos convencionales hacen referencia, por ejemplo, a la resultante del bloque completo de tensiones de contacto bajo una zapata o al momento flector que afecta a una sección completa de la viga centradora, en cambio, para el modelo de elementos finitos no existe la sección de la viga centradora, lo que existen son los múltiples elementos y nodos que integran dicha sección. Por ello, los modelos de elementos finitos no proporcionan directamente el momento flector que afecta a la sección, sino más bien, las tensiones en los diferentes nodos que componen dicha sección (Fig.43) que son, en principio, resultados distintos aunque puedan estar relacionados.

Fig.43. Sección transversal y relación de elementos y nodos que la componen

Para hacer equiparables los resultados y poder contrastarlos, utilizando el símil de los elementos finitos como “elementos diferenciales”, es preciso “integrar” el valor de las tensiones a lo largo de todos los “elementos diferenciales” que componen la sección.

Conocido el tamaño de los elementos, es posible determinar la superficie tributaria asignada a cada nodo. A partir de este dato, el “diferencial de fuerza” que aporta un nodo se obtendrá mediante el producto de la tensión en el mismo por su superficie tributaria y, el “diferencial de momento” que aporta el citado nodo respecto de un eje, se obtendrá multiplicando su diferencial de fuerza por la distancia al eje considerado. Finalmente, la fuerza y el momento total correspondientes al conjunto de la sección considerada se calculan sumando (integrando) el conjunto de diferenciales de fuerza y diferenciales de momento de la totalidad de la sección.

El planteamiento descrito puede realizarse, exportando los datos de tensión a una hoja de cálculo en la que se programa el citado proceso de integración o, en el caso de ANSYS, utilizando determinados comandos que ejecutan la integración en cuestión (Fig.44).

Fig.44. Proceso de integración de tensiones para una sección

Finalizado el proceso de integración, los resultados serán equiparables y se puede proceder al contraste de resultados y a su análisis e interpretación.

3.3.2. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPAS II Y III

3.3.2.1. PREPROCESO. DEFINICIÓN DE MATERIALES

Los modelos de elementos finitos desarrollados en la Etapa I se llevan a cabo con un planteamiento elástico lineal para todos los materiales implicados en los mismos. Dicho planteamiento supone tres hipótesis básicas de partida:

- Comportamiento elástico del material
- Diagrama tensión - deformación lineal
- Capacidad resistente isótropa

El comportamiento elástico de un material supone la deformación del mismo ante la aplicación de cargas externas y la recuperación íntegra de la forma y dimensiones originales al retirarse la carga aplicada. Un diagrama tensión - deformación lineal, por su parte, plantea una relación proporcional entre tensiones y deformaciones a lo largo de todo el recorrido resistente del material (Fig.45), desde su entrada en carga hasta alcanzar su máxima tensión admisible, siendo el módulo de elasticidad del material (E) la constante de proporcionalidad o pendiente de la recta. Por último, en un cálculo elástico lineal se presupone un comportamiento isótropo del material, con igual capacidad resistente en cualquier punto con independencia de la dirección y el sentido considerado.

Fig.45. Comportamiento elástico lineal isótropo

La propuesta elástico lineal no se ajusta al comportamiento real del hormigón. Frente a lo planteado en la Etapa I, el hormigón presenta una respuesta fundamentalmente plástica (solo podría considerarse un comportamiento elástico en estados iniciales de aplicación de carga). El diagrama tensión deformación del hormigón no es en absoluto lineal rectilíneo, respondiendo más bien a un diagrama parabólico rectangular (Fig.46). Y, por último, el

hormigón es el claro ejemplo de material anisótropo, resistente a compresión pero con una muy reducida (prácticamente nula) resistencia a tracción. Este último dato conduce, además, a un fenómeno muy característico de los elementos resistentes de hormigón, como es la fisuración de las zonas traccionadas del mismo con la consecuente necesidad de armado o cosido de las zonas traccionadas y la pérdida de inercia y rigidez de dichos elementos.

Fig.46. Diagrama parabólico rectangular del hormigón y fisuración de zonas traccionadas

Con independencia de los cambios introducidos en las variables a estudiar en las Etapas II y III, ya comentados en los apartados 3.1.3.2. y 3.1.3.3, la principal diferencia y aportación de estas Etapas II y III es el desarrollo de un planteamiento más ajustado al comportamiento real del hormigón armado como material estructural. La elaboración de los modelos de elementos finitos se lleva a cabo con ayuda del programa de cálculo por elementos finitos ANSYS Clásico en la Etapa I y ANSYS Workbench en las Etapas II, III y IV. En este sentido, ANSYS dispone de un tipo de elemento, el SOLID 65, capaz de utilizar el material CONCRETE que contempla, tanto la diferente resistencia del hormigón a tracción y compresión, como el hecho de la fisuración y fractura de los elementos de hormigón en aquellas zonas que superan la limitada resistencia a tracción del mismo. Las Etapas II y III utilizan estas herramientas en la confección de los modelos de elementos finitos, de acuerdo con los datos y propiedades que a continuación se detallan.

- Los pórtico y su cimentación, al igual que en la Etapa I, se construirán con hormigón HA - 25, con una resistencia característica a compresión a los 28 días de edad de:

$$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$$

- Para el módulo de elasticidad longitudinal se utiliza (según el art.39.6 de la EHE 08) el módulo de deformación longitudinal secante a 28 días (E_{cm}) dado por la ec.53 en función de la resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días (f_{cm}):

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (\text{ec.56})$$

Cuyo valor para el caso concreto del hormigón HA - 25 es:

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{25 + 8} = 26986 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ec.57})$$

- Por su parte, de acuerdo con el art.39.9 de la EHE 08, se adopta para el coeficiente de Poisson del hormigón el valor:

$$\nu_c = 0,2$$

- Se utiliza como valor del peso específico del hormigón armado:

$$\gamma_{ho} = 25 \text{ kN/m}^3$$

- El diagrama tensión deformación del hormigón definido para el cálculo es parabólico rectangular, como el representado en la Fig.46, que responde a la ecuación dada por la norma EHE-08:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^n \right] \quad \text{si } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} \quad (\text{ec.58})$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{si } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$$

con $n = 2$ y $\varepsilon_{c0} = 0,002$ por tratarse de hormigón HA-25

- Y, por último, para la resistencia característica a tracción del hormigón se adopta la expresión de la EHE-08:

$$\sigma_{ct,k} = 0,21 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{ec.59})$$

Cuyo valor para el caso concreto del hormigón HA - 25 es:

$$\sigma_{ct,k} = 0,21 \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,21 \sqrt[3]{25^2} = 1,80 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ec.60})$$

En el Anejo II se ofrecen los listados detallados de programación en lenguaje APDL de ANSYS con los parámetros empleados en la configuración, tanto de SOLID 65 como del material CONCRETE.

Es preciso indicar que el empleo del tipo de elemento SOLID 65 y del material CONCRETE conduce a importantes cambios en la manera de abordar el preproceso, especialmente en su fase de modelado y en su fase de mallado.

3.3.2.2. PREPROCESO. MODELADO

En la Etapa I, con cálculo elástico lineal, solamente se procede al modelado de los volúmenes sólidos de la estructura de hormigón, no existiendo la necesidad de definir ningún tipo de armadura, por lo que las estructuras de hormigón armado sencillamente se modelan, en cálculo elástico lineal, como si fuesen estructuras de hormigón en masa.

Ahora bien, del mismo modo que una estructura real de hormigón ejecutada con hormigón en masa colapsaría simplemente con la aplicación de unas reducidas cargas, siendo necesaria la disposición de las correspondientes armaduras, un modelo de elementos finitos elaborado con SOLID 65 y material CONCRETE colapsa (no converge) si se modela solo con volúmenes sólidos de hormigón (hormigón en masa), siendo preciso entrar en un laborioso proceso de armado del modelo de elementos finitos, modelando todas y cada una de las armaduras, exactamente las mismas armaduras que necesitaría la estructura real para su correcto funcionamiento.

Fig.47. Modelado de pórtico tipo. Vista general exterior

En la Fig.47 se muestra el modelado de un pórtico tipo con su vista exterior, en la que puede observarse el volumen de suelo considerado, las zapatas de cimentación con la viga centradora y el entramado de vigas y pilares del pórtico. Por su parte, en la Fig.48 se muestra, gracias a la aplicación de una transparencia, el armado general del pórtico.

Fig.48. Modelado de las armaduras del pórtico tipo

Así, las vigas van provistas de sus armaduras de montaje, con sus correspondientes armaduras de refuerzo, tanto en positivos como en negativos, sin faltar su armadura transversal. Los pilares presentan también sus armaduras longitudinales y transversales

Fig.49. Detalle del modelado de las armaduras de vigas y pilares

Fig.50. Detalle del modelado de las armaduras de vigas y pilares

Por su parte, en la cimentación (Fig.51) se modela la malla de armaduras de la cara traccionada de las zapatas, la armadura de espera de los pilares y las armaduras de montaje refuerzo y cercos de la viga centradora, todo ello con sus correspondientes anclajes.

Fig.51. Detalle del modelado de las armaduras de la cimentación

3.3.2.3. PREPROCESO. MALLADO

El hormigón armado, como material compuesto, constituye un ingenioso invento en el que la casi nula resistencia a tracción del hormigón en masa se resuelve gracias a la colaboración de la armadura de tracción. Las armaduras de acero dispuestas en las zonas traccionadas (Fig.52), desempeñan una función de “cosido”, al conectar las dos orillas de las fisuras del hormigón, impidiendo que se abran de forma irreversible.

Para que el cosido de las fisuras por parte de la armadura pueda llevarse a cabo de forma efectiva, es preciso que en todo momento la armadura se encuentre firmemente vinculada al hormigón. Si la armadura deslizase o resbalase respecto del hormigón, la armadura sería incapaz de vincularse al hormigón para conectar las respectivas orillas de las sucesivas fisuras y estas progresarían indefinidamente hasta alcanzarse la rotura de la pieza de hormigón.

Fig.52. Concepto de adherencia

El correcto funcionamiento del hormigón armado depende, por tanto, de que quede garantizada en todo momento la adherencia entre la armadura y el hormigón. El término adherencia describe un complejo fenómeno que incluye aspectos como la adhesión o pegado entre el hormigón y el acero, la fuerza de rozamiento entre ambos y la compresión del hormigón contra los resaltos de las corrugas del acero, debido al efecto de engarce que producen las mismas (Fig.52).

Siendo fundamental la adherencia entre la armadura y el hormigón en una estructura real de hormigón armado, no lo es menos en un modelo virtual de elementos finitos que pretende reproducir el comportamiento real del hormigón de tal forma que, si no se resuelve bien la cuestión, el modelo de elementos finitos colapsa y deja de converger (como le ocurriría a una estructura real).

El método empleado, en los modelos de elementos finitos, para simular la adherencia entre el hormigón y el acero consiste en un emparejamiento o coacción nodo a nodo entre los nodos de los elementos hexaédricos del material hormigón con los nodos de los elementos del material acero. Este método presenta un requisito importante y es que para poder vincular dos nodos de distintos materiales ambos nodos deben encontrarse, lógicamente, en la misma posición espacial con un pequeño margen de tolerancia.

Fig.53. Mallado del material hormigón

Fig.54. Mallado del material acero

Este requisito convierte la fase de mallado del preproceso de un modelo de elementos finitos de hormigón armado en un delicadísima operación, que consiga mallar los elementos de hormigón por un lado y los de las armaduras de acero por otro, logrando la total coincidencia de los nodos de uno y otro material (Fig.53 y 54). Un error en el mallado de un elemento da lugar a la no coincidencia entre nodos y, por ello, a la “pérdida de adherencia” con el correspondiente colapso de la estructura, que se materializa en un error por imposible convergencia del modelo.

Es preciso indicar que un modelo del calibre de los empleados en esta tesis doctoral está integrado por cientos de miles de nodos, lo cual pone de manifiesto la dificultad de la operación de mallado en los mismos.

3.3.2.4. CÁLCULO Y POSTPROCESO

Tal y como se indicó en el apartado 3.3.1.2, el cálculo de un modelo de elementos finitos se lleva a cabo mediante métodos numéricos de aproximaciones sucesivas, donde la solución se obtiene por aplicación de sucesivos pasos de carga, siendo fundamental encontrar la amplitud adecuada del paso de carga acorde al problema a resolver.

Frente al planteamiento elástico lineal de la Etapa I, en las Etapas II y III se analiza el comportamiento del hormigón con un diagrama tensión - deformación parabólico rectangular más ajustado a la realidad (Fig.46) pero, al mismo, tiempo más difícil de abordar en el cálculo, tanto por el tramo parabólico como, especialmente, por el tramo horizontal de la parte rectangular.

Ello ha obligado a dos medidas para lograr la convergencia de los modelos, la primera aumentar considerablemente los pasos de carga dada la mayor complejidad del problema, llegando en algunos casos hasta 150 pasos de carga y , la segunda, darle una sutil pendiente al tramo horizontal del diagrama parábola rectángulo, que sin desvirtuar la esencia del diagrama facilita considerablemente la convergencia del mismo.

Finalmente queda la lectura e interpretación de resultados en la fase de postproceso. Pocos aspectos nuevos que comentar diferentes a los ya citados para la Etapa I. Indicar simplemente que, al contar en las Etapas II y III con dos materiales diferentes

interactuando en la estructura de hormigón armado el hormigón y la armadura de acero) a la hora de realizar los procesos de integración de tensiones para obtener esfuerzos internos para el conjunto de las distintas secciones (Fig.55 y 56) es preciso integrar por separado la aportación de cada uno de los materiales, combinando al final el efecto conjunto y simultáneo de ambos.

Fig.55. Integración de resultados en el hormigón

Fig.56. Integración de resultados en la armadura de acero

3.3.3. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS. ETAPA IV

Los modelos de elementos finitos empleados en la Etapa IV para estudiar el caso de las zapatas de esquina presentan un considerable tamaño frente a los modelos empleados para los casos de zapata de medianería en las etapas anteriores. Ello se debe al hecho de emplear dos pórticos consecutivos con sus correspondientes elementos de atado, frente al único pórtico de los modelos de medianería, junto con un volumen de suelo mucho mayor, con el fin de poder abarcar el conjunto de los dos pórticos, sin olvidar el completo armado de todos los elementos de hormigón indicados.

El escenario descrito genera modelos de elementos finitos enormes, que pueden llegar a alcanzar cifras próximas al millón de elementos. Ello obliga a un ejercicio de racionalidad, con el fin de optimizar los modelos, de forma que sean técnicamente abordables desde un punto de vista informático.

Los resultados de la Etapa I ponen de manifiesto la prácticamente nula influencia de la rigidez de los pórticos en el comportamiento de la cimentación. Siendo esto así, la detallada definición de los armados de los pórticos para estudiar con precisión la deformabilidad de los mismos, puede suponer un considerable empleo de recursos que probablemente no conduzca a una variación de los resultados relativos al comportamiento de la cimentación.

Esta idea señala a los pórticos como los elementos estructurales más propicios para ser simplificados sin perder precisión en los resultados de la cimentación. Dicha simplificación puede llevarse a cabo realizando un cálculo elástico lineal de esta parte del modelo, bien con secciones brutas o bien con secciones reducidas para simular el efecto de la fisuración del hormigón. En este sentido el código ACI 318 - 14 plantea que pueden obtenerse de forma aproximada los esfuerzos en un pórtico, simulando el efecto de la fisuración del hormigón, si se realiza un cálculo elástico lineal con reducción del 70% en la rigidez de los pilares y del 35% en la rigidez de las vigas.

Por todo ello, se opta finalmente por un esquema mixto, abordando los modelos de elementos finitos para la zapata de esquina con un planteamiento elástico lineal con secciones reducidas en la parte aérea de la estructura, reservando el estudio detallado del hormigón, con sus armados y su fisuración, para los elementos de cimentación del entorno de la zapata de esquina, que son los que realmente influyen en el resultado del problema. De esta forma, puede prescindirse de la definición detallada de los armados de los pórticos y

pueden emplearse tamaños de elemento más grandes, que conducen en conjunto, a modelos más manejables, informáticamente hablando, si bien se siguen alcanzando modelos de hasta 400.000 elementos en los casos de mayor luz y mayor número de plantas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA I

4.1.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES

4.1.1.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA

Se ofrecen en las Tablas 11, 12 y 13, los resultados del cálculo del modelo convencional de zapata de medianería con viga centradora, correspondientes a la Etapa I, para cada uno de los tres niveles de rigidez planteados en el pórtico tipo. Los parámetros a los que hacen referencia dichos resultados son los representados en las Fig. 6 y 7.

En cada tabla se exponen, en primer lugar, las reacciones en la base de los pilares utilizadas como dato de partida en el cálculo. Dichas reacciones se han obtenido del cálculo del pórtico tipo por método matricial bajo la hipótesis de bases de pilares perfectamente empotrados en la cimentación. El cálculo en cuestión se ha realizado con ayuda del programa de cálculo matricial CYPE 3D.

Asimismo, en el primer bloque (relacionado con los esfuerzos), se ofrecen los esfuerzos en el nudo de medianería de la viga de la primera planta. El objetivo de esta información es conocer el axil en dicha viga de acuerdo con el cálculo del pórtico por método matricial. Una de las cuestiones planteadas en esta tesis es el estudio del trabajo conjunto de la pareja viga centradora - viga primera planta. El modelo convencional con viga centradora no considera en absoluto la intervención de la viga de la primera planta, pero como utiliza como dato de partida las reacciones de los pilares obtenidas del método matricial, se ha considerado que el axil de dicha viga proporcionado por el método matricial puede ser un término de referencia adecuado (tal vez el único) para contrastar posteriormente con los resultados del M.E.F.

Los axiles en cuestión dependen solamente de la rigidez del pórtico y no varían ni con la resistencia del terreno ni con la relación de forma de la cimentación. Los valores obtenidos para dicho axil han sido siempre de tracción y muy reducidos, motivo por el cual, suelen despreciarse en la práctica, calculando la viga a flexión simple.

Seguidamente se ofrecen, para cada nivel de tensión admisible del terreno y relación de forma de la zapata de medianería, los siguientes resultados:

- Dimensionamiento necesario para las zapatas de medianería e interior de acuerdo con el modelo convencional.
- Resultante de las presiones de contacto en la zapata de medianería R_m (kN).
- Tensión transmitida al terreno en la zapata de medianería σ_m (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de tensiones uniformemente repartida.
- Resultante de las tensiones de contacto en la zapata interior R_i (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata interior σ_i (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Momento flector de servicio M_{1v} en la sección más desfavorable de la viga centradora (unión de la viga centradora con la zapata de medianería)

Es preciso indicar que, de los dos modelos convencionales expuestos para la zapata de medianería, es el de zapata con viga centradora el que condiciona el dimensionamiento de la zapata de medianería, debido al incremento de reacción que experimenta dicha zapata respecto del modelo con colaboración de la viga superior. Como consecuencia de ello, para poder contrastar resultados, los otros dos modelos (convencional con viga superior y M.E.F) se calculan con las mismas dimensiones de zapata obtenidas con el modelo convencional de viga centradora. Puede comprobarse que la variación del nivel de rigidez del pórtico ha tenido nula incidencia sobre los resultados de las dimensiones de las diversas zapatas.

Al considerar el modelo convencional de zapata con viga centradora, distribuciones de tensiones sobre el terreno uniformemente repartidas, las resultantes en cuestión se encuentran aplicadas en el centro de las respectivas zapatas. Por ese motivo, no se hace aquí referencia a ninguna excentricidad respecto del centro de las zapatas, ya que sería en todos los casos nula.

Finalmente señalar, que a la vista del esquema del modelo convencional (Fig. 6 y 7), la viga centradora se encuentra solicitada a flexión simple, con axil nulo.

h = 300	REACCIONES		
	N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MEDIANERÍA	517,96	13,91	18,41
PILAR INTERIOR	853,87	-	-
VIGA 1ª PLANTA	25,12	127,50	100,42

h = 300		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	4.400 x 2.200 x 700 3.400 x 3.400 x 700	2.700 x 1.350 x 700 2.250 x 2.250 x 700	2.200 x 1.100 x 700 1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	910,35	704,97	661,33
		σ _m (kN/m ²)	94,04	193,41	273,28
		R _i (kN)	1088,60	966,19	932,10
		σ _i (kN/m ²)	94,17	190,85	287,69
		M _{1v} (kN·m)	385,62	242,45	193,58
	1,5:1	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.900 x 2.600 x 700 3.300 x 3.300 x 700	2.400 x 1.600 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.900 x 1.266 x 700 1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	945,11	721,23	667,56
		σ _m (kN/m ²)	93,21	187,82	277,53
		R _i (kN)	1042,62	945,71	922,91
		σ _i (kN/m ²)	95,74	195,39	284,85
		M _{1v} (kN·m)	436,25	287,88	226,07
	1 : 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700 3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.550 x 1.550 x 700 1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	997,49	744,36	679,56
		σ _m (kN/m ²)	94,44	186,09	282,86
		R _i (kN)	983,30	920,91	901,90
		σ _i (kN/m ²)	93,09	190,27	294,50
		M _{1v} (kN·m)	491,75	353,58	278,55

Tabla 11. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 300

h = 450	REACCIONES		
	N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MEDIANERÍA	520,10	21,18	20,82
PILAR INTERIOR	865,53	-	-
VIGA 1ª PLANTA	15,54	129,91	100,99

h = 450		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
		ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	908,67	703,87	660,37
		σ _m (kN/m ²)	93,87	193,11	272,88
		R _i (kN)	1104,85	981,86	947,63
		σ _i (kN/m ²)	95,58	193,95	292,48
		M _{1v} (kN·m)	373,39	227,29	177,67
	1,5:1	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
		ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	943,07	719,98	666,51
		σ _m (kN/m ²)	93,01	187,49	277,09
		R _i (kN)	1059,22	961,54	938,54
		σ _i (kN/m ²)	97,27	198,66	289,67
	M _{1v} (kN·m)	425,68	273,52	210,66	
	1 : 1	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	994,75	742,82	678,26
		σ _m (kN/m ²)	94,18	185,70	282,32
		R _i (kN)	1000,60	937,02	922,34
		σ _i (kN/m ²)	94,73	193,60	284,67
	M _{1v} (kN·m)	484,36	340,61	264,08	

Tabla 12. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 450

h = 600	REACCIONES		
	N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MEDIANERÍA	512,58	13,22	17,49
PILAR INTERIOR	841,35	-	-
VIGA 1ª PLANTA	24,87	128,07	96,52

h = 600		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
		ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	892,58	689,45	646,38
		σ _m (kN/m ²)	92,21	189,15	267,10
		R _i (kN)	1090,01	965,34	930,68
		σ _i (kN/m ²)	94,29	190,69	287,25
	M _{1v} (kN·m)	341,52	193,84	144,06	
	1,5:1	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
		ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	926,05	705,09	652,23
		σ _m (kN/m ²)	91,33	183,62	271,15
		R _i (kN)	1045,31	945,49	921,88
		σ _i (kN/m ²)	95,99	195,35	284,53
	M _{1v} (kN·m)	395,22	240,36	177,14	
	1 : 1	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	975,99	727,13	663,47
		σ _m (kN/m ²)	92,40	181,78	276,16
R _i (kN)		988,42	921,77	906,20	
σ _i (kN/m ²)		93,58	190,45	279,69	
M _{1v} (kN·m)	457,37	308,23	230,85		

Tabla 13. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 600

4.1.1.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE VIGA SUPERIOR

Se ofrecen en las Tablas 14, 15 y 16, los resultados del cálculo del modelo convencional de zapata de medianería con colaboración de viga superior, para cada uno de los tres niveles de rigidez planteados en el pórtico tipo, en la Etapa I. Los parámetros a los que hacen referencia dichos resultados son los representados en las Fig. 8 y 9.

En cada tabla se exponen, en primer lugar, las reacciones en cabeza del pilar de medianería, como dato de partida para el cálculo. Dichas reacciones se han obtenido del mismo cálculo del pórtico tipo por método matricial, bajo la hipótesis de bases de pilares perfectamente empotrados en la cimentación, realizado a propósito del cálculo del modelo convencional con viga centradora.

Seguidamente se ofrecen, para cada nivel de tensión admisible del terreno y relación de forma de la zapata de medianería, los siguientes resultados:

- Dimensionamiento utilizado para la zapata de medianería.
- Resultante de la fuerza de rozamiento entre zapata y terreno R_{mx} (kN).
- Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de medianería R_{my} (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata de medianería σ_m (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Fuerza de tracción T (kN) generada en la viga de la primera planta para equilibrar y centrar el comportamiento de la zapata de medianería.

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, el modelo de zapata de medianería con viga centradora es más restrictivo respecto del tamaño necesario para la zapata de medianería, por lo cual, se han utilizado las mismas dimensiones de zapata obtenidas en el caso anterior con el fin de poder contrastar resultados.

h = 300		REACCIONES		
		N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MED. NUDO SUP.		504,72	13,86	37,01

h = 300		TENSIÓN ADMISIBLE		
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
FORMA	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
	2 : 1			
	R _{mx} (kN)	96,87	50,01	36,23
	R _{my} (kN)	788,29	619,92	585,74
	σ_m (kN/m ²)	81,44	170,07	242,04
	T (kN)	110,73	63,87	50,09
	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
	1,5:1			
	R _{mx} (kN)	118,92	63,79	45,38
	R _{my} (kN)	801,13	625,36	585,33
	σ_m (kN/m ²)	79,01	162,85	243,34
	T (kN)	132,78	77,65	59,24
	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
	1 : 1			
	R _{mx} (kN)	154,76	85,85	61,04
	R _{my} (kN)	812,91	629,82	585,25
	σ_m (kN/m ²)	76,96	157,46	243,60
	T (kN)	168,62	99,71	74,90

Tabla 14. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 300

h = 450	REACCIONES		
	N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MED. NUDO SUP.	508,33	21,18	42,73

h = 450		TENSIÓN ADMISIBLE		
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
FORMA	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
	R _{mx} (kN)	91,31	43,90	29,95
	R _{my} (kN)	794,40	626,03	591,85
	σ_m (kN/m ²)	82,07	171,75	244,57
	T (kN)	112,49	65,08	51,13
	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
	R _{mx} (kN)	113,62	57,84	39,21
	R _{my} (kN)	807,24	631,47	591,44
	σ_m (kN/m ²)	79,61	164,44	245,88
	T (kN)	134,80	79,02	60,39
	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
	R _{mx} (kN)	149,88	80,16	55,06
	R _{my} (kN)	819,02	635,93	591,36
	σ_m (kN/m ²)	77,54	158,98	246,14
	T (kN)	171,06	101,34	76,24

Tabla 15. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 450

h = 600		REACCIONES		
		N (kN)	V (kN)	M (kN·m)
PILAR MED. NUDO SUP.		497,86	13,22	35,40

h = 600		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
		R _{mx} (kN)	85,22	38,84	25,20
		R _{my} (kN)	782,93	614,56	580,38
		σ _m (kN/m ²)	80,88	168,60	239,83
		T (kN)	98,44	52,06	38,42
	1,5:1	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
		R _{mx} (kN)	107,04	52,48	34,26
		R _{my} (kN)	795,77	620,00	579,97
		σ _m (kN/m ²)	78,48	161,46	241,11
		T (kN)	120,26	65,70	47,48
	1 : 1	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
		R _{mx} (kN)	142,51	74,31	49,76
		R _{my} (kN)	807,55	624,46	579,89
		σ _m (kN/m ²)	76,45	156,12	241,37
		T (kN)	155,73	87,53	62,98

Tabla 16. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa I
Resultados para nivel de rigidez de pórtico tipo h = 600

4.1.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Los resultados de los modelos de elementos finitos de la Etapa I se exponen en dos grupos de tablas, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Resultantes y excentricidades absolutas de tensiones de contacto con el terreno y esfuerzos en la viga centradora y en la viga superior (Tablas 17, 18 y 19)
- Excentricidades relativas de tensiones de contacto con el terreno, tipo de diagrama de distribución de tensiones y tensiones máximas (Tablas 20, 21 y 22)

Los parámetros expuestos en las citadas tablas se representan en la Fig. 57:

Fig.57. Resultados de los modelos de elementos finitos

El primer grupo de tablas (Tablas 17, 18 y 19) muestra las dimensiones de las zapatas utilizadas en el modelo (tanto la de medianería como la interior), las resultantes de las tensiones de contacto con el terreno y los esfuerzos más relevantes de la viga centradora y de la viga de la primera planta.

Como ya se ha indicado anteriormente, por cuestiones de validación de posteriores contrastes, se han empleado las mismas dimensiones utilizadas en los modelos convencionales.

Por lo que respecta a las resultantes de las tensiones de contacto con el terreno, se ha considerado simultáneamente en el mismo modelo, tanto el pórtico, como su cimentación,

como el suelo que la sustenta, contemplando todos los contactos activos que se producen con el terreno, no solo bajo las zapatas, sino también bajo la viga centradora. Además de mostrar los valores de las resultantes de dichos contactos (resultante de la zapata de medianería (R_m), resultante de la zapata interior (R_i) y resultante de la viga centradora (R_v)), se aporta la localización de dichas resultantes mediante la excentricidad absoluta de su punto de aplicación respecto del punto medio de la zapata o la viga en cuestión (excentricidad de la resultante de medianería (e_m), excentricidad de la resultante interior (e_i) y excentricidad de la resultante de la viga centradora (e_v)) (Fig. 57).

Se ha considerado como positiva, toda aquella excentricidad que suponga un desplazamiento de la resultante hacia la derecha del punto medio del elemento correspondiente (alejamiento respecto de la medianería) y negativa, toda aquella excentricidad que suponga un desplazamiento de la resultante hacia la izquierda del punto medio en cuestión (acercamiento a la medianería).

Ninguno de los valores obtenidos para la excentricidad de las resultantes es nulo, lo cual pone de manifiesto que las distribuciones de tensiones de contacto no son uniformemente repartidas, tal y como presuponen los modelos convencionales.

Por último, en este primer grupo de tablas de modelos de elementos finitos, se muestran los esfuerzos resultantes, tanto en la viga centradora como en la viga de la primera planta. De la viga centradora se proporciona el momento flector (M_{1v}) y el esfuerzo axil (N_{1v}) en la sección más desfavorable de la misma (unión de la viga centradora con la zapata de medianería). Por su parte, de la viga de la primera planta se proporciona el esfuerzo axil de tracción (T) que se produce en la misma trabajando como supuesto tirante. Dichos esfuerzos figuran en las citadas tablas con sus valores de servicio.

Todos los esfuerzos axiles en la viga de la primera planta han resultado de tracción (signo positivo), lo cual confirma el mayor o menor efecto tirante de la misma. En cambio, los esfuerzos axiles en la viga centradora son de valor bastante reducido y sin una tendencia clara, ya que aparecen valores tanto de tracción (signo positivo) como de compresión (signo negativo).

Es importante resaltar que el modelo de elementos finitos que se ha utilizado en la fase experimental contempla la interacción del pórtico, de la cimentación y del terreno que los sustenta, por lo cual, los resultados obtenidos valoran el trabajo conjunto y simultáneo de la viga centradora y la viga de la primera planta.

h = 300		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
		ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R m (kN)	864,58	601,54	540,96
		e m (m)	-0,227	-0,165	-0,147
		R i (kN)	1032,92	833,60	778,86
		e i (m)	0,190	0,183	0,162
		R v (kN)	93,58	227,34	266,74
		e v (m)	-0,021	0,081	0,152
		M 1v (kN·m)	236,96	183,54	146,96
	N 1v (kN)	-1,74	7,56	13,5	
	T (kN)	35,68	37,84	38,62	
	1,5:1	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
		ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R m (kN)	902,32	625,08	551,56
		e m (m)	-0,270	-0,199	-0,172
		R i (kN)	993,58	824,30	777,18
		e i (m)	0,214	0,175	0,163
		R v (kN)	79,50	208,94	255,48
		e v (m)	0,019	0,093	0,149
		M 1v (kN·m)	246,10	210,52	170,06
	N 1v (kN)	-2,62	7,54	13,96	
	T (kN)	35,24	38,22	38,86	
	1 : 1	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
R m (kN)		958,22	653,92	568,70	
e m (m)		-0,333	-0,264	-0,225	
R i (kN)		966,28	819,74	774,58	
e i (m)		0,229	0,176	0,164	
R v (kN)		47,42	183,90	237,30	
e v (m)		0,010	0,073	0,138	
M 1v (kN·m)		239,64	241,06	200,66	
N 1v (kN)	-7,24	7,34	14,36		
T (kN)	34,62	38,14	39,06		

Tabla 17. Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno.

Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 300

h = 450		TENSIÓN ADMISIBLE		
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
FORMA	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
	ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	R _m (kN)	871,86	606,06	543,76
	e _m (m)	-0,195	-0,141	-0,119
	R _i (kN)	1032,36	836,12	780,40
	e _i (m)	0,177	0,174	0,155
	R _v (kN)	102,58	242,18	284,60
	e _v (m)	0,016	0,069	0,138
	M _{1v} (kN-m)	225,24	166,04	126,94
	N _{1v} (kN)	-20,48	-0,48	4,94
	T (kN)	43,66	48,12	49,28
	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
	ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	R _m (kN)	914,38	630,16	553,70
	e _m (m)	-0,230	-0,176	-0,144
	R _i (kN)	998,80	826,52	779,8
	e _i (m)	0,204	0,166	0,156
	R _v (kN)	83,68	223,40	273,62
	e _v (m)	0,023	0,078	0,135
	M _{1v} (kN-m)	239,92	194,84	151,16
	N _{1v} (kN)	-21,84	-0,62	5,20
	T (kN)	42,98	48,94	49,70
	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
	ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	R _m (kN)	970,12	660,64	570,90
	e _m (m)	-0,297	-0,237	-0,197
	R _i (kN)	971,44	823,88	778,72
	e _i (m)	0,220	0,167	0,156
	R _v (kN)	50,52	195,80	254,68
	e _v (m)	0,015	0,068	0,128
	M _{1v} (kN-m)	235,58	229,62	183,88
	N _{1v} (kN)	-24,00	-0,82	5,48
	T (kN)	41,72	48,82	50,00

Tabla 18. Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno.

Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 450

h = 600		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
FORMA	2 : 1	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
		ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	862,74	598,02	533,70
		e _m (m)	-0,189	-0,130	-0,109
		R _i (kN)	1006,56	807,02	750,10
		e _i (m)	0,168	0,168	0,152
		R _v (kN)	104,06	245,42	291,24
		e _v (m)	0,021	0,068	0,123
		M _{1v} (kN-m)	205,08	140,42	99,74
		N _{1v} (kN)	-23,38	-6,20	-0,94
		T (kN)	48,88	54,42	55,76
	1,5:1	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
		ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	903,14	620,50	541,54
		e _m (m)	-0,228	-0,171	-0,140
		R _i (kN)	975,04	797,62	750,62
		e _i (m)	0,195	0,160	0,152
		R _v (kN)	85,68	228,12	281,74
		e _v (m)	0,028	0,073	0,114
		M _{1v} (kN-m)	220,36	168,28	123,06
		N _{1v} (kN)	-24,24	-6,10	-0,54
		T (kN)	47,94	55,54	56,32
	1 : 1	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
		R _m (kN)	957,06	651,82	560,50
		e _m (m)	-0,296	-0,226	-0,186
		R _i (kN)	949,18	796,44	750,66
		e _i (m)	0,212	0,161	0,152
		R _v (kN)	52,60	198,94	260,46
		e _v (m)	0,015	0,068	0,118
		M _{1v} (kN-m)	219,920	206,440	158,440
		N _{1v} (kN)	-26,100	-6,400	-0,480
		T (kN)	46,320	55,520	56,800

Tabla 19. Modelo de elementos finitos. Etapa I. Resultantes tensiones terreno.

Esfuerzos en vigas centradora y superior. Pórtico tipo h = 600

Los diagramas de distribución de tensiones de contacto bajo las zapatas de medianería de los modelos de elementos finitos responden, en general, al esquema tipo representado en la Fig.58. Los resultados confirman la no uniformidad del diagrama de tensiones con un incremento de las mismas hacia el pilar de medianería, como ya anticipaba la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería. Si dicho diagrama de distribución de tensiones (evidentemente irregular) tuviese que asemejarse a un esquema linealmente variable equivalente, el modelo adecuado sería una distribución trapezoidal con tensión máxima bajo el pilar de medianería.

Fig.58. Distribución de tensiones de contacto en modelos de elementos finitos

A la hora de valorar la excentricidad de la resultante de tensiones de contacto bajo la zapata de medianería, de cara a relacionarla con el diagrama de tensiones a que da lugar, el empleo del valor absoluto de dicha excentricidad respecto del centro de la zapata (Fig.57) resulta confuso y falto de orden de magnitud. Es más significativo el valor relativo de la citada excentricidad, o más bien la posición relativa de la resultante, expresada a partir del extremo de la zapata y respecto del tamaño total de la misma (Fig.59). La posición de la resultante R_m respecto del extremo de la zapata de medianería, que coincide con la posición del centro de gravedad del gráfico del diagrama trapezoidal de tensiones (c.d.g. R_m), vendrá dada por:

$$\text{c.d.g. } R_m = \frac{a_m}{2} + e_m \quad (\text{ec.61})$$

Y la expresión relativa de dicha posición respecto del tamaño total de la zapata, denotada como c.d.g. R_m (%), será:

$$\text{c.d.g. } R_m (\%) = \frac{\frac{a_m}{2} + e_m}{a_m} \cdot 100 \quad (\text{ec.62})$$

Fig.59. Posición absoluta y relativa de la resultante de la zapata de medianería

Así, si toman como referencia los diagramas lineales de distribución de tensiones clásicos, representados en al Fig.60, se comprueba que un diagrama de distribución de tensiones uniforme (Fig.60.a) presenta su resultante en la mitad del diagrama, es decir, en la posición que ocupa el 50% del tamaño de la zapata en cuestión (centro de gravedad de un gráfico rectangular).

Por su parte, si se pasa a la Fig.60.c, se observa un diagrama triangular estricto, que ocupa la totalidad de la cara de contacto de la zapata, cuya resultante se encuentra a dos tercios de la longitud de la zapata medidos desde el extremo, es decir, en la posición que ocupa el 66% del tamaño de la zapata (centro de gravedad de un gráfico triangular). A partir de este, los diagramas trapeciales puros (Fig.60.b) presentan una posición relativa de la resultante comprendida entre el 50% y el 66% del tamaño de la zapata y los diagramas triangulares puros (Fig.60.d) entre el 66% y el 100% del citado tamaño de la zapata.

Las Tablas 20, 21 y 22 muestran las posiciones relativas de las resultantes de tensiones de contacto de las zapatas de medianería R_m para los distintos casos estudiados, ordenados según el nivel de rigidez de los pórticos. Todos los casos analizados en la Etapa I se corresponden con diagramas de tipo trapecial.

Fig.60. Diagramas lineales de distribución de tensiones de contacto

Dichas tablas incluyen también la tensión máxima generada en el diagrama de tensiones trapecial equivalente, $\sigma_{\max.}$ (Fig.58), acompañada del resultado de la comprobación de tensiones de contacto o verificación del E.L.U. de hundimiento. Se ha adoptado como tensión última de referencia para dicha comprobación $1,25 \cdot \sigma_{\text{adm.}}$ por tratarse de una distribución lineal variable. La verificación se expresa con forma de proporción relativa o nivel de agotamiento de la comprobación:

$$\sigma_{\max.} \leq 1,25 \cdot \sigma_{\text{adm}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_{\max.}}{1,25 \cdot \sigma_{\text{adm}}} \leq 1 \quad (\text{ec.63})$$

por lo que cumplirán la comprobación del E.L.U. de hundimiento todos aquellos casos que presenten un nivel de agotamiento inferior o igual a 1.

h = 300		TENSIÓN ADMISIBLE		
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
FORMA	ZAPATA MED.	4.400 x 2.200 x 700	2.700 x 1.350 x 700	2.200 x 1.100 x 700
	ZAPATA INT.	3.400 x 3.400 x 700	2.250 x 2.250 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	2,200	1,350	1,100
	b _m (m)	4,400	2,700	2,200
	2 : 1 a _m /2 + e _m (m)	1,327	0,840	0,697
	c.d.g. R _m (%)	60	62	63
	σ _{max.} (kN/m ²)	144,66	285,74	402,92
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,16	1,14	1,07
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL
	ZAPATA MED.	3.900 x 2.600 x 700	2.400 x 1.600 x 700	1.900 x 1.266 x 700
	ZAPATA INT.	3.300 x 3.300 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	2,600	1,600	1,266
	b _m (m)	3,900	2,400	1,900
	1,5:1 a _m /2 + e _m (m)	1,570	0,999	0,805
	c.d.g. R _m (%)	60	62	64
	σ _{max.} (kN/m ²)	144,41	283,98	416,00
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,16	1,14	1,11
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL
	ZAPATA MED.	3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700	1.550 x 1.550 x 700
	ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700	2.200 x 2.200 x 700	1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	3,250	2,000	1,550
	b _m (m)	3,250	2,000	1,550
	1 : 1 a _m /2 + e _m (m)	1,958	1,264	1,000
	c.d.g. R _m (%)	60	63	65
	σ _{max.} (kN/m ²)	146,47	292,87	442,73
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,17	1,17	1,18
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL

Tabla 20. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos. Etapa I.

Pórtico tipo h = 300

h = 450		TENSIÓN ADMISIBLE			
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²	
2 : 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	4.400 x 2.200 x 700 3.400 x 3.400 x 700	2.700 x 1.350 x 700 2.250 x 2.250 x 700	2.200 x 1.100 x 700 1.800 x 1.800 x 700	
	a _m (m)	2,200	1,350	1,100	
	b _m (m)	4,400	2,700	2,200	
	a _m /2 + e _m (m)	1,295	0,816	0,669	
	c.d.g. R _m (%)	59	60	61	
	σ _{max.} (kN/m ²)	137,86	270,32	370,50	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,10	1,08	0,99	
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	1,5:1	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.900 x 2.600 x 700 3.300 x 3.300 x 700	2.400 x 1.600 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.900 x 1.266 x 700 1.800 x 1.800 x 700
		a _m (m)	2,600	1,600	1,266
b _m (m)		3,900	2,400	1,900	
a _m /2 + e _m (m)		1,530	0,976	0,777	
c.d.g. R _m (%)		59	61	61	
σ _{max.} (kN/m ²)		137,94	272,55	387,36	
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,10	1,09	1,03	
DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
1 : 1		ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700 3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.550 x 1.550 x 700 1.800 x 1.800 x 700
		a _m (m)	3,250	2,000	1,550
	b _m (m)	3,250	2,000	1,550	
	a _m /2 + e _m (m)	1,922	1,237	0,972	
	c.d.g. R _m (%)	59	62	63	
	σ _{max.} (kN/m ²)	142,21	282,55	418,90	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,14	1,13	1,12	
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	

Tabla 21. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos. Etapa I.
Pórtico tipo h = 450

h = 600		TENSIÓN ADMISIBLE		
		100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
FORMA	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	4.400 x 2.200 x 700 3.400 x 3.400 x 700	2.700 x 1.350 x 700 2.250 x 2.250 x 700	2.200 x 1.100 x 700 1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	2,200	1,350	1,100
	b _m (m)	4,400	2,700	2,200
	2 : 1 a _m /2 + e _m (m)	1,289	0,805	0,659
	c.d.g. R _m (%)	59	60	60
	σ _{max.} (kN/m ²)	135,04	259,18	351,80
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,08	1,04	0,94
	DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL
	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.900 x 2.600 x 700 3.300 x 3.300 x 700	2.400 x 1.600 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.900 x 1.266 x 700 1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	2,600	1,600	1,266
	b _m (m)	3,900	2,400	1,900
	1,5:1 a _m /2 + e _m (m)	1,528	0,971	0,773
	c.d.g. R _m (%)	59	61	61
	σ _{max.} (kN/m ²)	135,93	265,38	374,04
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,09	1,06	1,00
	DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL
	ZAPATA MED. ZAPATA INT.	3.250 x 3.250 x 700 3.250 x 3.250 x 700	2.000 x 2.000 x 700 2.200 x 2.200 x 700	1.550 x 1.550 x 700 1.800 x 1.800 x 700
	a _m (m)	3,250	2,000	1,550
	b _m (m)	3,250	2,000	1,550
	1 : 1 a _m /2 + e _m (m)	1,921	1,226	0,961
	c.d.g. R _m (%)	59	61	62
	σ _{max.} (kN/m ²)	140,17	273,51	401,36
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,12	1,09	1,07
	DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL

Tabla 22. Distribución de tensiones de contacto en modelo de elementos finitos. Etapa I.

Pórtico tipo h = 600

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA II

4.2.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES

4.2.1.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA

Se ofrecen en las Tablas 23, 24, 25, 26, 27 y 28 los resultados del cálculo del modelo convencional de zapata de medianería con viga centradora, para cada uno de los casos planteados en la Etapa II. Los parámetros a los que hacen referencia dichos resultados son los representados en las Fig. 6 y 7.

Las tablas, ordenadas por tensiones admisibles del terreno y relaciones de forma, ofrecen para los distintos casos en función de la luz y el número de plantas, los siguientes resultados:

- Dimensionamiento necesario para las zapatas de medianería, zapata interior, tercera zapata y viga centradora de acuerdo con el modelo convencional.
- Resultante de las presiones de contacto en la zapata de medianería R_m (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata de medianería σ_m (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de tensiones uniformemente repartida.
- Resultante de las tensiones de contacto en la zapata interior R_i (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata interior σ_i (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Resultante de las tensiones de contacto en la tercera zapata interior R_{tz} (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la tercera zapata σ_{tz} (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Momento flector de servicio M_{1v} en la sección más desfavorable de la viga centradora (unión de la viga centradora con la zapata de medianería)

Al considerar el modelo convencional de zapata con viga centradora, distribuciones de tensiones sobre el terreno uniformemente repartidas, las resultantes en cuestión se encuentran aplicadas en el centro de las respectivas zapatas. Por ese motivo, no se hace aquí referencia a ninguna excentricidad respecto del centro de las zapatas, ya que sería en todos los casos nula.

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.	2.400 x 1.600 x 500 1.800 x 1.800 x 500 1.700 x 1.700 x 500 650 x 450 x 500	2.800 x 1.850 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.050 x 550 x 600	3.200 x 2.150 x 700 3.200 x 3.200 x 700 2.400 x 2.400 x 700 3.400 x 550 x 700
		R _m (kN)	365,41	496,41	656,94
		σ_m (kN/m ²)	95,16	95,83	95,48
		R _i (kN)	311,07	619,51	985,43
		σ_i (kN/m ²)	96,01	99,12	96,23
		R _{tz} (kN)	279,25	404,67	536,09
		σ_{tz} (kN/m ²)	98,56	94,66	96,81
		M _{1v} (kN·m)	91,63	173,05	275,80
		B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.		3.500 x 2.350 x 600 3.000 x 3.000 x 600 2.600 x 2.600 x 600 1.300 x 700 x 600
	R _m (kN)			801,48	1058,25
	σ_m (kN/m ²)			97,44	99,84
	R _i (kN)			865,68	1352,88
	σ_i (kN/m ²)			96,19	98,82
	R _{tz} (kN)			630,05	859,64
	σ_{tz} (kN/m ²)			94,82	98,13
	M _{1v} (kN·m)			326,10	530,21
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.			4.800 x 3.200 x 700 4.200 x 4.200 x 700 3.500 x 3.500 x 700 1.875 x 800 x 700
		R _m (kN)			1499,49
		σ_m (kN/m ²)			97,62
		R _i (kN)			1711,90
		σ_i (kN/m ²)			97,05
		R _{tz} (kN)			1171,35
σ_{tz} (kN/m ²)				97,35	
M _{1v} (kN·m)				832,35	
B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.				
	R _m (kN)				
	σ_m (kN/m ²)				
	R _i (kN)				
	σ_i (kN/m ²)				
	R _{tz} (kN)				
	σ_{tz} (kN/m ²)				
	M _{1v} (kN·m)				

Tabla 23. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.800 x 1.200 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		TERCERA ZAP.	1.200 x 1.200 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.600 x 1.600 x 700
		VIGA CENT.	1.500 x 450 x 500	3.100 x 450 x 600	4.750 x 450 x 700
		R _m (kN)	285,48	398,02	516,54
		σ_m (kN/m ²)	190,32	184,27	191,31
		R _i (kN)	310,67	562,65	854,00
		σ_i (kN/m ²)	183,83	194,69	193,65
		R _{tz} (kN)	246,05	342,44	446,81
		σ_{tz} (kN/m ²)	176,43	184,74	187,59
	M _{1v} (kN-m)	60,20	114,41	177,52	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.900 x 1.250 x 500	2.200 x 1.450 x 600	2.600 x 1.750 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		TERCERA ZAP.	1.400 x 1.400 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		VIGA CENT.	1.150 x 450 x 500	2.650 x 550 x 600	4.175 x 600 x 700
		R _m (kN)	461,92	621,97	845,59
		σ_m (kN/m ²)	194,49	194,97	185,84
		R _i (kN)	427,85	814,62	1206,82
		σ_i (kN/m ²)	190,16	184,72	193,09
		R _{tz} (kN)	380,96	531,76	720,14
		σ_{tz} (kN/m ²)	198,14	189,87	189,07
	M _{1v} (kN-m)	120,06	217,66	364,05	
	B + 3	ZAPATA MED.	2.300 x 1.550 x 500	2.600 x 1.750 x 600	3.000 x 2.000 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.800 x 2.800 x 700
		TERCERA ZAP.	1.700 x 1.700 x 500	2.000 x 2.000 x 600	2.300 x 2.300 x 700
		VIGA CENT.	750 x 550 x 500	2.250 x 600 x 600	3.775 x 700 x 700
		R _m (kN)	672,68	872,23	1152,95
		σ_m (kN/m ²)	188,69	191,70	192,16
		R _i (kN)	521,30	1027,23	1555,75
		σ_i (kN/m ²)	180,38	194,18	198,44
		R _{tz} (kN)	528,54	730,13	977,16
		σ_{tz} (kN/m ²)	184,98	186,12	190,91
M _{1v} (kN-m)	194,32	357,64	564,83		
B + 4	ZAPATA MED.		3.000 x 2.000 x 600	3.400 x 2.250 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	TERCERA ZAP.		2.200 x 2.200 x 600	2.600 x 2.600 x 700	
	VIGA CENT.		1.925 x 700 x 600	3.400 x 800 x 700	
	R _m (kN)		1165,48	1510,09	
	σ_m (kN/m ²)		194,25	197,40	
	R _i (kN)		1213,57	1874,34	
	σ_i (kN/m ²)		194,17	195,04	
R _{tz} (kN)		950,17	1272,84		
σ_{tz} (kN/m ²)		199,70	193,06		
M _{1v} (kN-m)		514,35	804,83		

Tabla 24. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II.

Resultados para $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	B + 1	LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
		ZAPATA MED.	1.200 x 800 x 500	1.400 x 950 x 600	1.600 x 1.050 x 700
		ZAPATA INT.	1.100 x 1.100 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.700 x 1.700 x 700
		TERCERA ZAP.	900 x 900 x 500	1.100 x 1.100 x 600	1.300 x 1.300 x 700
		VIGA CENT.	1.800 x 450 x 500	3.500 x 450 x 600	5.250 x 450 x 700
		R _m (kN)	265,90	370,53	481,84
		σ_m (kN/m ²)	276,98	278,60	286,81
		R _i (kN)	309,99	550,00	824,12
		σ_i (kN/m ²)	256,19	280,61	285,16
R _{tz} (kN)	231,62	323,39	422,54		
σ_{tz} (kN/m ²)	299,32	288,35	274,92		
M _{1v} (kN-m)	45,59	87,17	134,37		
PLANTAS	B + 2	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.700 x 1.150 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.200 x 1.200 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		TERCERA ZAP.	1.200 x 1.200 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.600 x 1.600 x 700
		VIGA CENT.	1.550 x 450 x 500	3.150 x 450 x 600	4.825 x 600 x 700
		R _m (kN)	425,02	572,73	778,38
		σ_m (kN/m ²)	283,35	292,96	288,29
		R _i (kN)	430,29	792,87	1170,52
		σ_i (kN/m ²)	298,81	274,35	292,63
		R _{tz} (kN)	369,06	508,13	679,96
		σ_{tz} (kN/m ²)	262,31	269,86	283,55
M _{1v} (kN-m)	95,41	171,57	274,88		
PLANTAS	B + 3	ZAPATA MED.	1.800 x 1.200 x 500	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	1.400 x 1.400 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.300 x 2.300 x 700
		TERCERA ZAP.	1.400 x 1.400 x 500	1.600 x 1.600 x 600	1.800 x 1.800 x 700
		VIGA CENT.	1.250 x 550 x 500	2.850 x 550 x 600	4.475 x 700 x 700
		R _m (kN)	603,59	795,12	1058,76
		σ_m (kN/m ²)	279,44	294,49	296,99
		R _i (kN)	543,22	1020,21	1524,54
		σ_i (kN/m ²)	277,15	282,61	288,19
		R _{tz} (kN)	507,24	693,55	919,97
		σ_{tz} (kN/m ²)	262,55	277,97	297,00
M _{1v} (kN-m)	158,08	277,89	433,63		
PLANTAS	B + 4	ZAPATA MED.	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 600	2.700 x 1.800 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 600	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		TERCERA ZAP.	1.500 x 1.500 x 600	1.800 x 1.800 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.050 x 550 x 600	2.575 x 700 x 600	4.150 x 700 x 700
		R _m (kN)	795,13	1058,94	1389,57
		σ_m (kN/m ²)	294,49	297,04	285,92
		R _i (kN)	647,54	1223,08	1828,44
		σ_i (kN/m ²)	287,80	277,34	292,55
		R _{tz} (kN)	648,52	909,53	1207,28
		σ_{tz} (kN/m ²)	291,46	286,93	282,88
M _{1v} (kN-m)	224,62	404,67	647,08		

Tabla 25. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II.

Resultados para $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	2.700 x 1.350 x 500	3.100 x 1.550 x 600	3.600 x 1.800 x 700
		ZAPATA INT.	1.900 x 1.900 x 500	2.600 x 2.600 x 600	3.200 x 3.200 x 700
		TERCERA ZAP.	1.700 x 1.700 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.400 x 2.400 x 700
		VIGA CENT.	850 x 450 x 500	2.300 x 450 x 600	3.750 x 550 x 700
		R _m (kN)	348,48	474,21	637,20
		σ_m (kN/m ²)	95,61	98,69	98,33
		R _i (kN)	334,06	642,79	999,37
		σ_i (kN/m ²)	92,54	95,09	97,59
		R _{tz} (kN)	279,25	404,67	536,09
		σ_{tz} (kN/m ²)	98,56	94,66	96,81
	M _{1v} (kN·m)	81,45	149,80	233,50	
	B + 2	ZAPATA MED.		4.000 x 2.000 x 600	4.600 x 2.300 x 700
		ZAPATA INT.		3.000 x 3.000 x 600	3.800 x 3.800 x 700
		TERCERA ZAP.		2.600 x 2.600 x 600	3.000 x 3.000 x 700
		VIGA CENT.		1.650 x 600 x 600	2.975 x 700 x 700
		R _m (kN)		772,89	1040,58
		σ_m (kN/m ²)		96,61	98,35
		R _i (kN)		890,59	1396,78
σ_i (kN/m ²)			98,95	96,73	
B + 3	ZAPATA MED.			5.400 x 2.700 x 700	
	ZAPATA INT.			4.200 x 4.200 x 700	
	TERCERA ZAP.			3.500 x 3.500 x 700	
	VIGA CENT.			2.375 x 800 x 700	
	R _m (kN)			1439,86	
	σ_m (kN/m ²)			98,76	
	R _i (kN)			1760,93	
	σ_i (kN/m ²)			99,83	
B + 4	ZAPATA MED.				
	ZAPATA INT.				
	TERCERA ZAP.				
	VIGA CENT.				
	R _m (kN)				
	σ_m (kN/m ²)				
	R _i (kN)				
	σ_i (kN/m ²)				
B + 5	ZAPATA MED.				
	ZAPATA INT.				
	TERCERA ZAP.				
	VIGA CENT.				
	R _m (kN)				
	σ_m (kN/m ²)				
	R _i (kN)				
	σ_i (kN/m ²)				

Tabla 26. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II.

Resultados para $\sigma_{adm} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 200 kN / m ²		FORMA 2 : 1	
PLANTAS	B + 1	LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
		ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.	1.700 x 850 x 500 1.300 x 1.300 x 500 1.200 x 1.200 x 500 1.650 x 450 x 500	2.000 x 1.000 x 600 1.700 x 1.700 x 600 1.400 x 1.400 x 600 3.300 x 450 x 600	2.300 x 1.150 x 700 2.100 x 2.100 x 700 1.600 x 1.600 x 700 4.950 x 450 x 700
		R _m (kN)	278,57	388,56	510,55
		σ_m (kN/m ²)	192,79	194,28	193,03
		R _i (kN)	317,87	570,32	860,97
		σ_i (kN/m ²)	188,09	197,34	195,23
		R _{tz} (kN)	246,05	342,44	446,81
		σ_{tz} (kN/m ²)	176,43	184,74	187,59
		M _{1v} (kN-m)	49,47	92,88	149,13
B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.	2.200 x 1.100 x 500 1.500 x 1.500 x 500 1.400 x 1.400 x 500 1.300 x 450 x 500	2.500 x 1.250 x 600 2.100 x 2.100 x 600 1.700 x 1.700 x 600 2.850 x 450 x 600	2.900 x 1.450 x 700 2.500 x 2.500 x 700 2.000 x 2.000 x 700 4.475 x 600 x 700	
	R _m (kN)	452,37	606,75	823,59	
	σ_m (kN/m ²)	186,93	194,16	195,86	
	R _i (kN)	439,98	823,75	1224,22	
	σ_i (kN/m ²)	195,55	186,79	195,87	
	R _{tz} (kN)	380,96	531,76	720,14	
	σ_{tz} (kN/m ²)	198,14	189,87	189,07	
	M _{1v} (kN-m)	106,03	188,56	298,25	
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.	2.600 x 1.300 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.000 x 450 x 500	3.000 x 1.500 x 600 2.300 x 2.300 x 600 2.000 x 2.000 x 600 2.500 x 600 x 600	3.400 x 1.700 x 700 2.900 x 2.900 x 700 2.300 x 2.300 x 700 4.025 x 700 x 700
		R _m (kN)	639,83	852,52	1128,15
σ_m (kN/m ²)		189,30	189,45	195,18	
R _i (kN)		550,78	1049,49	1595,20	
σ_i (kN/m ²)		190,58	198,39	189,68	
R _{tz} (kN)		528,54	730,13	977,16	
σ_{tz} (kN/m ²)		184,98	186,12	190,91	
M _{1v} (kN-m)		171,22	308,92	479,66	
B + 4		ZAPATA MED. ZAPATA INT. TERCERA ZAP. VIGA CENT.		3.400 x 1.700 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.200 x 2.200 x 600 2.225 x 700 x 600	3.900 x 1.950 x 700 3.100 x 3.100 x 700 2.600 x 2.600 x 700 3.700 x 700 x 700
		R _m (kN)		1128,86	1477,44
	σ_m (kN/m ²)		195,30	194,27	
	R _i (kN)		1249,94	1902,11	
	σ_i (kN/m ²)		199,99	197,93	
	R _{tz} (kN)		950,17	1272,84	
	σ_{tz} (kN/m ²)		199,70	193,06	
	M _{1v} (kN-m)		444,52	704,66	

Tabla 27. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

MÉTODO CLÁSICO V. CENT.		σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 2 : 1	
PLANTAS	LUZ			
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m
	ZAPATA MED.	1.400 x 700 x 500	1.600 x 800 x 600	1.800 x 900 x 700
	ZAPATA INT.	1.100 x 1.100 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.700 x 1.700 x 700
	TERCERA ZAP.	900 x 900 x 500	1.100 x 1.100 x 600	1.300 x 1.300 x 700
	VIGA CENT.	1.900 x 450 x 500	3.650 x 450 x 600	5.400 x 450 x 700
	R _m (kN)	262,88	365,49	477,03
	σ_m (kN/m ²)	268,25	285,54	294,46
	R _i (kN)	314,50	555,49	829,13
	σ_i (kN/m ²)	259,92	283,41	286,90
	R _{tz} (kN)	231,62	323,39	422,54
	σ_{tz} (kN/m ²)	299,32	288,35	274,92
	M _{1v} (kN·m)	37,69	70,04	112,09
	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
	ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
	TERCERA ZAP.	1.200 x 1.200 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.600 x 1.600 x 700
	VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	5.025 x 500 x 700
	R _m (kN)	414,15	566,94	761,74
	σ_m (kN/m ²)	286,61	283,47	287,99
	R _i (kN)	446,65	801,52	1174,96
σ_i (kN/m ²)	264,29	277,34	293,74	
R _{tz} (kN)	369,06	508,13	679,96	
σ_{tz} (kN/m ²)	262,31	269,86	283,55	
M _{1v} (kN·m)		145,52	232,17	
ZAPATA MED.	2.000 x 1.000 x 500	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 700	
ZAPATA INT.	1.400 x 1.400 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.300 x 2.300 x 700	
TERCERA ZAP.	1.400 x 1.400 x 500	1.600 x 1.600 x 600	1.800 x 1.800 x 700	
VIGA CENT.	1.450 x 450 x 500	3.050 x 550 x 600	4.675 x 600 x 700	
R _m (kN)	579,18	780,23	1042,67	
σ_m (kN/m ²)	289,59	294,98	286,06	
R _i (kN)	563,17	1036,50	1533,71	
σ_i (kN/m ²)	287,33	287,12	289,93	
R _{tz} (kN)	507,24	693,55	919,97	
σ_{tz} (kN/m ²)	262,55	277,97	297,00	
M _{1v} (kN·m)	131,40	232,60	376,01	
ZAPATA MED.	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 600	3.100 x 1.550 x 700	
ZAPATA INT.	1.600 x 1.600 x 600	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700	
TERCERA ZAP.	1.500 x 1.500 x 600	1.800 x 1.800 x 600	2.100 x 2.100 x 700	
VIGA CENT.	1.200 x 550 x 600	2.775 x 600 x 600	4.400 x 700 x 700	
R _m (kN)	767,37	1038,58	1367,84	
σ_m (kN/m ²)	290,12	284,93	284,67	
R _i (kN)	683,88	1241,98	1853,52	
σ_i (kN/m ²)	267,14	281,63	296,56	
R _{tz} (kN)	648,52	909,53	1207,28	
σ_{tz} (kN/m ²)	291,46	286,93	282,88	
M _{1v} (kN·m)	194,16	351,18	548,42	

Tabla 28. Zapata de medianería con viga centradora. Modelo convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.2.1.2. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON COLABORACIÓN DE VIGA SUPERIOR

Se ofrecen en las Tablas 29, 30, 31, 32, 33 y 34, los resultados del cálculo del modelo convencional de zapata de medianería con colaboración de viga superior, para cada uno de los casos planteados en la Etapa II. Los parámetros a los que hacen referencia dichos resultados son los representados en las Fig. 8 y 9.

Las tablas, ordenadas por tensiones admisibles del terreno y relaciones de forma, ofrecen para los distintos casos en función de la luz y el número de plantas, los siguientes resultados:

- Dimensionamiento utilizado para la zapata de medianería.
- Resultante de la fuerza de rozamiento entre zapata y terreno R_{mx} (kN).
- Resultante de las tensiones de contacto en la zapata de medianería R_{my} (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata de medianería σ_m (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Fuerza de tracción T (kN) generada en la viga de la primera planta para equilibrar y centrar el comportamiento de la zapata de medianería.

Tal y como se ha indicado en apartados anteriores, el modelo convencional de zapata de medianería con viga centradora es más restrictivo respecto del tamaño necesario para la zapata de medianería, por lo cual, se han utilizado las mismas dimensiones de zapata obtenidas en dicho modelo con el fin de poder contrastar resultados.

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	2.400 x 1.600 x 500	2.800 x 1,850 x 600	3.200 x 2.150 x 700
		R _{mx} (kN)	29,29	45,42	66,95
		R _{my} (kN)	301,18	424,40	567,51
		σ_m (kN/m ²)	78,43	81,93	82,49
		T (kN)	31,84	52,16	79,21
	B + 2	ZAPATA MED.		3.500 x 2.350 x 600	4.000 x 2.650 x 700
		R _{mx} (kN)		97,95	139,30
		R _{my} (kN)		667,44	904,51
		σ_m (kN/m ²)		81,15	85,33
		T (kN)		105,21	156,28
	B + 3	ZAPATA MED.			4.800 x 3.200 x 700
		R _{mx} (kN)			241,96
		R _{my} (kN)			1258,34
		σ_m (kN/m ²)			81,92
		T (kN)			258,89
	B + 4	ZAPATA MED.			
		R _{mx} (kN)			
		R _{my} (kN)			
		σ_m (kN/m ²)			
		T (kN)			

Tabla 29. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.800 x 1.200 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		R _{mx} (kN)	15,07	24,73	34,98
		R _{my} (kN)	247,59	347,69	450,89
		σ_m (kN/m ²)	165,06	160,97	167,00
		T (kN)	17,62	31,47	47,24
	B + 2	ZAPATA MED.	1.900 x 1.250 x 500	2.200 x 1.450 x 600	2.600 x 1.750 x 700
		R _{mx} (kN)	33,84	53,10	81,01
		R _{my} (kN)	390,64	539,55	735,72
		σ_m (kN/m ²)	164,48	169,14	161,70
		T (kN)	36,62	60,36	97,99
	B + 3	ZAPATA MED.	2.300 x 1.550 x 500	2.600 x 1.750 x 600	3.000 x 2.000 x 700
		R _{mx} (kN)	62,59	94,85	136,03
		R _{my} (kN)	544,17	744,27	997,20
		σ_m (kN/m ²)	152,64	163,58	166,20
		T (kN)	65,37	102,15	152,96
	B + 4	ZAPATA MED.		3.000 x 2.000 x 600	3.400 x 2.250 x 700
		R _{mx} (kN)		143,06	201,99
		R _{my} (kN)		979,86	1297,98
		σ_m (kN/m ²)		163,31	169,67
		T (kN)		152,26	222,14

Tabla 30. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.200 x 800 x 500	1.400 x 950 x 600	1.600 x 1.050 x 700
		R _{mx} (kN)	10,34	16,78	23,00
		R _{my} (kN)	235,22	326,61	422,43
		σ_m (kN/m ²)	245,03	245,57	251,45
		T (kN)	12,89	23,52	35,26
	B + 2	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.700 x 1.150 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		R _{mx} (kN)	24,50	38,15	55,11
		R _{my} (kN)	370,60	508,18	684,10
		σ_m (kN/m ²)	247,07	259,94	253,37
		T (kN)	27,28	45,41	72,09
	B + 3	ZAPATA MED.	1.800 x 1.200 x 500	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 700
		R _{mx} (kN)	44,60	67,51	96,31
		R _{my} (kN)	511,99	697,28	929,26
		σ_m (kN/m ²)	237,03	258,25	260,66
		T (kN)	47,38	74,81	113,24
	B + 4	ZAPATA MED.	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 600	2.700 x 1.800 x 700
		R _{mx} (kN)	65,89	102,58	150,07
		R _{my} (kN)	660,12	918,01	1220,13
		σ_m (kN/m ²)	244,49	257,51	251,06
		T (kN)	68,69	111,78	170,22

Tabla 31. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II
Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	2.700 x 1.350 x 500	3.100 x 1.550 x 600	3.600 x 1.800 x 700
		R _{mx} (kN)	23,37	35,87	52,96
		R _{my} (kN)	296,71	414,88	556,35
		σ_m (kN/m ²)	81,40	86,34	85,86
		T (kN)	25,92	42,61	65,22
	B + 2	ZAPATA MED.		4.000 x 2.000 x 600	4.600 x 2.300 x 700
		R _{mx} (kN)		80,51	116,63
		R _{my} (kN)		661,72	903,95
		σ_m (kN/m ²)		82,72	85,44
		T (kN)		87,77	133,61
	B + 3	ZAPATA MED.			5.400 x 2.700 x 700
		R _{mx} (kN)			197,82
		R _{my} (kN)			1236,58
		σ_m (kN/m ²)			84,81
		T (kN)			214,75
	B + 4	ZAPATA MED.			
		R _{mx} (kN)			
		R _{my} (kN)			
		σ_m (kN/m ²)			
		T (kN)			

Tabla 32. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II
Resultados para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		R _{mx} (kN)	11,52	18,37	26,99
		R _{my} (kN)	246,33	343,63	449,36
		σ_m (kN/m ²)	170,47	171,82	169,89
		T (kN)	14,07	25,11	39,25
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		R _{mx} (kN)	28,24	43,13	61,58
		R _{my} (kN)	391,67	537,90	726,09
		σ_m (kN/m ²)	161,85	172,13	172,67
		T (kN)	31,02	50,39	78,56
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		R _{mx} (kN)	49,74	77,76	109,55
		R _{my} (kN)	539,93	743,00	991,06
		σ_m (kN/m ²)	159,74	165,11	171,46
		T (kN)	52,52	85,06	126,48
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700
		R _{mx} (kN)		116,08	167,38
		R _{my} (kN)		974,27	1296,72
		σ_m (kN/m ²)		168,56	170,51
		T (kN)		125,28	187,53

Tabla 33. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II
Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

MÉTODO CLÁSICO V.SUP.		σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.400 x 700 x 500	1.600 x 800 x 600	1.800 x 900 x 700
		R _{mx} (kN)	7,97	12,00	17,01
		R _{my} (kN)	235,68	325,34	420,76
		σ_m (kN/m ²)	240,49	254,17	259,73
		T (kN)	10,52	18,74	29,27
	B + 2	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		R _{mx} (kN)	18,90	30,67	42,15
		R _{my} (kN)	369,34	509,32	682,57
		σ_m (kN/m ²)	255,60	254,66	258,06
		T (kN)	21,68	37,93	59,13
	B + 3	ZAPATA MED.	2.000 x 1.000 x 500	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 700
		R _{mx} (kN)	34,32	53,85	78,65
		R _{my} (kN)	508,33	695,88	931,50
		σ_m (kN/m ²)	254,17	263,09	255,55
		T (kN)	37,10	61,15	95,58
	B + 4	ZAPATA MED.	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 600	3.100 x 1.550 x 700
		R _{mx} (kN)	53,03	84,60	121,23
		R _{my} (kN)	658,72	920,04	1218,60
		σ_m (kN/m ²)	249,04	252,41	253,61
		T (kN)	55,83	93,80	141,38

Tabla 34. Zapata de medianería con colaboración de viga superior. M. convencional. Etapa II

Resultados para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.2.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Con independencia de los cambios introducidos en las variables a estudiar en la Etapa II, ya descritos en el apartado 3.1.3.2, el planteamiento fundamental que caracteriza y diferencia la Etapa II de la anterior, en los modelos de elementos finitos, es la consideración del comportamiento del hormigón de una forma más ajustada a la realidad, con un diagrama tensión deformación parabólico rectangular, distinta resistencia a tracción y a compresión y fisuración y fractura de los elementos de hormigón que superen la reducida resistencia a tracción del mismo (apartado 3.3.2.).

Este planteamiento, al igual que si se tratase de una estructura real, obliga a introducir en los modelos de elementos finitos el correcto armado de los diferentes pilares, vigas y zapatas que lo integran para evitar su colapso. Se ofrece a continuación el resultado del armado obtenido para los distintos casos del pórtico tipo, calculado de acuerdo con las verificaciones establecidas por la vigente normativa, EHE-08 y C.T.E.

En primer lugar, en las Tablas 35, 36, 37 y 38 se muestran los resultados correspondientes al dimensionamiento de los pilares y vigas del pórtico tipo, ordenados por número de plantas del pórtico, para las distintas luces del mismo.

Para cada caso se ofrece la escuadría obtenida tanto para pilares como para vigas. Los pilares son todos de sección cuadrada, con escuadrías que oscilan entre 300 x 300 (mm²) y 400 x 400 (mm²). El tamaño de la sección de los pilares de cada caso es común para los pilares interiores y exteriores, manteniéndose constante a lo largo de las distintas plantas del pórtico. Por su parte, las vigas son de sección rectangular, de tipo plano con suficiente canto para cumplir todas las comprobaciones exigibles. Su tamaño oscila entre 450 x 300 (mm²) y 650 x 400 (mm²). Las vigas de las distintas plantas constituyen un único grupo con sección y armado común.

El armado de los pilares responde al esquema representado en la Fig.61. Se han empleado dos armados tipo. El primero define un armado base empleado a lo largo de todo el pilar en sus distintas plantas y está formado por cuatro redondos, de diámetro variable según el caso, con cerco sencillo. El segundo, constituye una versión reforzada del anterior, con ocho redondos y doble cerco, uno de ellos girado a 45°.

Fig.61. Armado tipo en pilares

Por su parte (Fig.62), para las vigas se dispone un armado constituido por una armadura longitudinal de montaje con cuatro redondos en cada cara, con las correspondientes armaduras de refuerzo, tanto de positivos en centro de vano, como de negativos en las uniones de la viga con los pilares. El número de redondos de las armaduras de refuerzo varía según los casos, indicándose en las tablas, además del diámetro y número de redondos, la longitud del refuerzo en cuestión. Como armadura transversal se dispone doble cerco con cuatro ramas resistentes. En cada pórtico tipo, se plantea el mismo armado para las vigas de las distintas plantas del pórtico, constituyendo todas ellas un mismo grupo de barras.

Fig.62. Armado tipo en vigas

DIMENSIONAMIENTO PÓRTICOS BAJA + 3									
LUZ	L = 3 m	PILAR EXTERIOR b = 300 mm h = 300 mm		PILAR INTERIOR b = 300 mm h = 300 mm					
		ARMAD. LONG.		CERCOS		ARMAD. LONG.		CERCOS	
		P 3ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180		P 3ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180	
		P 2ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180		P 2ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180	
		P 1ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180		P 1ª	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180	
		BAJA	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180		BAJA	4 Ø 12	2 Ø 8 c 180	
		VIGAS b = 450 mm h = 300 mm							
				P. EXTERIOR	CENTRO VANO			P. INTERIOR	
		ARMADURA LONG.	4 Ø 12 + 2 Ø 12			4 Ø 12 + 2 Ø 12			
		L. REFUERZO (m)	0,850			2 x 1,300		0,900	
				CERCOS				4 Ø 8 c 180	
LUZ	L = 5 m	PILAR EXTERIOR b = 300 mm h = 300 mm		PILAR INTERIOR b = 300 mm h = 300 mm					
		ARMAD. LONG.		CERCOS		ARMAD. LONG.		CERCOS	
		P 3ª	4 Ø 16 + 4 Ø 16	4 Ø 8 c 190		P 3ª	4 Ø 16	2 Ø 8 c 190	
		P 2ª	4 Ø 16 + 4 Ø 16	4 Ø 8 c 190		P 2ª	4 Ø 16	2 Ø 8 c 190	
		P 1ª	4 Ø 16	2 Ø 8 c 190		P 1ª	4 Ø 16	2 Ø 8 c 190	
		BAJA	4 Ø 16	2 Ø 8 c 190		BAJA	4 Ø 16 + 4 Ø 16	4 Ø 8 c 190	
		VIGAS b = 550 mm h = 350 mm							
				P. EXTERIOR	CENTRO VANO			P. INTERIOR	
		ARMADURA LONG.	4 Ø 16 + 2 Ø 16			4 Ø 16 + 2 Ø 16			
		L. REFUERZO (m)	1,100			2 x 1,850		1,350	
				CERCOS				4 Ø 8 c 230	
LUZ	L = 7 m	PILAR EXTERIOR b = 350 mm h = 350 mm		PILAR INTERIOR b = 350 mm h = 350 mm					
		ARMAD. LONG.		CERCOS		ARMAD. LONG.		CERCOS	
		P 3ª	4 Ø 20 + 4 Ø 20	4 Ø 8 c 230		P 3ª	4 Ø 16	4 Ø 8 c 230	
		P 2ª	4 Ø 20 + 4 Ø 20	4 Ø 8 c 230		P 2ª	4 Ø 16	4 Ø 8 c 230	
		P 1ª	4 Ø 20	2 Ø 8 c 230		P 1ª	4 Ø 16	4 Ø 8 c 230	
		BAJA	4 Ø 20	2 Ø 8 c 230		BAJA	4 Ø 16 + 4 Ø 16	4 Ø 8 c 230	
		VIGAS b = 650 mm h = 400 mm							
				P. EXTERIOR	CENTRO VANO			P. INTERIOR	
		ARMADURA LONG.	4 Ø 16 + 6 Ø 20			4 Ø 16 + 7 Ø 20			
		L. REFUERZO (m)	2,050			2 x 3,150		2,200	
				CERCOS				4 Ø 8 c 180	

Tabla 37. Dimensionamiento y armado de pórticos con Baja +3 plantas.

Modelos de elementos finitos. Etapa II

En segundo lugar, en las Tablas 39, 40, 41, 42, 43 y 44, ordenadas por tensiones admisibles del terreno y relaciones de forma se muestran, para los distintos casos, en función de la luz y el número de plantas, los resultados correspondientes al dimensionamiento de los elementos de cimentación, indicando el armado necesario para la zapata de medianería, la zapata interior, la tercera zapata y la viga centradora. Tal y como ya se ha indicado anteriormente en varias ocasiones, las dimensiones exteriores adoptadas para los citados elementos son las mismas que las planteadas en los modelos convencionales para poder realizar el contraste entre los diferentes métodos en igualdad de condiciones.

Las citadas zapatas cuentan con una armadura en su cara inferior constituida por una malla ortogonal de redondos de acero corrugado (Fig.63). En dichas tablas se indica el diámetro y número de redondos de la malla en cuestión tanto en la dirección paralela al pórtico como en la perpendicular.

Fig.63. Armado tipo en zapatas

Por su parte (Fig.64), para las vigas centradoras se dispone una armadura longitudinal de montaje con cuatro redondos en cada cara, con la correspondientes armadura de refuerzo, de negativos en la cara superior. El número de redondos de la armadura de refuerzo varía según los casos, presentándose también una doble situación de vigas que requieren refuerzo

solamente en la zona de la viga frente a otras vigas, generalmente de pequeña longitud, que necesitan anclar la armadura de refuerzo en el pilar interior. Como armadura transversal se dispone doble cerco con cuatro ramas resistentes.

Fig.64. Armado tipo en vigas centradoras

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN								σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1
PLANTAS	B + 1	LUZ							
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m			
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	18 Ø 12	13 Ø 12	24 Ø 12	18 Ø 12	
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	22 Ø 12	22 Ø 12	
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
		ARM. LONG. SUP.	4Ø16 + 2Ø16	4 Ø 16	4Ø20 + 4Ø16	4 Ø 20	4Ø20 + 4Ø16	4 Ø 20	
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240
B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
	ZAPATA MEDIANERÍA			20 Ø 12	18 Ø 12	28 Ø 12	23 Ø 12		
	ZAPATA INTERIOR			18 Ø 12	18 Ø 12	26 Ø 12	26 Ø 12		
	TERCERA ZAPATA			16 Ø 12	16 Ø 12	20 Ø 12	20 Ø 12		
	VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
	ARM. LONG. SUP.			4Ø20 + 6Ø20	4Ø20 + 6Ø20	4Ø25 + 6Ø25	4Ø25 + 6Ø25		
	ARM. LONG. INF.			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
	CERCOS			CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
	B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA					34 Ø 12	18 Ø 16	
ZAPATA INTERIOR						32 Ø 12	32 Ø 12		
TERCERA ZAPATA						24 Ø 12	24 Ø 12		
VIGA CENT.		A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
ARM. LONG. SUP.						4Ø25 + 8Ø25	4Ø25 + 8Ø25		
ARM. LONG. INF.						4 Ø 16	4 Ø 16		
CERCOS				CERCOS		CERCOS	4 Ø 8 c 240		
B + 4		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA							
	ZAPATA INTERIOR								
	TERCERA ZAPATA								
	VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
	ARM. LONG. SUP.								
	ARM. LONG. INF.								
	CERCOS			CERCOS		CERCOS			

Tabla 39. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1
Modelos de elementos finitos. Etapa II

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN							σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1	
PLANTAS	B + 1	LUZ							
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m			
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	8 Ø 12	14 Ø 12	8 Ø 16	
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
		ARM. LONG. SUP.	4 Ø 16	4 Ø 16	4Ø16 + 2Ø16	4 Ø 16	4Ø20 + 2Ø16	4 Ø 20	
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240
B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
	ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	14 Ø 12	8 Ø 12	20 Ø 12	13 Ø 12		
	ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	18 Ø 12	18 Ø 12		
	TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12		
	VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
	ARM. LONG. SUP.	4Ø20 + 2Ø16	4 Ø 20	4Ø20 + 4Ø16	4 Ø 20	4Ø25 + 4Ø20	4 Ø 25		
	ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
	CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
	B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA	14 Ø 12	13 Ø 12	18 Ø 12	13 Ø 12	26 Ø 12	13 Ø 16	
ZAPATA INTERIOR		10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	24 Ø 12	24 Ø 12		
TERCERA ZAPATA		10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12		
VIGA CENT.		A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
ARM. LONG. SUP.		4Ø20 + 4Ø16	4Ø20 + 4Ø16	4Ø20 + 4Ø25	4 Ø 20	4Ø25 + 6Ø25	4 Ø 25		
ARM. LONG. INF.		4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
CERCOS		4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
B + 4		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA			20 Ø 12	13 Ø 16	28 Ø 12	13 Ø 16	
	ZAPATA INTERIOR			18 Ø 12	18 Ø 12	26 Ø 12	26 Ø 12		
	TERCERA ZAPATA			14 Ø 12	14 Ø 12	20 Ø 12	20 Ø 12		
	VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
	ARM. LONG. SUP.			4Ø25 + 6Ø25	4 Ø 25	4Ø25 + 8Ø25	4 Ø 25		
	ARM. LONG. INF.			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
	CERCOS			CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	

Tabla 40. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1
Modelos de elementos finitos. Etapa II

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN							σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	B + 1	LUZ								
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m				
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	8 Ø 12		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	6 Ø 12	6 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 20	4 Ø 20		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
B + 2	B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	8 Ø 12	16 Ø 12	8 Ø 16		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4Ø16 + 2Ø16	4 Ø 16	4Ø20 + 2Ø16	4 Ø 20	4Ø25 + 4Ø16	4 Ø 25		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
		B + 3	B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
				ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	16 Ø 12	13 Ø 12	18 Ø 12	13 Ø 12
ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12			8 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	18 Ø 12	18 Ø 12		
TERCERA ZAPATA	8 Ø 12			8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12		
VIGA CENT.	A. V. CENT.			A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
ARM. LONG. SUP.	4Ø20 + 4Ø16			4 Ø 20	4Ø20 + 4Ø20	4 Ø 20	4Ø25 + 6Ø20	4 Ø 25		
ARM. LONG. INF.	4 Ø 16			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
CERCOS	4 Ø 8 c 240			CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		
B + 4	B + 4			ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
				ZAPATA MEDIANERÍA	12 Ø 12	8 Ø 16	18 Ø 12	8 Ø 16	24 Ø 12	13 Ø 16
		ZAPATA INTERIOR	10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	22 Ø 12	22 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4Ø20 + 4Ø20	4 Ø 20	4Ø25 + 6Ø20	4 Ø 25	4Ø25 + 6Ø25	4 Ø 25		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	

Tabla 41. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1
Modelos de elementos finitos. Etapa II

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN				σ_{adm} 200 kN / m ²		FORMA 2 : 1				
PLANTAS	B + 1	LUZ								
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m				
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	8 Ø 12	16 Ø 12	8 Ø 12		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4 Ø 16	4 Ø 16	4Ø16 + 2Ø16	4 Ø 16	4 Ø 20	4 Ø 20		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
B + 2	B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	12 Ø 12	8 Ø 12	18 Ø 12	8 Ø 16	22 Ø 12	13 Ø 12		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	18 Ø 12	18 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4Ø16 + 2Ø16	4 Ø 16	4Ø20 + 2Ø16	4 Ø 20	4Ø25 + 4Ø16	4 Ø 25		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
		B + 3	B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
				ZAPATA MEDIANERÍA	16 Ø 12	8 Ø 16	20 Ø 12	13 Ø 12	28 Ø 12	13 Ø 16
ZAPATA INTERIOR	10 Ø 12			10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	24 Ø 12	24 Ø 12		
TERCERA ZAPATA	10 Ø 12			10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12		
VIGA CENT.	A. V. CENT.			A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
ARM. LONG. SUP.	4Ø20 + 4Ø16			4 Ø 20	4Ø20 + 4Ø25	4 Ø 20	4Ø25 + 6Ø20	4 Ø 25		
ARM. LONG. INF.	4 Ø 16			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
CERCOS	4 Ø 8 c 240			CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		
B + 4	B + 4			ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
				ZAPATA MEDIANERÍA			24 Ø 12	13 Ø 16	32 Ø 12	13 Ø 16
		ZAPATA INTERIOR			18 Ø 12	18 Ø 12	26 Ø 12	26 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA			14 Ø 12	14 Ø 12	20 Ø 12	20 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.			4Ø25 + 6Ø20	4 Ø 25	4Ø25 + 6Ø25	4 Ø 25		
		ARM. LONG. INF.			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS			CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	

Tabla 43. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

Modelos de elementos finitos. Etapa II

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN							σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	B + 1	LUZ								
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m				
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	8 Ø 12	14 Ø 12	8 Ø 12		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	6 Ø 12	6 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 20	4 Ø 20		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
	B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
		ZAPATA MEDIANERÍA	12 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	8 Ø 12	18 Ø 12	8 Ø 16		
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12		
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12		
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.		
		ARM. LONG. SUP.	4Ø16 + 2Ø12	4 Ø 16	4Ø20 + 2Ø16	4 Ø 20	4Ø20 + 2Ø20	4 Ø 20		
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16		
		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240	
		B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
			ZAPATA MEDIANERÍA	12 Ø 12	8 Ø 12	18 Ø 12	8 Ø 16	22 Ø 12	13 Ø 12	
ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12		8 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	18 Ø 12	18 Ø 12			
TERCERA ZAPATA	8 Ø 12		8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12			
VIGA CENT.	A. V. CENT.		A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.			
ARM. LONG. SUP.	4Ø16 + 4Ø16		4 Ø 16	4Ø20 + 4Ø16	4 Ø 20	4Ø25 + 4Ø20	4 Ø 25			
ARM. LONG. INF.	4 Ø 16		4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16			
CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240			
B + 4	ZAPATAS		A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.		
	ZAPATA MEDIANERÍA		14 Ø 12	8 Ø 16	20 Ø 12	8 Ø 16	28 Ø 12	13 Ø 16		
	ZAPATA INTERIOR	10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	22 Ø 12	22 Ø 12			
	TERCERA ZAPATA	10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12			
	VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.			
	ARM. LONG. SUP.	4Ø20 + 4Ø16	4 Ø 20	4Ø20 + 4Ø25	4 Ø 20	4Ø25 + 6Ø25	4 Ø 25			
	ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16			
	CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		CERCOS	4 Ø 8 c 240		

Tabla 44. Dimensionamiento cimentación para $\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1
Modelos de elementos finitos. Etapa II

Una vez definidos los armados necesarios en los distintos casos planteados para el pórtico tipo y su cimentación, se procede al cálculo de los modelos de elementos finitos de los mismos.

Las tablas comprendidas entre la Tabla 45 y 56 muestran los resultados de dichos modelos de elementos finitos. Los parámetros recogidos en las citadas tablas y su significado son los mismos que los mostrados en las tablas de resultados de la Etapa I (apartado 4.1.2), por tanto, para cualquier aclaración sobre los parámetros indicados, son válidas las explicaciones del citado apartado 4.1.2.

Las tablas, ordenadas por tensiones admisibles del terreno y relaciones de forma, ofrecen los resultados para los distintos casos, en función de la luz y el número de plantas. Para cada pareja Tensión Admisible – Relación de Forma se ofrecen, de forma consecutiva, dos tablas.

La primera con las resultantes de tensiones de contacto con el terreno en las distintas zapatas, con sus excentricidades absolutas y con los esfuerzos en la vigas centradora y superior.

La segunda con las excentricidades o posiciones relativas de las resultantes de tensiones de contacto bajo la zapata de medianería, junto con el tipo de distribución de tensiones de contacto, sus valores significativos y el nivel de cumplimiento de la verificación del E.L.U. de hundimiento.

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II					
σ_{adm} 100 kN / m ² FORMA 1,5 : 1					
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.400 x 1.600 x 500 1.800 x 1.800 x 500 650 x 450 x 500	2.800 x 1.850 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.050 x 550 x 600	3.200 x 2.150 x 700 3.200 x 3.200 x 700 3.400 x 550 x 700
		R _m (kN)	348,61	466,46	602,24
		e _m (m)	-0,18	-0,25	-0,36
		R _i (kN)	306,31	575,52	909,42
		e _i (m)	0,12	0,18	0,21
		R _v (kN)	19,28	71,95	128,88
		e _v (m)	0,01	0,07	0,17
		M _{1v} (kN-m)	41,67	85,96	114,45
		T (kN)	2,08	21,95	91,81
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.500 x 2.350 x 600 3.000 x 3.000 x 600 1.300 x 700 x 600	4.000 x 2.650 x 700 3.700 x 3.700 x 700 2.675 x 700 x 700
		R _m (kN)		742,81	961,70
		e _m (m)		-0,37	-0,47
		R _i (kN)		852,73	1316,46
		e _i (m)		0,18	0,20
		R _v (kN)		68,89	129,93
		e _v (m)		-0,14	-0,01
		M _{1v} (kN-m)		119,56	198,16
		T (kN)		28,38	86,54
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			4.800 x 3.200 x 700 4.200 x 4.200 x 700 1.875 x 800 x 700
		R _m (kN)			1383,50
		e _m (m)			-0,54
		R _i (kN)			1690,27
		e _i (m)			0,18
		R _v (kN)			130,84
		e _v (m)			-0,15
		M _{1v} (kN-m)			252,44
		T (kN)			93,10
	B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			
		R _m (kN)			
		e _m (m)			
		R _i (kN)			
		e _i (m)			
		R _v (kN)			
		e _v (m)			
		M _{1v} (kN-m)			
		T (kN)			

Tabla 45. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. σ_{adm} = 100 kN/m² y relación de forma 1,5 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.400 x 1.600 x 500 1.800 x 1.800 x 500 650 x 450 x 500	2.800 x 1.850 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.050 x 550 x 600	3.200 x 2.150 x 700 3.200 x 3.200 x 700 3.400 x 550 x 700
		a _m (m)	1,60	1,85	2,15
		b _m (m)	2,40	2,80	3,20
		a _m / 2 + e _m (m)	0,98	1,18	1,44
		c.d.g. R _m (%)	61	64	67
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	151,05	163,46	175,85
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,21	1,31	1,41
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.500 x 2.350 x 600 3.000 x 3.000 x 600 1.300 x 700 x 600	4.000 x 2.650 x 700 3.700 x 3.700 x 700 2.675 x 700 x 700
		a _m (m)		2,35	2,65
		b _m (m)		3,50	4,00
		a _m / 2 + e _m (m)		1,54	1,80
		c.d.g. R _m (%)		66	68
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		175,30	187,61
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,40	1,50
		DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			4.800 x 3.200 x 700 4.200 x 4.200 x 700 1.875 x 800 x 700
		a _m (m)			3,20
		b _m (m)			4,80
		a _m / 2 + e _m (m)			2,14
		c.d.g. R _m (%)			67
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)			181,44
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$			1,44
		DIAGRAMA σ			TRIANGULAR
	B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			
		a _m (m)			
b _m (m)					
a _m / 2 + e _m (m)					
c.d.g. R _m (%)					
$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)					
$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$					
DIAGRAMA σ					

Tabla 46. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II					
σ_{adm} 200 kN / m ² FORMA 1,5 : 1					
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.800 x 1.200 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.500 x 450 x 500	3.100 x 450 x 600	4.750 x 450 x 700
		R _m (kN)	249,15	350,16	452,42
		e _m (m)	-0,11	-0,21	-0,26
		R _i (kN)	267,83	491,54	753,24
		e _i (m)	0,11	0,18	0,20
		R _v (kN)	78,44	120,21	166,37
		e _v (m)	0,01	0,26	0,57
		M _{1v} (kN-m)	42,77	62,96	90,05
	T (kN)	8,09	18,95	32,44	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.900 x 1.250 x 500	2.200 x 1.450 x 600	2.600 x 1.750 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.150 x 450 x 500	2.650 x 550 x 600	4.175 x 600 x 700
		R _m (kN)	424,43	543,45	748,81
		e _m (m)	-0,17	-0,28	-0,34
		R _i (kN)	392,13	756,66	1099,25
		e _i (m)	0,11	0,23	0,22
		R _v (kN)	72,26	138,28	205,92
		e _v (m)	0,01	0,15	0,41
		M _{1v} (kN-m)	64,11	109,37	162,94
	T (kN)	11,53	27,80	86,78	
	B + 3	ZAPATA MED.	2.300 x 1.550 x 500	2.600 x 1.750 x 600	3.000 x 2.000 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.800 x 2.800 x 700
VIGA CENT.		750 x 550 x 500	2.250 x 600 x 600	3.775 x 700 x 700	
R _m (kN)		640,06	809,45	1044,68	
e _m (m)		-0,20	-0,29	-0,37	
R _i (kN)		513,20	946,86	1437,14	
e _i (m)		0,13	0,17	0,21	
R _v (kN)		40,35	141,87	223,60	
e _v (m)		0,03	0,02	0,39	
M _{1v} (kN-m)		86,63	159,92	249,73	
T (kN)	46,50	48,98	88,35		
B + 4	ZAPATA MED.		3.000 x 2.000 x 600	3.400 x 2.250 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		1.925 x 700 x 600	3.400 x 800 x 700	
	R _m (kN)		1072,70	1397,20	
	e _m (m)		-0,34	-0,42	
	R _i (kN)		1162,42	1740,16	
	e _i (m)		0,21	0,21	
	R _v (kN)		142,14	247,02	
	e _v (m)		-0,01	0,34	
	M _{1v} (kN-m)		222,17	319,18	
T (kN)		63,24	116,29		

Tabla 47. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. σ_{adm} = 200 kN/m² y relación de forma 1,5 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.800 x 1.200 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.500 x 450 x 500	3.100 x 450 x 600	4.750 x 450 x 700
		a _m (m)	1,00	1,20	1,35
		b _m (m)	1,50	1,80	2,00
		a _m /2 + e _m (m)	0,61	0,81	0,94
		c.d.g. R _m (%)	61	67	69
		σ _{max.} (kN/m ²)	277,47	329,57	364,65
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,11	1,32	1,46	
	DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.900 x 1.250 x 500	2.200 x 1.450 x 600	2.600 x 1.750 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.150 x 450 x 500	2.650 x 550 x 600	4.175 x 600 x 700
		a _m (m)	1,25	1,45	1,75
		b _m (m)	1,90	2,20	2,60
		a _m /2 + e _m (m)	0,80	1,01	1,22
		c.d.g. R _m (%)	64	69	70
		σ _{max.} (kN/m ²)	325,16	370,50	361,11
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,30	1,48	1,44		
DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		
B + 3	ZAPATA MED.	2.300 x 1.550 x 500	2.600 x 1.750 x 600	3.000 x 2.000 x 700	
	ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.800 x 2.800 x 700	
	VIGA CENT.	750 x 550 x 500	2.250 x 600 x 600	3.775 x 700 x 700	
	a _m (m)	1,55	1,75	2,00	
	b _m (m)	2,30	2,60	3,00	
	a _m /2 + e _m (m)	0,97	1,16	1,37	
	c.d.g. R _m (%)	63	66	69	
	σ _{max.} (kN/m ²)	316,18	353,90	369,67	
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,26	1,42	1,48		
DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRIANGULAR		
B + 4	ZAPATA MED.		3.000 x 2.000 x 600	3.400 x 2.250 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		1.925 x 700 x 600	3.400 x 800 x 700	
	a _m (m)		2,00	2,25	
	b _m (m)		3,00	3,40	
	a _m /2 + e _m (m)		1,34	1,54	
	c.d.g. R _m (%)		67	69	
	σ _{max.} (kN/m ²)		359,22	386,55	
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,44	1,55		
DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR		

Tabla 48. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II					
σ_{adm} 300 kN / m ² FORMA 1,5 : 1					
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED.	1.200 x 800 x 500	1.400 x 950 x 600	1.600 x 1.050 x 700
		ZAPATA INT.	1.100 x 1.100 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.700 x 1.700 x 700
		VIGA CENT.	1.800 x 450 x 500	3.500 x 450 x 600	5.250 x 450 x 700
		R _m (kN)	205,76	320,65	423,09
		e _m (m)	-0,10	-0,15	-0,19
		R _i (kN)	253,15	454,01	691,77
		e _i (m)	0,09	0,16	0,21
		R _v (kN)	115,81	145,48	192,64
		e _v (m)	0,02	0,30	0,63
		M _{1v} (kN-m)	41,86	50,46	68,71
	T (kN)	0,70	22,05	35,29	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.500 x 1.000 x 500	1.700 x 1.150 x 600	2.000 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.200 x 1.200 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		VIGA CENT.	1.550 x 450 x 500	3.150 x 450 x 600	4.825 x 600 x 700
		R _m (kN)	363,29	505,33	665,87
		e _m (m)	-0,14	-0,22	-0,23
		R _i (kN)	377,41	703,33	1013,57
		e _i (m)	0,22	0,22	0,20
		R _v (kN)	113,54	156,12	268,44
		e _v (m)	0,03	0,33	0,55
		M _{1v} (kN-m)	56,72	88,42	141,30
	T (kN)	11,75	38,10	80,19	
	B + 3	ZAPATA MED.	1.800 x 1.200 x 500	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 700
		ZAPATA INT.	1.400 x 1.400 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.300 x 2.300 x 700
VIGA CENT.		1.250 x 550 x 500	2.850 x 550 x 600	4.475 x 700 x 700	
R _m (kN)		529,58	707,49	924,94	
e _m (m)		-0,18	-0,23	-0,27	
R _i (kN)		515,13	924,79	1356,46	
e _i (m)		0,12	0,17	0,25	
R _v (kN)		101,55	182,48	301,49	
e _v (m)		0,04	0,24	0,50	
M _{1v} (kN-m)		91,91	143,68	219,24	
T (kN)	13,74	52,14	90,82		
B + 4	ZAPATA MED.	2.000 x 1.350 x 600	2.300 x 1.550 x 600	2.700 x 1.800 x 700	
	ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 600	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700	
	VIGA CENT.	1.050 x 550 x 600	2.575 x 700 x 600	4.150 x 700 x 700	
	R _m (kN)	729,88	955,73	1250,60	
	e _m (m)	-0,14	-0,24	-0,31	
	R _i (kN)	613,53	1103,33	1675,12	
	e _i (m)	0,11	0,16	0,11	
	R _v (kN)	99,19	222,36	289,68	
	e _v (m)	0,06	0,05	0,41	
	M _{1v} (kN-m)	148,60	208,39	288,27	
T (kN)	12,52	62,23	125,46		

Tabla 49. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		σ_{adm} 300 kN / m ²	FORMA 1,5 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.200 x 800 x 500 1.100 x 1.100 x 500 1.800 x 450 x 500	1.400 x 950 x 600 1.400 x 1.400 x 600 3.500 x 450 x 600	1.600 x 1.050 x 700 1.700 x 1.700 x 700 5.250 x 450 x 700
		a _m (m)	0,80	0,95	1,05
		b _m (m)	1,20	1,40	1,60
		a _m /2 + e _m (m)	0,50	0,62	0,72
		c.d.g. R _m (%)	62	66	68
		σ _{max.} (kN/m ²)	368,97	466,33	528,87
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	0,98	1,24	1,41
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.500 x 1.000 x 500 1.200 x 1.200 x 500 1.550 x 450 x 500	1.700 x 1.150 x 600 1.700 x 1.700 x 600 3.150 x 450 x 600	2.000 x 1.350 x 700 2.000 x 2.000 x 700 4.825 x 600 x 700
		a _m (m)	1,00	1,15	1,35
		b _m (m)	1,50	1,70	2,00
		a _m /2 + e _m (m)	0,64	0,80	0,90
		c.d.g. R _m (%)	64	69	67
		σ _{max.} (kN/m ²)	445,50	560,76	496,58
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,19	1,50	1,32
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.800 x 1.200 x 500 1.400 x 1.400 x 500 1.250 x 550 x 500	2.000 x 1.350 x 600 1.900 x 1.900 x 600 2.850 x 550 x 600	2.300 x 1.550 x 700 2.300 x 2.300 x 700 4.475 x 700 x 700
		a _m (m)	1,20	1,35	1,55
		b _m (m)	1,80	2,00	2,30
		a _m /2 + e _m (m)	0,78	0,90	1,05
		c.d.g. R _m (%)	65	67	68
		σ _{max.} (kN/m ²)	467,48	528,13	535,55
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,25	1,41	1,43
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.000 x 1.350 x 600 1.500 x 1.500 x 600 1.050 x 550 x 600	2.300 x 1.550 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.575 x 700 x 600	2.700 x 1.800 x 700 2.500 x 2.500 x 700 4.150 x 700 x 700
		a _m (m)	1,35	1,55	1,80
		b _m (m)	2,00	2,30	2,70
		a _m /2 + e _m (m)	0,82	1,01	1,21
		c.d.g. R _m (%)	60	65	67
		σ _{max.} (kN/m ²)	438,78	511,96	522,06
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,17	1,37	1,39
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR

Tabla 50. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 1,5 : 1

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II							
σ_{adm} 100 kN / m ² FORMA 2 : 1							
PLANTAS	B + 1	LUZ					
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m			
		ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.700 x 1.350 x 500 1.900 x 1.900 x 500 850 x 450 x 500	3.100 x 1.550 x 600 2.600 x 2.600 x 600 2.300 x 450 x 600	3.600 x 1.800 x 700 3.200 x 3.200 x 700 3.750 x 550 x 700		
		R _m (kN)	329,09	444,16	569,46		
		e _m (m)	-0,15	-0,23	-0,33		
		R _i (kN)	324,85	594,59	909,20		
		e _i (m)	0,11	0,17	0,21		
		R _v (kN)	28,08	77,50	156,91		
		e _v (m)	0,01	0,06	-0,02		
		M _{1v} (kN-m)	41,11	71,10	107,84		
		T (kN)	1,04	16,45	21,36		
PLANTAS	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		4.000 x 2.000 x 600 3.000 x 3.000 x 600 1.650 x 600 x 600	4.600 x 2.300 x 700 3.800 x 3.800 x 700 2.975 x 700 x 700		
		R _m (kN)		718,03	942,75		
		e _m (m)		-0,32	-0,41		
		R _i (kN)		867,93	1328,33		
		e _i (m)		0,17	0,18		
		R _v (kN)		76,55	165,63		
		e _v (m)		-0,07	-0,17		
		M _{1v} (kN-m)		111,54	182,08		
		T (kN)		29,25	80,46		
		PLANTAS	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			5.400 x 2.700 x 700 4.200 x 4.200 x 700 2.375 x 800 x 700
				R _m (kN)			1328,34
e _m (m)					-0,46		
R _i (kN)					1949,27		
e _i (m)					0,16		
R _v (kN)					168,32		
e _v (m)					-0,13		
M _{1v} (kN-m)					247,24		
T (kN)					85,47		
PLANTAS	B + 4			ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			
				R _m (kN)			
		e _m (m)					
		R _i (kN)					
		e _i (m)					
		R _v (kN)					
		e _v (m)					
		M _{1v} (kN-m)					
		T (kN)					

Tabla 51. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. σ_{adm} = 100 kN/m² y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		σ_{adm} 100 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.700 x 1.350 x 500 1.900 x 1.900 x 500 850 x 450 x 500	3.100 x 1.550 x 600 2.600 x 2.600 x 600 2.300 x 450 x 600	3.600 x 1.800 x 700 3.200 x 3.200 x 700 3.750 x 550 x 700	
	a _m (m)	1,35	1,55	1,80	
	b _m (m)	2,70	3,10	3,60	
	a _m /2 + e _m (m)	0,82	1,00	1,23	
	c.d.g. R _m (%)	61	65	68	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	149,09	174,45	184,09	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,19	1,40	1,47	
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR	
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		4.000 x 2.000 x 600 3.000 x 3.000 x 600 1.650 x 600 x 600	4.600 x 2.300 x 700 3.800 x 3.800 x 700 2.975 x 700 x 700	
	a _m (m)		2,00	2,30	
	b _m (m)		4,00	4,60	
	a _m /2 + e _m (m)		1,32	1,56	
	c.d.g. R _m (%)		66	68	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		176,23	184,90	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,41	1,48	
	DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRIANGULAR	
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.			5.400 x 2.700 x 700 4.200 x 4.200 x 700 2.375 x 800 x 700	
	a _m (m)			2,70	
	b _m (m)			5,40	
	a _m /2 + e _m (m)			1,81	
	c.d.g. R _m (%)			67	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)			185,30	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$			1,48	
	DIAGRAMA σ			TRIANGULAR	
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.				
	a _m (m)				
b _m (m)					
a _m /2 + e _m (m)					
c.d.g. R _m (%)					
$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)					
$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$					
DIAGRAMA σ					

Tabla 52. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II					
σ_{adm} 200 kN / m ² FORMA 2 : 1					
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.700 x 850 x 500 1.300 x 1.300 x 500 1.650 x 450 x 500	2.000 x 1.000 x 600 1.700 x 1.700 x 600 3.300 x 450 x 600	2.300 x 1.150 x 700 2.100 x 2.100 x 700 4.950 x 450 x 700	
	R _m (kN)	241,29	342,39	458,60	
	e _m (m)	-0,10	-0,15	-0,21	
	R _i (kN)	270,55	482,75	741,55	
	e _i (m)	0,11	0,18	0,20	
	R _v (kN)	84,73	134,82	172,34	
	e _v (m)	0,00	0,20	0,57	
	M _{1v} (kN-m)	37,84	58,61	71,70	
	T (kN)	6,04	21,08	32,57	
	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.200 x 1.100 x 500 1.500 x 1.500 x 500 1.300 x 450 x 500	2.500 x 1.250 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.850 x 450 x 600	2.900 x 1.450 x 700 2.500 x 2.500 x 700 4.475 x 600 x 700	
	R _m (kN)	414,86	535,39	719,91	
	e _m (m)	-0,15	-0,26	-0,29	
	R _i (kN)	400,60	759,87	1098,22	
	e _i (m)	0,12	0,24	0,21	
	R _v (kN)	76,27	134,21	227,74	
	e _v (m)	0,04	0,16	0,37	
	M _{1v} (kN-m)	60,22	87,89	140,76	
	T (kN)	13,31	28,62	85,97	
ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.600 x 1.300 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.000 x 450 x 500	3.000 x 1.500 x 600 2.300 x 2.300 x 600 2.500 x 600 x 600	3.400 x 1.700 x 700 2.900 x 2.900 x 700 4.025 x 700 x 700		
R _m (kN)	606,28	765,01	1035,85		
e _m (m)	-0,18	-0,28	-0,31		
R _i (kN)	514,27	966,97	1432,14		
e _i (m)	0,12	0,17	0,17		
R _v (kN)	71,40	171,46	256,91		
e _v (m)	-0,07	-0,02	0,22		
M _{1v} (kN-m)	79,03	148,55	208,09		
T (kN)	13,30	47,32	87,89		
ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.400 x 1.700 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.225 x 700 x 600	3.900 x 1.950 x 700 3.100 x 3.100 x 700 3.700 x 700 x 700		
R _m (kN)		1009,48	1329,35		
e _m (m)		-0,32	-0,39		
R _i (kN)		1203,30	1780,57		
e _i (m)		0,18	0,19		
R _v (kN)		167,30	272,68		
e _v (m)		0,01	0,09		
M _{1v} (kN-m)		193,57	265,56		
T (kN)		66,39	114,14		

Tabla 53. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. σ_{adm} = 200 kN/m² y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		σ_{adm} 200 kN / m ²	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		a _m (m)	0,85	1,00	1,15
		b _m (m)	1,70	2,00	2,30
		a _m /2 + e _m (m)	0,52	0,65	0,78
		c.d.g. R _m (%)	61	65	68
		σ _{max.} (kN/m ²)	279,18	327,32	359,91
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,12	1,31	1,44
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		a _m (m)	1,10	1,25	1,45
		b _m (m)	2,20	2,50	2,90
		a _m /2 + e _m (m)	0,70	0,88	1,01
		c.d.g. R _m (%)	63	71	70
		σ _{max.} (kN/m ²)	308,38	387,39	376,59
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,23	1,55	1,51	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		
B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700	
	ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700	
	VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
	a _m (m)	1,30	1,50	1,70	
	b _m (m)	2,60	3,00	3,40	
	a _m /2 + e _m (m)	0,83	1,03	1,16	
	c.d.g. R _m (%)	64	69	68	
	σ _{max.} (kN/m ²)	324,89	360,30	376,80	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,30	1,44	1,51	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		
B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
	a _m (m)		1,70	1,95	
	b _m (m)		3,40	3,90	
	a _m /2 + e _m (m)		1,17	1,36	
	c.d.g. R _m (%)		69	70	
	σ _{max.} (kN/m ²)		371,22	385,20	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,48	1,54	
DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR		

Tabla 54. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS M.E.F. ETAPA II					
σ_{adm} 300 kN / m ² FORMA 2 : 1					
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED.	1.400 x 700 x 500	1.600 x 800 x 600	1.800 x 900 x 700
		ZAPATA INT.	1.100 x 1.100 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.700 x 1.700 x 700
		VIGA CENT.	1.900 x 450 x 500	3.650 x 450 x 600	5.400 x 450 x 700
		R _m (kN)	204,31	317,70	413,96
		e _m (m)	-0,08	-0,12	-0,15
		R _i (kN)	261,12	453,94	687,17
		e _i (m)	0,10	0,16	0,18
		R _v (kN)	112,20	149,56	205,00
		e _v (m)	0,03	0,27	0,53
		M _{1v} (kN-m)	33,32	45,96	69,82
	T (kN)	1,63	21,82	31,53	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	5.025 x 500 x 700
		R _m (kN)	366,65	505,03	697,36
		e _m (m)	-0,12	-0,18	-0,21
		R _i (kN)	379,81	703,60	1008,90
		e _i (m)	0,11	0,20	0,19
		R _v (kN)	113,90	158,89	231,45
		e _v (m)	0,01	0,32	0,80
		M _{1v} (kN-m)	43,55	73,72	89,93
	T (kN)	9,88	30,83	89,84	
	B + 3	ZAPATA MED.	2.000 x 1.000 x 500	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 700
		ZAPATA INT.	1.400 x 1.400 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.300 x 2.300 x 700
VIGA CENT.		1.450 x 450 x 500	3.050 x 550 x 600	4.675 x 600 x 700	
R _m (kN)		527,88	732,99	984,01	
e _m (m)		-0,14	-0,19	-0,24	
R _i (kN)		504,29	907,25	1324,58	
e _i (m)		0,12	0,16	0,19	
R _v (kN)		109,48	177,05	267,57	
e _v (m)		0,03	0,32	0,66	
M _{1v} (kN-m)		66,01	101,16	147,95	
T (kN)	14,34	52,66	92,20		
B + 4	ZAPATA MED.	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 600	3.100 x 1.550 x 700	
	ZAPATA INT.	1.600 x 1.600 x 600	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700	
	VIGA CENT.	1.200 x 550 x 600	2.775 x 600 x 600	4.400 x 700 x 700	
	R _m (kN)	708,03	931,69	1237,38	
	e _m (m)	-0,12	-0,25	-0,29	
	R _i (kN)	671,78	1140,61	1673,83	
	e _i (m)	0,04	0,15	0,20	
	R _v (kN)	71,16	208,30	310,77	
	e _v (m)	0,00	0,14	0,39	
	M _{1v} (kN-m)	176,70	145,90	215,20	
T (kN)	17,28	63,88	113,92		

Tabla 55. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Etapa II. σ_{adm} = 300 kN/m² y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES		M.E.F.	ETAPA II		
		$\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.400 x 700 x 500	1.600 x 800 x 600	1.800 x 900 x 700
		ZAPATA INT.	1.100 x 1.100 x 500	1.400 x 1.400 x 600	1.700 x 1.700 x 700
		VIGA CENT.	1.900 x 450 x 500	3.650 x 450 x 600	5.400 x 450 x 700
		a_m (m)	0,70	0,80	0,90
		b_m (m)	1,40	1,60	1,80
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,43	0,52	0,60
		c.d.g. R_m (%)	62	65	67
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	352,87	468,04	512,39
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,94	1,25	1,37
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRIANGULAR	
	B + 2	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	5.025 x 500 x 700
		a_m (m)	0,85	1,00	1,15
		b_m (m)	1,70	2,00	2,30
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,54	0,68	0,79
		c.d.g. R_m (%)	64	68	69
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	465,45	525,64	559,38
$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,24	1,40	1,49	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		
B + 3	ZAPATA MED.	2.000 x 1.000 x 500	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 700	
	ZAPATA INT.	1.400 x 1.400 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.300 x 2.300 x 700	
	VIGA CENT.	1.450 x 450 x 500	3.050 x 550 x 600	4.675 x 600 x 700	
	a_m (m)	1,00	1,15	1,35	
	b_m (m)	2,00	2,30	2,70	
	$a_m/2 + e_m$ (m)	0,64	0,77	0,91	
	c.d.g. R_m (%)	64	67	68	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	488,48	558,81	555,27	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,30	1,49	1,48	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		
B + 4	ZAPATA MED.	2.300 x 1.150 x 600	2.700 x 1.350 x 600	3.100 x 1.550 x 700	
	ZAPATA INT.	1.600 x 1.600 x 600	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700	
	VIGA CENT.	1.200 x 550 x 600	2.775 x 600 x 600	4.400 x 700 x 700	
	a_m (m)	1,15	1,35	1,55	
	b_m (m)	2,30	2,70	3,10	
	$a_m/2 + e_m$ (m)	0,69	0,93	1,06	
	c.d.g. R_m (%)	60	69	68	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	431,65	543,21	543,27	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,15	1,45	1,45	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR		

Tabla 56. Distribución de tensiones de contacto. Modelo de elementos finitos. Etapa II.

 $\sigma_{adm.} = 300 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA III

4.3.1. REDUCCIÓN DE ARMADURA

El análisis de los resultados de las Etapas I y II (apartados 5.1 y 5.2) pone de manifiesto la considerable reducción que experimenta el momento flector que solicita a la viga centradora, debido al giro de la cimentación inducido por la flexión de la misma, que desplaza la resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería hacia el pilar medianero, alejándola así de la zona central de la viga centradora. Dicha reducción del momento flector que solicita a la viga centradora, ya de por sí notable en los resultados de la Etapa I y todavía más acentuada si cabe en los resultados de la Etapa II (apartado 5.2.1.2), conduce a la idea de estudiar el efecto que produciría en el modelo la reducción de la armadura de la viga centradora, acomodándola a las demandas reales que presenta.

Para ello, se vuelve a dimensionar la armadura necesaria en la viga centradora, pero en lugar de hacerlo con los momentos flectores generados por los modelos convencionales se dimensiona con los momentos flectores generados por los modelos de elementos finitos de la Etapa II, considerablemente inferiores a los obtenidos por el método convencional.

En la Tabla 57 se muestran los resultados del dimensionamiento obtenido para la armadura de la viga centradora en función de los momentos generados en la misma por los modelos de elementos finitos de la Etapa II, indicándose en cada caso el porcentaje que representa el área de armadura con el nuevo criterio, respecto del área de armadura inicial a partir de los métodos convencionales.

Una vez definidos los armados necesarios en los distintos casos planteados, se procede al cálculo de los modelos de elementos finitos de los mismos, mostrándose sus resultados en las Tablas 58 y 59. Los parámetros recogidos en las citadas tablas y su significado son los mismos que los mostrados en las tablas de resultados de las Etapas I y II (apartados 4.1.2 y 4.2.2.), por tanto, para cualquier aclaración sobre los parámetros indicados, son válidas las explicaciones dadas en el apartado 4.1.2.

Por último indicar que, tal y como se argumentó en el apartado 3.1.3.3, en la Etapa III se juega como variable con las luces y el número de plantas del pórtico, adoptándose para la tensión admisible del terreno y la relación de forma de la zapata de medianería los siguientes valores fijos:

- Tensión Admisible del Terreno $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- Relación de Forma 2:1

RESULTADOS M.E.F. REDUCCIÓN ARMADURA				ETAPA III	
σ_{adm} 200 kN / m ²				FORMA 2 : 1	
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		R _m (kN)	241,80	346,77	466,24
		e _m (m)	-0,10	-0,16	-0,22
		R _i (kN)	270,67	486,14	744,99
		e _i (m)	0,11	0,18	0,19
		R _v (kN)	84,57	127,48	163,62
		e _v (m)	0,00	0,25	0,69
	M _{1v} (kN-m)	37,59	50,95	62,59	
	T (kN)	6,05	20,95	33,14	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		R _m (kN)	421,11	536,58	734,47
		e _m (m)	-0,15	-0,30	-0,31
		R _i (kN)	402,50	767,66	1102,74
		e _i (m)	0,12	0,22	0,20
R _v (kN)		73,36	127,81	215,04	
e _v (m)		0,06	0,22	0,50	
M _{1v} (kN-m)	54,62	67,20	109,69		
T (kN)	13,30	37,21	85,91		
B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700	
	ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700	
	VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
	R _m (kN)	617,22	782,95	1044,02	
	e _m (m)	-0,18	-0,31	-0,36	
	R _i (kN)	510,05	969,83	1439,33	
	e _i (m)	0,13	0,17	0,15	
	R _v (kN)	70,84	160,86	244,26	
	e _v (m)	-0,09	0,00	0,29	
M _{1v} (kN-m)	70,36	107,33	152,52		
T (kN)	14,28	49,76	93,70		
B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
	R _m (kN)		1023,99	1376,41	
	e _m (m)		-0,37	-0,44	
	R _i (kN)		1210,16	1785,85	
	e _i (m)		0,18	0,14	
	R _v (kN)		152,36	237,01	
	e _v (m)		0,08	0,27	
M _{1v} (kN-m)		145,46	186,47		
T (kN)		70,65	122,53		

Tabla 58. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Red. Arm. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES		M.E.F.	RED. ARM.	ETAPA III	
		σ_{adm} 200 kN / m ²		FORMA 2 : 1	
PLANTAS	LUZ				
	L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.700 x 850 x 500 1.300 x 1.300 x 500 1.650 x 450 x 500	2.000 x 1.000 x 600 1.700 x 1.700 x 600 3.300 x 450 x 600	2.300 x 1.150 x 700 2.100 x 2.100 x 700 4.950 x 450 x 700
		a _m (m)	0,85	1,00	1,15
		b _m (m)	1,70	2,00	2,30
		a _m /2 + e _m (m)	0,52	0,66	0,79
		c.d.g. R _m (%)	61	66	69
		σ _{max.} (kN/m ²)	280,41	340,91	376,39
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,12	1,36	1,51
		DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRIANGULAR
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.200 x 1.100 x 500 1.500 x 1.500 x 500 1.300 x 450 x 500	2.500 x 1.250 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.850 x 450 x 600	2.900 x 1.450 x 700 2.500 x 2.500 x 700 4.475 x 600 x 700
		a _m (m)	1,10	1,25	1,45
		b _m (m)	2,20	2,50	2,90
		a _m /2 + e _m (m)	0,70	0,92	1,03
		c.d.g. R _m (%)	64	74	71
		σ _{max.} (kN/m ²)	315,57	434,05	403,60
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,26	1,74	1,61
		DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.600 x 1.300 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.000 x 450 x 500	3.000 x 1.500 x 600 2.300 x 2.300 x 600 2.500 x 600 x 600	3.400 x 1.700 x 700 2.900 x 2.900 x 700 4.025 x 700 x 700
		a _m (m)	1,30	1,50	1,70
b _m (m)		2,60	3,00	3,40	
a _m /2 + e _m (m)		0,83	1,06	1,21	
c.d.g. R _m (%)		63	70	71	
σ _{max.} (kN/m ²)		330,46	391,76	415,00	
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,32	1,57	1,66	
DIAGRAMA σ		TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR	
B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.400 x 1.700 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.225 x 700 x 600	3.900 x 1.950 x 700 3.100 x 3.100 x 700 3.700 x 700 x 700	
	a _m (m)		1,70	1,95	
	b _m (m)		3,40	3,90	
	a _m /2 + e _m (m)		1,22	1,41	
	c.d.g. R _m (%)		72	72	
	σ _{max.} (kN/m ²)		419,69	437,04	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,68	1,75	
	DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR	

Tabla 59. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Red. Armadura. Etapa III.

 $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.3.2. ELIMINACIÓN DE LA VIGA CENTRADORA

El estudio de modelos de elementos finitos sin viga centradora en la Etapa III permite, por un lado, valorar la verdadera eficacia de la viga centradora y, por otro, contrastar el modelo convencional puro de zapata de medianería con colaboración de viga superior.

Las Tablas 60 y 61 muestran los resultados de dichos modelos. Los parámetros recogidos en las citadas tablas y su significado son los mismos que los mostrados en las tablas de resultados de las Etapas I y II (apartados 4.1.2 y 4.2.2.), por tanto, para cualquier aclaración sobre los parámetros indicados, son válidas las explicaciones dadas en el apartado 4.1.2.

Al igual que ya se comentó en el apartado anterior, en la Etapa III se juega como variable con las luces y el número de plantas del pórtico, adoptándose para la tensión admisible del terreno y la relación de forma de la zapata de medianería los siguientes valores fijos:

- Tensión Admisible del Terreno $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- Relación de Forma 2:1

RESULTADOS M.E.F. SIN VIGA CENTRADORA				ETAPA III	
σ_{adm} 200 kN / m ²				FORMA 2 : 1	
PLANTAS			LUZ		
			L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		R _m (kN)	238,34	331,57	451,77
		e _m (m)	-0,19	-0,29	-0,34
		R _i (kN)	325,72	608,63	943,52
		e _i (m)	-0,02	-0,02	-0,01
		R _v (kN)			
		e _v (m)			
		M _{1v} (kN·m)			
	T (kN)	3,29	26,88	38,81	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		R _m (kN)	398,50	622,84	827,71
		e _m (m)	-0,31	-0,38	-0,42
		R _i (kN)	468,82	905,69	1362,92
		e _i (m)	-0,02	-0,01	-0,02
		R _v (kN)			
		e _v (m)			
		M _{1v} (kN·m)			
	T (kN)	5,58	35,63	86,36	
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700
VIGA CENT.		1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
R _m (kN)		649,65	769,41	1095,31	
e _m (m)		-0,34	-0,43	-0,47	
R _i (kN)		624,65	1170,02	1804,37	
e _i (m)		-0,02	-0,01	-0,02	
R _v (kN)					
e _v (m)					
M _{1v} (kN·m)					
T (kN)	16,03	48,52	105,55		
B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
	R _m (kN)		978,03	1308,92	
	e _m (m)		-0,52	-0,58	
	R _i (kN)		1414,85	2171,15	
	e _i (m)		-0,02	-0,02	
	R _v (kN)				
	e _v (m)				
	M _{1v} (kN·m)				
T (kN)		77,03	132,25		

Tabla 60. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en viga superior.

M.E.F. Sin V.CEN.. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES		M.E.F.	SIN V. CEN.	ETAPA III	
		σ_{adm} 200 kN / m ²		FORMA 2 : 1	
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.700 x 850 x 500 1.300 x 1.300 x 500 1.650 x 450 x 500	2.000 x 1.000 x 600 1.700 x 1.700 x 600 3.300 x 450 x 600	2.300 x 1.150 x 700 2.100 x 2.100 x 700 4.950 x 450 x 700
		a_m (m)	0,85	1,00	1,15
		b_m (m)	1,70	2,00	2,30
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,62	0,79	0,92
		c.d.g. R_m (%)	73	79	80
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	404,64	514,29	562,76
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,62	2,06	2,25
		DIAGRAMA σ	TRIANGULAR	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.200 x 1.100 x 500 1.500 x 1.500 x 500 1.300 x 450 x 500	2.500 x 1.250 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.850 x 450 x 600	2.900 x 1.450 x 700 2.500 x 2.500 x 700 4.475 x 600 x 700
		a_m (m)	1,10	1,25	1,45
		b_m (m)	2,20	2,50	2,90
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,86	1,01	1,15
		c.d.g. R_m (%)	78	81	79
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	495,02	683,31	628,43
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,98	2,73	2,51
		DIAGRAMA σ	TRIANGULAR	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.600 x 1.300 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.000 x 450 x 500	3.000 x 1.500 x 600 2.300 x 2.300 x 600 2.500 x 600 x 600	3.400 x 1.700 x 700 2.900 x 2.900 x 700 4.025 x 700 x 700
		a_m (m)	1,30	1,50	1,70
		b_m (m)	2,60	3,00	3,40
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,99	1,18	1,32
		c.d.g. R_m (%)	76	79	78
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	532,14	542,54	566,80
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	2,13	2,17	2,27
		DIAGRAMA σ	TRIANGULAR	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.400 x 1.700 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.225 x 700 x 600	3.900 x 1.950 x 700 3.100 x 3.100 x 700 3.700 x 700 x 700
		a_m (m)		1,70	1,95
		b_m (m)		3,40	3,90
		$a_m/2 + e_m$ (m)		1,37	1,55
		c.d.g. R_m (%)		81	80
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		587,47	565,12
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		2,35	2,26
		DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR

Tabla 61. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Sin V. Centradora. Etapa III.

 $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.3.3. INCREMENTO DE ARMADURA

El análisis de los resultados de la Etapas II (apartado 5.2.) pone de manifiesto el incremento en la excentricidad o posición relativa de la resultante de la zapata de medianería, debido a la pérdida de rigidez de la viga centradora, como consecuencia de la fisuración de la misma. Dicha incremento en la excentricidad trae como consecuencia un deficiente comportamiento geotécnico de la zapata de medianería, con tensiones de contacto inadmisibles en su borde medianero.

La cuestión planteada requeriría un aumento en la rigidez de la viga centradora, que puede abordarse por dos vías. La primera, mediante el incremento de la armadura de la viga con el fin de reducir el proceso de fisuración que la debilita. La segunda, mediante el incremento del canto de la viga con el fin de aumentar su inercia y, con ello, su rigidez.

Se procede pues, en primer lugar, a experimentar con el aumento de la armadura de la viga centradora hasta una cuantía de armado (apartado 3.1.3.3) tal que se alcance una profundidad de fibra neutra próxima a $x = 0,45 \cdot d$, cuantía esta considerablemente superior a la obtenida en función de los momentos generados por los métodos convencionales

En la Tabla 62 se muestran los resultados del dimensionamiento obtenido para la armadura de la viga centradora en función del criterio descrito, indicándose en cada caso el porcentaje que representa el área de armadura obtenida con el nuevo criterio, respecto del área de armadura inicial a partir de los métodos convencionales.

Una vez definidos los armados necesarios en los distintos casos planteados, se procede al cálculo de los modelos de elementos finitos de los mismos, mostrándose sus resultados en las Tablas 63 y 64. Los parámetros recogidos en las citadas tablas y su significado son los mismos que los mostrados en las tablas de resultados de las Etapas I y II (apartados 4.1.2 y 4.2.2.), por tanto, para cualquier aclaración sobre los parámetros indicados, son válidas las explicaciones dadas en el apartado 4.1.2.

Por último indicar que, tal y como se argumentó en el apartado 3.1.3.3, en la Etapa III se juega como variable con las luces y el número de plantas del pórtico, adoptándose para la tensión admisible del terreno y la relación de forma de la zapata de medianería los siguientes valores fijos:

- Tensión Admisible del Terreno $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- Relación de Forma 2:1

DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN			M.E.F.	INC. ARMADURA	ETAPA III				
			$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN / m}^2$		FORMA 2 : 1				
PLANTAS	B + 1	LUZ							
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m			
		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA	10 Ø 12	8 Ø 12	12 Ø 12	8 Ø 12	16 Ø 12	8 Ø 12	
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
		ARM. LONG. SUP.	4 Ø 25	4 Ø 25	4Ø25 + 2Ø25	4 Ø 25	4 Ø 32	4 Ø 32	
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
		% ÁREA		2,44	% ÁREA	2,44	% ÁREA	2,56	
	B + 2	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	
		ZAPATA MEDIANERÍA	12 Ø 12	8 Ø 12	18 Ø 12	8 Ø 16	22 Ø 12	13 Ø 12	
		ZAPATA INTERIOR	8 Ø 12	8 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	18 Ø 12	18 Ø 12	
		TERCERA ZAPATA	8 Ø 12	8 Ø 12	10 Ø 12	10 Ø 12	14 Ø 12	14 Ø 12	
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
		ARM. LONG. SUP.	4Ø25 + 2Ø25	4 Ø 25	4Ø32 + 2Ø25	4 Ø 32	4Ø40 + 4Ø25	4 Ø 40	
		ARM. LONG. INF.	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
		% ÁREA		2,44	% ÁREA	2,53	% ÁREA	2,53	
		B + 3	ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
			ZAPATA MEDIANERÍA	16 Ø 12	8 Ø 16	20 Ø 12	13 Ø 12	28 Ø 12	13 Ø 16
	ZAPATA INTERIOR		10 Ø 12	10 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	24 Ø 12	24 Ø 12	
	TERCERA ZAPATA		10 Ø 12	10 Ø 12	12 Ø 12	12 Ø 12	16 Ø 12	16 Ø 12	
	VIGA CENT.		A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
	ARM. LONG. SUP.		4Ø32 + 4Ø25	4 Ø 32	4Ø40 + 4Ø32	4 Ø 40	4Ø40 + 6Ø32	4 Ø 40	
	ARM. LONG. INF.		4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
	% ÁREA			2,51	% ÁREA	2,56	% ÁREA	2,56	
	B + 4		ZAPATAS	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.	A. PLL. PT.	A. PER. PT.
			ZAPATA MEDIANERÍA			24 Ø 12	13 Ø 16	32 Ø 12	13 Ø 16
		ZAPATA INTERIOR			18 Ø 12	18 Ø 12	26 Ø 12	26 Ø 12	
		TERCERA ZAPATA			14 Ø 12	14 Ø 12	20 Ø 12	20 Ø 12	
		VIGA CENT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	A. V. CENT.	A. Z. INT.	
		ARM. LONG. SUP.			4Ø40 + 6Ø32	4 Ø 40	4Ø40 + 6Ø40	4 Ø 40	
		ARM. LONG. INF.			4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	4 Ø 16	
		% ÁREA			% ÁREA	2,56	% ÁREA	2,56	

Tabla 62. Dimensionamiento cimentación. Incremento de armadura. M.E.F. Etapa II

 $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS M.E.F. INCREMENTO ARMADURA		ETAPA III			
		σ_{adm} 200 kN / m ² FORMA 2 : 1			
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	1.700 x 850 x 500 1.300 x 1.300 x 500 1.650 x 450 x 500	2.000 x 1.000 x 600 1.700 x 1.700 x 600 3.300 x 450 x 600	2.300 x 1.150 x 700 2.100 x 2.100 x 700 4.950 x 450 x 700
		R _m (kN)	240,43	342,07	451,10
		e _m (m)	-0,09	-0,15	-0,18
		R _i (kN)	269,78	482,90	732,87
		e _i (m)	0,11	0,18	0,20
		R _v (kN)	85,40	134,82	194,39
		e _v (m)	0,00	0,20	0,35
		M _{1v} (kN-m)	38,86	58,61	93,97
		T (kN)	5,38	21,12	31,66
	B + 2	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.200 x 1.100 x 500 1.500 x 1.500 x 500 1.300 x 450 x 500	2.500 x 1.250 x 600 2.100 x 2.100 x 600 2.850 x 450 x 600	2.900 x 1.450 x 700 2.500 x 2.500 x 700 4.475 x 600 x 700
		R _m (kN)	418,53	528,43	713,54
		e _m (m)	-0,13	-0,22	-0,25
		R _i (kN)	394,00	753,44	1076,59
		e _i (m)	0,11	0,24	0,22
		R _v (kN)	80,06	149,79	252,91
		e _v (m)	0,02	0,08	0,20
		M _{1v} (kN-m)	63,66	117,91	182,65
		T (kN)	13,58	27,77	82,47
	B + 3	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.	2.600 x 1.300 x 500 1.700 x 1.700 x 500 1.000 x 450 x 500	3.000 x 1.500 x 600 2.300 x 2.300 x 600 2.500 x 600 x 600	3.400 x 1.700 x 700 2.900 x 2.900 x 700 4.025 x 700 x 700
		R _m (kN)	607,00	759,46	1027,18
		e _m (m)	-0,16	-0,23	-0,26
		R _i (kN)	513,04	953,78	1409,74
		e _i (m)	0,11	0,17	0,19
		R _v (kN)	71,09	185,84	283,98
		e _v (m)	-0,06	-0,03	0,11
		M _{1v} (kN-m)	87,71	187,89	275,83
		T (kN)	13,78	49,59	81,64
	B + 4	ZAPATA MED. ZAPATA INT. VIGA CENT.		3.400 x 1.700 x 600 2.500 x 2.500 x 600 2.225 x 700 x 600	3.900 x 1.950 x 700 3.100 x 3.100 x 700 3.700 x 700 x 700
		R _m (kN)		1018,47	1379,97
		e _m (m)		-0,32	-0,34
		R _i (kN)		1196,02	1676,49
		e _i (m)		0,18	0,19
		R _v (kN)		167,30	319,07
		e _v (m)		0,01	-0,04
		M _{1v} (kN-m)		193,11	284,41
		T (kN)		66,37	101,90

Tabla 63. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. Inc. Arm. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES		M.E.F.	INC. ARM.	ETAPA III	
		$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$		FORMA 2 : 1	
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		a_m (m)	0,85	1,00	1,15
		b_m (m)	1,70	2,00	2,30
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,52	0,65	0,76
		c.d.g. R_m (%)	61	65	66
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	276,41	327,02	332,03
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,11	1,31	1,33
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		a_m (m)	1,10	1,25	1,45
		b_m (m)	2,20	2,50	2,90
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,68	0,84	0,97
		c.d.g. R_m (%)	62	67	67
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	297,16	344,83	343,45
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,19	1,38	1,37
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700
		VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700
		a_m (m)	1,30	1,50	1,70
		b_m (m)	2,60	3,00	3,40
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,81	0,98	1,11
		c.d.g. R_m (%)	62	65	65
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	313,39	322,06	338,53
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,25	1,29	1,35
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700
		ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700
		VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700
		a_m (m)		1,70	1,95
		b_m (m)		3,40	3,90
		$a_m/2 + e_m$ (m)		1,17	1,32
		c.d.g. R_m (%)		69	68
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		374,52	372,89
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,50	1,49
		DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR

Tabla 64. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. Inc. Armadura. Etapa III.

 $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.3.4. INCREMENTO DEL CANTO DE LA VIGA CENTRADORA

La segunda vía planteada para lograr un aumento de la rigidez de la viga centradora consiste en el incremento del canto de la misma, con el fin de aumentar su inercia. Tanto en la Etapa I como en la Etapa II se plantean cimentaciones con el mínimo canto compatible con el anclaje de las armaduras de los correspondientes pilares obteniéndose, en general, zapatas flexibles.

Se plantean en la Etapa III, tres niveles de canto adicionales al contemplado en la Etapa II, que se obtienen incrementando los cantos de referencia, planteados en la Etapa II, en un 25%, 50% y 75% respectivamente (apartado 3.1.3.3). Por su parte, los armados utilizados, tanto en los pórticos como en la cimentación, son los mismos que los definidos en la Etapa II, es decir, se incrementa canto manteniendo armadura.

Una vez definidos los cantos a estudiar, se procede al cálculo de los modelos de elementos finitos de los distintos casos planteados, mostrándose sus resultados en las Tablas 65, 66, 67, 68, 69 y 70. Los parámetros recogidos en las citadas tablas y su significado son los mismos que los mostrados en las tablas de resultados de las Etapas I y II (apartados 4.1.2 y 4.2.2.), por tanto, para cualquier aclaración sobre los parámetros indicados, son válidas las explicaciones dadas en el apartado 4.1.2.

Recordar, al igual que en casos anteriores, que en la Etapa III se juega como variable con las luces y el número de plantas del pórtico, adoptándose para la tensión admisible del terreno y la relación de forma de la zapata de medianería los siguientes valores fijos:

- Tensión Admisible del Terreno $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$
- Relación de Forma 2:1

RESULTADOS		M.E.F.	ΔH	$H = 1,25 \cdot H_{II}$	ETAPA III
			σ_{adm}	200 kN/m^2	FORMA 2 : 1
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		R_m (kN)	229,01	329,30	462,54
		e_m (m)	-0,08	-0,10	-0,16
		R_i (kN)	247,83	450,45	659,17
		e_i (m)	0,10	0,17	0,20
		R_v (kN)	90,71	176,97	220,74
		e_v (m)	0,00	0,05	0,27
		M_{1v} (kN-m)	45,49	90,59	105,11
		T (kN)	2,80	20,94	28,30
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		R_m (kN)	435,71	549,02	744,69
		e_m (m)	-0,10	-0,20	-0,23
		R_i (kN)	367,52	740,07	1026,77
		e_i (m)	0,11	0,24	0,23
		R_v (kN)	86,12	158,67	274,45
		e_v (m)	0,02	0,09	0,21
		M_{1v} (kN-m)	69,20	120,77	190,63
		T (kN)	14,10	30,69	86,97
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700
		VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700
		R_m (kN)	613,96	775,83	1025,60
		e_m (m)	-0,15	-0,22	-0,28
		R_i (kN)	511,16	945,75	1405,90
		e_i (m)	0,11	0,19	0,26
		R_v (kN)	65,27	184,28	298,16
		e_v (m)	-0,01	0,01	0,15
		M_{1v} (kN-m)	91,22	200,78	284,81
		T (kN)	10,88	53,42	88,58
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700
		ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700
		VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700
		R_m (kN)		1046,36	1425,86
		e_m (m)		-0,25	-0,28
		R_i (kN)		1161,13	1629,48
		e_i (m)		0,24	0,22
		R_v (kN)		174,51	324,66
		e_v (m)		0,04	0,00
		M_{1v} (kN-m)		261,87	364,81
		T (kN)		58,32	108,80

Tabla 65. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. $H = 1,25 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES M.E.F. $H = 1,25 \cdot H_{II}$				ETAPA III		
$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$				FORMA 2 : 1		
PLANTAS		LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m		
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700	
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700	
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700	
		a_m (m)	0,85	1,00	1,15	
		b_m (m)	1,70	2,00	2,30	
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,51	0,60	0,73	
		c.d.g. R_m (%)	59	60	64	
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	248,73	263,34	317,03	
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,99	1,05	1,27	
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700	
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700	
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700	
		a_m (m)	1,10	1,25	1,45	
		b_m (m)	2,20	2,50	2,90	
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,65	0,83	0,95	
		c.d.g. R_m (%)	59	66	66	
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	280,24	347,81	343,22	
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,12	1,39	1,37	
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700	
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700	
		VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
		a_m (m)	1,30	1,50	1,70	
		b_m (m)	2,60	3,00	3,40	
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,80	0,97	1,13	
		c.d.g. R_m (%)	62	65	66	
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	308,92	327,43	351,53	
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,24	1,31	1,41	
		DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
		ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
		VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
		a_m (m)		1,70	1,95	
		b_m (m)		3,40	3,90	
		$a_m/2 + e_m$ (m)		1,10	1,25	
		c.d.g. R_m (%)		64	64	
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		338,37	346,55	
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,35	1,39	
		DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRAPECIAL	

Tabla 66. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,25 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS		M.E.F.	ΔH	$H = 1,50 \cdot H_{II}$	ETAPA III
			σ_{adm}	200 kN/m^2	FORMA 2 : 1
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		R_m (kN)	243,45	319,92	435,37
		e_m (m)	-0,07	-0,07	-0,11
		R_i (kN)	270,10	449,33	656,79
		e_i (m)	0,10	0,16	0,19
		R_v (kN)	94,59	201,60	284,37
		e_v (m)	0,00	0,03	0,12
		M_{1v} (kN-m)	49,66	118,26	155,79
		T (kN)	0,99	13,67	28,43
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		R_m (kN)	418,84	554,70	740,71
		e_m (m)	-0,08	-0,14	-0,17
		R_i (kN)	387,99	687,19	971,77
		e_i (m)	0,10	0,22	0,22
		R_v (kN)	90,69	190,74	342,10
		e_v (m)	0,01	0,03	0,08
		M_{1v} (kN-m)	90,82	149,50	245,95
		T (kN)	14,60	28,53	83,98
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700
		VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700
		R_m (kN)	622,47	781,09	1043,26
		e_m (m)	-0,13	-0,17	-0,21
		R_i (kN)	509,13	928,90	1335,18
		e_i (m)	0,10	0,17	0,25
		R_v (kN)	67,62	207,72	350,58
		e_v (m)	-0,01	0,01	0,08
		M_{1v} (kN-m)	107,39	243,17	353,95
		T (kN)	16,66	45,17	88,14
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700
		ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700
		VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700
		R_m (kN)		1037,48	1376,10
		e_m (m)		-0,20	-0,26
		R_i (kN)		1165,06	1656,37
		e_i (m)		0,24	0,23
		R_v (kN)		194,36	370,95
		e_v (m)		0,02	-0,05
		M_{1v} (kN-m)		325,89	457,73
		T (kN)		55,74	112,00

Tabla 67. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. $H = 1,50 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES		M.E.F.	$H = 1,50 \cdot H_{II}$	ETAPA III	
		σ_{adm}	200 kN / m ²	FORMA 2 : 1	
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		a _m (m)	0,85	1,00	1,15
		b _m (m)	1,70	2,00	2,30
		a _m / 2 + e _m (m)	0,50	0,57	0,69
		c.d.g. R _m (%)	59	57	60
		σ _{max.} (kN/m ²)	254,47	230,98	262,40
		σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,02	0,92	1,05
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		a _m (m)	1,10	1,25	1,45
		b _m (m)	2,20	2,50	2,90
		a _m / 2 + e _m (m)	0,63	0,76	0,89
		c.d.g. R _m (%)	58	61	62
		σ _{max.} (kN/m ²)	253,30	292,83	299,79
σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,01	1,17	1,20	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL		
B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700	
	ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700	
	VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
	a _m (m)	1,30	1,50	1,70	
	b _m (m)	2,60	3,00	3,40	
	a _m / 2 + e _m (m)	0,78	0,92	1,06	
	c.d.g. R _m (%)	60	61	62	
	σ _{max.} (kN/m ²)	291,63	291,58	314,22	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}	1,17	1,17	1,26	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL		
B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
	a _m (m)		1,70	1,95	
	b _m (m)		3,40	3,90	
	a _m / 2 + e _m (m)		1,05	1,24	
	c.d.g. R _m (%)		62	63	
	σ _{max.} (kN/m ²)		306,06	326,42	
	σ _{max.} / 1,25 σ _{adm.}		1,22	1,31	
DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRAPECIAL		

Tabla 68. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,50 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS		M.E.F.	ΔH	$H = 1,75 \cdot H_{II}$	ETAPA III
			σ_{adm}	200 kN/m^2	FORMA 2 : 1
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		R_m (kN)	238,48	324,44	420,18
		e_m (m)	-0,07	-0,06	-0,09
		R_i (kN)	263,68	433,81	646,33
		e_i (m)	0,09	0,15	0,18
		R_v (kN)	97,36	217,48	324,48
		e_v (m)	0,01	0,02	0,09
		M_{1v} (kN-m)	52,58	126,55	185,38
		T (kN)	0,79	22,03	28,75
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		R_m (kN)	421,92	572,27	728,63
		e_m (m)	-0,07	-0,10	-0,13
		R_i (kN)	385,59	648,64	954,49
		e_i (m)	0,09	0,21	0,20
		R_v (kN)	93,83	211,42	388,88
		e_v (m)	0,01	0,02	0,05
		M_{1v} (kN-m)	98,55	174,85	313,56
		T (kN)	14,91	29,66	81,25
	B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700
		ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700
		VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700
		R_m (kN)	621,71	821,46	1079,16
		e_m (m)	-0,11	-0,12	-0,16
		R_i (kN)	505,32	868,16	1305,87
		e_i (m)	0,10	0,16	0,24
		R_v (kN)	69,21	224,21	402,64
		e_v (m)	0,00	0,01	0,03
		M_{1v} (kN-m)	124,42	262,15	399,99
		T (kN)	15,90	45,02	83,66
	B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700
		ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700
		VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700
		R_m (kN)		1082,76	1389,21
		e_m (m)		-0,15	-0,22
		R_i (kN)		1126,56	1642,51
		e_i (m)		0,19	0,21
		R_v (kN)		212,19	428,25
		e_v (m)		0,02	-0,11
		M_{1v} (kN-m)		357,12	542,29
		T (kN)		54,55	108,25

Tabla 69. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradora y superior.

M.E.F. $H = 1,75 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES		M.E.F. $H = 1,75 \cdot H_{II}$	ETAPA III		
		$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$	FORMA 2 : 1		
PLANTAS	LUZ				
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA MED.	1.700 x 850 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.300 x 1.150 x 700
		ZAPATA INT.	1.300 x 1.300 x 500	1.700 x 1.700 x 600	2.100 x 2.100 x 700
		VIGA CENT.	1.650 x 450 x 500	3.300 x 450 x 600	4.950 x 450 x 700
		a_m (m)	0,85	1,00	1,15
		b_m (m)	1,70	2,00	2,30
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,49	0,56	0,67
		c.d.g. R_m (%)	58	56	58
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	243,21	220,41	233,53
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,97	0,88	0,93
	DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL	
	B + 2	ZAPATA MED.	2.200 x 1.100 x 500	2.500 x 1.250 x 600	2.900 x 1.450 x 700
		ZAPATA INT.	1.500 x 1.500 x 500	2.100 x 2.100 x 600	2.500 x 2.500 x 700
		VIGA CENT.	1.300 x 450 x 500	2.850 x 450 x 600	4.475 x 600 x 700
		a_m (m)	1,10	1,25	1,45
		b_m (m)	2,20	2,50	2,90
		$a_m/2 + e_m$ (m)	0,62	0,72	0,85
		c.d.g. R_m (%)	57	58	59
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	245,62	268,57	263,74
$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		0,98	1,07	1,05	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL		
B + 3	ZAPATA MED.	2.600 x 1.300 x 500	3.000 x 1.500 x 600	3.400 x 1.700 x 700	
	ZAPATA INT.	1.700 x 1.700 x 500	2.300 x 2.300 x 600	2.900 x 2.900 x 700	
	VIGA CENT.	1.000 x 450 x 500	2.500 x 600 x 600	4.025 x 700 x 700	
	a_m (m)	1,30	1,50	1,70	
	b_m (m)	2,60	3,00	3,40	
	$a_m/2 + e_m$ (m)	0,76	0,87	1,01	
	c.d.g. R_m (%)	59	58	59	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	280,30	271,02	291,63	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,12	1,08	1,17	
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL		
B + 4	ZAPATA MED.		3.400 x 1.700 x 600	3.900 x 1.950 x 700	
	ZAPATA INT.		2.500 x 2.500 x 600	3.100 x 3.100 x 700	
	VIGA CENT.		2.225 x 700 x 600	3.700 x 700 x 700	
	a_m (m)		1,70	1,95	
	b_m (m)		3,40	3,90	
	$a_m/2 + e_m$ (m)		1,00	1,19	
	c.d.g. R_m (%)		59	61	
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		287,99	304,06	
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,15	1,22	
DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRAPECIAL		

Tabla 70. Distribución de tensiones de contacto. M.E.F. $H = 1,75 \cdot H_{II}$. Etapa III. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES. ETAPA IV

4.4.1. RESULTADOS DE LOS MODELOS CONVENCIONALES

Se ofrecen en la Tabla 71 los resultados del cálculo del modelo convencional de zapata de esquina con dos vigas centradoras, para cada uno de los casos planteados en la Etapa IV. Los parámetros a los que hacen referencia dichos resultados son los representados en las Fig. 10, 11, 12 y 13.

La tabla, correspondiente a una tensión admisible del terreno $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y una relación de forma 2 : 1 en las zapatas de medianería auxiliares, ofrece para los distintos casos, en función de la luz y el número de plantas, los siguientes resultados:

- Dimensionamiento necesario para la zapata de esquina, zapatas de medianería auxiliares y vigas centradoras, de acuerdo con el modelo convencional.
- Resultante de las presiones de contacto en la zapata de esquina R_e (kN).
- Tensión transmitida al terreno por la zapata de esquina σ_e (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de tensiones uniformemente repartida.
- Resultante de las tensiones de contacto bajo las zapatas de medianería auxiliares R_{m1} y R_{m2} (kN).
- Tensión transmitida al terreno por las zapatas de medianería σ_{m1} y σ_{m2} (kN/m²), calculada bajo la hipótesis de distribución de presiones uniformemente repartida.
- Momentos flectores de servicio M_{1c1} y M_{1c2} en la sección más desfavorable de las dos vigas centradoras (unión de la viga centradora con la zapata de esquina).

Al considerar el modelo convencional de zapata con viga centradora, distribuciones de tensiones sobre el terreno uniformemente repartidas, las resultantes en cuestión se encuentran aplicadas en el centro de las respectivas zapatas. Por ese motivo, no se hace aquí referencia a ninguna excentricidad respecto del centro de las zapatas, ya que sería en todos los casos nula.

RESULTADOS MÉTODO CLÁSICO ESQUINA				ETAPA IV	
σ_{adm} 200 kN / m ²				FORMA 2 : 1	
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.000 x 1.000 x 500 1.400 x 700 x 500 1.450 x 450 x 500	1.200 x 1.200 x 600 2.000 x 1.000 x 600 2.950 x 450 x 600	1.600 x 1.600 x 700 2.700 x 1.350 x 700 4.200 x 450 x 700
		R _e (kN)	173,32	281,49	465,50
		σ_e (kN/m ²)	173,32	195,48	181,84
		R _{m1} (kN)	178,41	396,40	688,11
		σ_{m1} (kN/m ²)	182,06	198,20	188,78
		R _{m2} (kN)	176,01	396,11	709,34
		σ_{m2} (kN/m ²)	179,60	198,05	194,61
		M _{1c1} (kN-m)	31,12	68,26	163,87
		M _{1c2} (kN-m)	32,62	74,32	177,82
	B + 2	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.200 x 1.200 x 500 1.700 x 850 x 500 1.100 x 450 x 500	1.500 x 1.500 x 600 2.500 x 1.250 x 600 2.400 x 450 x 600	2.000 x 2.000 x 700 3.300 x 1.650 x 700 3.525 x 600 x 700
		R _e (kN)	279,79	442,23	767,64
		σ_e (kN/m ²)	194,30	196,55	191,91
		R _{m1} (kN)	262,04	594,11	1075,65
		σ_{m1} (kN/m ²)	181,34	190,12	197,55
		R _{m2} (kN)	251,34	582,59	1035,31
		σ_{m2} (kN/m ²)	173,94	186,43	190,14
		M _{1c1} (kN-m)	66,37	149,95	344,39
		M _{1c2} (kN-m)	67,74	155,58	361,75
B + 3	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.500 x 1.500 x 500 1.800 x 900 x 500 750 x 450 x 500	1.900 x 1.900 x 600 2.800 x 1.400 x 600 1.850 x 600 x 600	2.400 x 2.400 x 700 3.800 x 1.900 x 700 2.875 x 700 x 700	
	R _e (kN)	436,27	666,96	1094,16	
	σ_e (kN/m ²)	193,90	184,75	189,96	
	R _{m1} (kN)	319,50	780,49	1429,06	
	σ_{m1} (kN/m ²)	197,22	199,10	197,93	
	R _{m2} (kN)	296,87	748,10	1353,55	
	σ_{m2} (kN/m ²)	183,25	190,84	187,47	
	M _{1c1} (kN-m)	122,52	274,35	588,45	
	M _{1c2} (kN-m)	123,63	279,37	604,50	
B + 4	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.		2.200 x 2.200 x 600 3.200 x 1.600 x 600 1.375 x 700 x 600	2.800 x 2.800 x 700 4.300 x 2.150 x 700 2.250 x 700 x 700	
	R _e (kN)		933,63	1499,82	
	σ_e (kN/m ²)		192,90	191,30	
	R _{m1} (kN)		998,79	1809,04	
	σ_{m1} (kN/m ²)		195,08	195,68	
	R _{m2} (kN)		902,81	1633,49	
	σ_{m2} (kN/m ²)		176,33	176,69	
	M _{1c1} (kN-m)		421,99	910,85	
	M _{1c2} (kN-m)		427,79	928,51	

Tabla 71. Zapata de esquina con vigas centradoras. Modelo convencional. Etapa IV

Resultados para $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

4.4.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Los resultados de los modelos de elementos finitos de la Etapa IV se exponen en dos grupos de tablas, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Resultantes y excentricidades absolutas de tensiones de contacto con el terreno y esfuerzos en las vigas centradoras (Tablas 72, 73, 75 y 76)
- Excentricidades relativas de tensiones de contacto con el terreno, tipo de diagrama de distribución de tensiones y tensiones máximas (Tablas 74 y 77)

El primer grupo de tablas (Tablas 72, 73, 75 y 76) muestra las dimensiones de las zapatas utilizadas en el modelo (tanto la de esquina como las auxiliares de medianería), las resultantes de las tensiones de contacto con el terreno (resultante de tensiones de la zapata de esquina (R_e), resultante de las zapatas de medianería auxiliares (R_{m1} y R_{m2}) y resultante de las vigas centradoras (R_{c1} y R_{c2})), así como las localizaciones de dichas resultantes mediante la excentricidad absoluta de su punto de aplicación respecto del punto medio de la zapata o la viga en cuestión (excentricidades de la resultante de esquina (e_{ex} y e_{ey}), excentricidades de las resultantes de las zapatas de medianería (e_{m1y} y e_{m2x}) y excentricidades de la resultante de las vigas centradoras (e_{c1y} y e_{c2x})). Por último, en este primer grupo de tablas de modelos de elementos finitos, se muestran los momentos flectores de servicio de las vigas centradoras (M_{1c1} y M_{1c2}).

Por su parte, las Tablas 74 y 77 muestran las posiciones relativas de las resultantes de tensiones de contacto de las zapatas de esquina R_e para los distintos casos estudiados, junto con la tensión máxima (σ_{max}) generada en el diagrama de tensiones equivalente, acompañada del resultado de la comprobación de tensiones de contacto o verificación del E.L.U. de hundimiento.

Las tablas están ordenadas según el nivel de rigidez de la viga centradora en función del canto de la misma, variando en función de las luces y número de plantas del pórtico, para unos valores fijos $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1 en las zapatas de medianería auxiliares.

RESULTADOS		M.E.F.	ESQUINA	$H = H_{\min}$ $\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$	ETAPA IV FORMA 2 : 1
PLANTAS	B + 1	LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
		ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.000 x 1.000 x 500 1.400 x 700 x 500 1.450 x 450 x 500	1.200 x 1.200 x 600 2.000 x 1.000 x 600 2.950 x 450 x 600	1.600 x 1.600 x 700 2.700 x 1.350 x 700 4.200 x 450 x 700
		R_e (kN)	107,61	162,33	293,45
		e_{ex} (m)	0,11	0,16	0,32
		e_{ey} (m)	0,09	0,15	0,32
		R_{m1} (kN)	119,82	263,17	513,12
		e_{m1y} (m)	0,17	0,22	0,32
		R_{m2} (kN)	107,49	253,34	573,84
		e_{m2x} (m)	0,15	0,22	0,36
	B + 2	R_{c1} (kN)	59,04	128,41	199,99
		e_{c1y} (m)	0,00	0,06	0,22
		R_{c2} (kN)	57,68	126,23	183,22
		e_{c2x} (m)	0,00	0,06	0,21
		M_{1c1} (kN·m)	23,47	50,70	76,86
		M_{1c2} (kN·m)	23,35	53,17	75,96
		ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.200 x 1.200 x 500 1.700 x 850 x 500 1.100 x 450 x 500	1.500 x 1.500 x 600 2.500 x 1.250 x 600 2.400 x 450 x 600	2.000 x 2.000 x 700 3.300 x 1.650 x 700 3.525 x 600 x 700
		R_e (kN)	196,80	299,64	546,16
		e_{ex} (m)	0,14	0,27	0,43
		e_{ey} (m)	0,12	0,27	0,47
		R_{m1} (kN)	201,74	469,15	866,20
		e_{m1y} (m)	0,17	0,28	0,29
		R_{m2} (kN)	183,27	460,84	809,36
		e_{m2x} (m)	0,15	0,30	0,28
		R_{c1} (kN)	63,17	145,36	253,39
		e_{c1y} (m)	0,01	0,06	0,20
		R_{c2} (kN)	61,24	132,77	225,08
		e_{c2x} (m)	0,01	0,04	0,20
		M_{1c1} (kN·m)	40,10	71,30	118,58
		M_{1c2} (kN·m)	39,51	71,01	128,82

Tabla 72. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina

M.E.F. $H = H_{\min}$ (I). Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS		M.E.F.	ESQUINA	$H = H_{\min}$ $\sigma_{adm} \ 200 \text{ kN/m}^2$	ETAPA IV FORMA 2 : 1
		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
PLANTAS	B + 3	ZAPATA ESQUINA	1.500 x 1.500 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.400 x 2.400 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.800 x 900 x 500	2.800 x 1.400 x 600	3.800 x 1.900 x 700
		VIGAS CENT.	750 x 450 x 500	1.850 x 600 x 600	2.875 x 700 x 700
		R_e (kN)	326,20	513,78	863,53
		e_{ex} (m)	0,20	0,37	0,55
		e_{ey} (m)	0,18	0,37	0,61
		R_{m1} (kN)	272,41	654,74	1295,32
		e_{m1y} (m)	0,18	0,23	0,24
		R_{m2} (kN)	239,01	606,33	1168,47
		e_{m2x} (m)	0,15	0,22	0,21
		R_{c1} (kN)	56,03	160,76	272,23
		e_{c1y} (m)	0,02	0,04	0,12
	B + 4	R_{c2} (kN)	53,15	150,75	233,39
		e_{c2x} (m)	0,01	0,02	0,15
		M_{1c1} (kN-m)	53,04	122,54	195,26
		M_{1c2} (kN-m)	53,19	124,58	204,12
		ZAPATA ESQUINA		2.200 x 2.200 x 600	2.800 x 2.800 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2		3.200 x 1.600 x 600	4.300 x 2.150 x 700
		VIGAS CENT.		1.375 x 700 x 600	2.250 x 700 x 700
		R_e (kN)		788,70	1256,80
		e_{ex} (m)		0,43	0,66
		e_{ey} (m)		0,52	0,66
		R_{m1} (kN)		884,68	1681,77
		e_{m1y} (m)		0,19	0,20
		R_{m2} (kN)		818,69	1467,32
		e_{m2x} (m)		0,17	0,19
		R_{c1} (kN)		156,71	251,33
		e_{c1y} (m)		0,00	0,09
		R_{c2} (kN)		133,75	229,22
		e_{c2x} (m)		0,01	0,03
		M_{1c1} (kN-m)		161,33	265,01
		M_{1c2} (kN-m)		170,00	264,64

Tabla 73. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina
M.E.F. $H = H_{\min}$ (II). Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DISTRIBUCIÓN TENSIONES M.E.F. ESQUINA $H_{\min}$					ETAPA IV
$\sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2$					FORMA 2 : 1
PLANTAS		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
	B + 1	ZAPATA ESQUINA	1.000 x 1.000 x 500	1.200 x 1.200 x 600	1.600 x 1.600 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.400 x 700 x 500	2.000 x 1.000 x 600	2.700 x 1.350 x 700
		VIGAS CENT.	1.450 x 450 x 500	2.950 x 450 x 600	4.200 x 450 x 700
		$a_e = b_e$ (m)	1,000	1,200	1,600
		$a_e/2 + e_{ex}$ (m)	0,608	0,761	1,118
		$b_e/2 + e_{ey}$ (m)	0,590	0,751	1,118
		c.d.g. R_{ex} (%)	61	63	70
		c.d.g. R_{ey} (%)	59	63	70
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	235,78	288,50	431,04
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,94	1,15	1,72
		DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRAPEZIAL	TRIANGULAR
	B + 2	ZAPATA ESQUINA	1.200 x 1.200 x 500	1.500 x 1.500 x 600	2.000 x 2.000 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.700 x 850 x 500	2.500 x 1.250 x 600	3.300 x 1.650 x 700
		VIGAS CENT.	1.100 x 450 x 500	2.400 x 450 x 600	3.525 x 600 x 700
		$a_e = b_e$ (m)	1,200	1,500	2,000
		$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)	0,741	1,020	1,433
		$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)	0,722	1,016	1,466
		c.d.g. R_{ex} (%)	62	68	72
		c.d.g. R_{ey} (%)	60	68	73
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	316,50	464,99	560,58
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,27	1,86	2,24
		DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 3	ZAPATA ESQUINA	1.500 x 1.500 x 500	1.900 x 1.900 x 600	2.400 x 2.400 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.800 x 900 x 500	2.800 x 1.400 x 600	3.800 x 1.900 x 700
		VIGAS CENT.	750 x 450 x 500	1.850 x 600 x 600	2.875 x 700 x 700
		$a_e = b_e$ (m)	1,500	1,900	2,400
		$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)	0,946	1,317	1,751
		$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)	0,930	1,316	1,810
		c.d.g. R_{ex} (%)	63	69	73
		c.d.g. R_{ey} (%)	62	69	75
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	363,06	523,57	643,60
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,45	2,09	2,57
		DIAGRAMA σ	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	TRIANGULAR
	B + 4	ZAPATA ESQUINA		2.200 x 2.200 x 600	2.800 x 2.800 x 700
		ZAPATA MED.1 Y 2		3.200 x 1.600 x 600	4.300 x 2.150 x 700
		VIGAS CENT.		1.375 x 700 x 600	2.250 x 700 x 700
		$a_e = b_e$ (m)		2,200	2,800
		$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)		1,528	2,064
		$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)		1,623	2,062
		c.d.g. R_{ex} (%)		69	74
		c.d.g. R_{ey} (%)		74	74
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		650,35	683,81
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		2,60	2,74
		DIAGRAMA σ		TRIANGULAR	TRIANGULAR

Tabla 74. Distribución de tensiones de contacto. Zapata de esquina. M.E.F.

H = $H_{\min}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS		M.E.F.	ESQUINA	H = 1,75 · H _{min} σ _{adm} 200 kN / m ²		ETAPA IV FORMA 2 : 1
PLANTAS	B + 1	LUZ				
		L = 3 m		L = 5 m		L = 7 m
		ZAPATA ESQUINA	1.000 x 1.000 x 875	1.200 x 1.200 x 1.050	1.600 x 1.600 x 1.225	
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.400 x 700 x 875	2.000 x 1.000 x 1.050	2.700 x 1.350 x 1.225	
		VIGAS CENT.	1.450 x 450 x 875	2.950 x 450 x 1.050	4.200 x 450 x 1.225	
		R _e (kN)	102,97	143,19	253,91	
		e _{ex} (m)	0,07	0,07	0,13	
		e _{ey} (m)	0,06	0,07	0,13	
		R _{m1} (kN)	116,91	247,46	473,58	
		e _{m1y} (m)	0,16	0,19	0,28	
		R _{m2} (kN)	103,90	234,16	543,87	
		e _{m2x} (m)	0,13	0,18	0,37	
		R _{c1} (kN)	66,22	156,21	256,37	
		e _{c1y} (m)	0,01	0,03	0,05	
		R _{c2} (kN)	65,45	155,96	249,62	
		e _{c2x} (m)	0,01	0,03	0,05	
		M _{1c1} (kN·m)	29,78	76,73	148,55	
		M _{1c2} (kN·m)	29,83	80,85	157,75	
	B + 2	ZAPATA ESQUINA	1.200 x 1.200 x 875	1.500 x 1.500 x 1.050	2.000 x 2.000 x 1.225	
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.700 x 850 x 875	2.500 x 1.250 x 1.050	3.300 x 1.650 x 1.225	
		VIGAS CENT.	1.100 x 450 x 875	2.400 x 450 x 1.050	3.525 x 600 x 1.225	
		R _e (kN)	192,70	280,94	491,96	
		e _{ex} (m)	0,09	0,11	0,17	
		e _{ey} (m)	0,08	0,10	0,19	
		R _{m1} (kN)	200,44	451,88	812,98	
		e _{m1y} (m)	0,16	0,24	0,30	
		R _{m2} (kN)	181,80	416,13	753,65	
		e _{m2x} (m)	0,13	0,21	0,31	
		R _{c1} (kN)	68,87	170,12	332,21	
		e _{c1y} (m)	0,01	0,00	0,05	
		R _{c2} (kN)	67,35	166,46	315,78	
		e _{c2x} (m)	0,01	0,01	0,01	
		M _{1c1} (kN·m)	52,64	132,28	277,55	
		M _{1c2} (kN·m)	52,21	136,59	296,70	

Tabla 75. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina
M.E.F. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$ (I). Etapa IV. $\sigma_{\text{adm.}} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

RESULTADOS		M.E.F.	ESQUINA	$H = 1,75 \cdot H_{\min}$ $\sigma_{\text{adm}} = 200 \text{ kN/m}^2$	ETAPA IV FORMA 2 : 1
		LUZ			
		L = 3 m	L = 5 m	L = 7 m	
PLANTAS	B + 3	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.	1.500 x 1.500 x 875 1.800 x 900 x 875 750 x 450 x 875	1.900 x 1.900 x 1.050 2.800 x 1.400 x 1.050 1.850 x 600 x 1.050	2.400 x 2.400 x 1.225 3.800 x 1.900 x 1.225 2.875 x 700 x 1.225
		R_e (kN)	325,15	492,88	806,01
		e_{ex} (m)	0,13	0,14	0,23
		e_{ey} (m)	0,12	0,14	0,25
		R_{m1} (kN)	270,97	627,22	1246,94
		e_{m1y} (m)	0,17	0,25	0,44
		R_{m2} (kN)	238,62	566,93	1074,53
		e_{m2x} (m)	0,13	0,21	0,30
		R_{c1} (kN)	57,84	184,62	359,25
		e_{c1y} (m)	0,02	0,00	0,02
		R_{c2} (kN)	56,56	181,74	329,37
		e_{c2x} (m)	0,01	0,00	0,00
		M_{1c1} (kN-m)	73,99	212,54	398,95
		M_{1c2} (kN-m)	76,02	224,60	423,33
	B + 4	ZAPATA ESQUINA ZAPATA MED.1 Y 2 VIGAS CENT.		2.200 x 2.200 x 1.050 3.200 x 1.600 x 1.050 1.375 x 700 x 1.050	2.800 x 2.800 x 1.225 4.300 x 2.150 x 1.225 2.250 x 700 x 1.225
		R_e (kN)		778,10	1208,48
		e_{ex} (m)		0,21	0,32
		e_{ey} (m)		0,26	0,31
		R_{m1} (kN)		874,08	1633,45
		e_{m1y} (m)		0,26	0,41
		R_{m2} (kN)		775,76	1419,69
		e_{m2x} (m)		0,22	0,32
		R_{c1} (kN)		166,13	335,31
		e_{c1y} (m)		0,00	0,01
		R_{c2} (kN)		158,24	303,45
		e_{c2x} (m)		0,01	0,00
		M_{1c1} (kN-m)		246,08	473,36
		M_{1c2} (kN-m)		283,85	533,39

Tabla 76. Resultantes tensiones terreno y esfuerzos en vigas centradoras. Zapata de esquina
M.E.F. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$. (II). Etapa IV. $\sigma_{\text{adm.}} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

DIST. TENSIONES		M.E.F.	ESQUINA	$H = 1,75 \cdot H_{\min}$	σ_{adm}	200 kN / m ²	ETAPA IV	FORMA 2 : 1
PLANTAS	B + 1	ZAPATA ESQUINA	1.000 x 1.000 x 875	1.200 x 1.200 x 1.050	1.600 x 1.600 x 1.225			
		ZAPATA MED.1 Y 2	1.400 x 700 x 875	2.000 x 1.000 x 1.050	2.700 x 1.350 x 1.225			
		VIGAS CENT.	1.450 x 450 x 875	2.950 x 450 x 1.050	4.200 x 450 x 1.225			
		$a_e = b_e$ (m)	1,000	1,200	1,600			
		$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)	0,572	0,674	0,930			
		$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)	0,557	0,667	0,933			
		c.d.g. R_{ex} (%)	57	56	58			
		c.d.g. R_{ey} (%)	56	56	58			
		$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	182,50	169,74	197,25			
		$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,73	0,68	0,79			
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL					
B + 2	ZAPATA ESQUINA	1.200 x 1.200 x 875	1.500 x 1.500 x 1.050	2.000 x 2.000 x 1.225				
	ZAPATA MED.1 Y 2	1.700 x 850 x 875	2.500 x 1.250 x 1.050	3.300 x 1.650 x 1.225				
	VIGAS CENT.	1.100 x 450 x 875	2.400 x 450 x 1.050	3.525 x 600 x 1.225				
	$a_e = b_e$ (m)	1,200	1,500	2,000				
	$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)	0,692	0,859	1,166				
	$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)	0,677	0,847	1,194				
	c.d.g. R_{ex} (%)	58	57	58				
	c.d.g. R_{ey} (%)	56	56	60				
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	246,68	227,62	255,59				
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	0,99	0,91	1,02				
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL					
B + 3	ZAPATA ESQUINA	1.500 x 1.500 x 875	1.900 x 1.900 x 1.050	2.400 x 2.400 x 1.225				
	ZAPATA MED.1 Y 2	1.800 x 900 x 875	2.800 x 1.400 x 1.050	3.800 x 1.900 x 1.225				
	VIGAS CENT.	750 x 450 x 875	1.850 x 600 x 1.050	2.875 x 700 x 1.225				
	$a_e = b_e$ (m)	1,500	1,900	2,400				
	$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)	0,885	1,094	1,428				
	$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)	0,869	1,088	1,450				
	c.d.g. R_{ex} (%)	59	58	60				
	c.d.g. R_{ey} (%)	58	57	60				
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)	290,88	258,13	307,18				
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$	1,16	1,03	1,23				
DIAGRAMA σ	TRAPECIAL	TRAPECIAL	TRAPECIAL					
B + 4	ZAPATA ESQUINA		2.200 x 2.200 x 1.050	2.800 x 2.800 x 1.225				
	ZAPATA MED.1 Y 2		3.200 x 1.600 x 1.050	4.300 x 2.150 x 1.225				
	VIGAS CENT.		1.375 x 700 x 1.050	2.250 x 700 x 1.225				
	$a_e = b_e$ (m)		2,200	2,800				
	$a_e/2 + e_{m2x}$ (m)		1,314	1,722				
	$b_e/2 + e_{m1y}$ (m)		1,357	1,713				
	c.d.g. R_{ex} (%)		60	61				
	c.d.g. R_{ey} (%)		62	61				
	$\sigma_{max.}$ (kN/m ²)		367,19	363,89				
	$\sigma_{max.} / 1,25 \sigma_{adm.}$		1,47	1,46				
DIAGRAMA σ		TRAPECIAL	TRAPECIAL					

Tabla 77. Distribución de tensiones de contacto. Zapata de esquina. M.E.F.

 $H = 1,75 \cdot H_{\min}$. Etapa IV. $\sigma_{adm.} = 200 \text{ kN/m}^2$ y relación de forma 2 : 1

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA I

5.1.1. ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA

MOMENTO FLECTOR

Uno de los aspectos más llamativo de las cimentaciones de medianería con viga centradora es la considerable escuadría de la viga centradora y la importante cuantía de armado que resulta en su cara traccionada, como consecuencia del importante trabajo a flexión que realiza la misma, con un elevado momento flector en la sección de contacto de la viga con la zapata de medianería.

No obstante, si bien es cierto que el trabajo a flexión de la viga centradora es innegable, resulta sorprendente el contraste entre los valores del momento flector de la viga centradora obtenidos según el modelo convencional y según el modelo de elementos finitos.

En las Fig. 65, 66 y 67 se ofrece la comparación entre el valor del momento flector obtenido por métodos convencionales (CLÁSICO) y por el método de elementos finitos (M.E.F.). La Fig. 65 muestra la influencia del nivel de rigidez del pórtico para una relación de forma 1:1 y una tensión admisible del terreno de 100 kN/m^2 . Dicha figura pone claramente de manifiesto que los momentos obtenidos por el método convencional son del orden del doble de los obtenidos por elementos finitos, no pareciendo tener mucha influencia el nivel de rigidez del pórtico en la magnitud de la comparación

Fig.65. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la rigidez del pórtico

Por su parte, en la Fig. 66, se comparan los momentos flectores en función de la tensión admisible del terreno, para las distintas relaciones de forma consideradas. Dado que ha quedado vista la poca influencia de la rigidez del pórtico, se muestran solamente los del tipo de rigidez h 300. Los tres gráficos de la Fig.66, muestran que cuanto menor es la tensión admisible del terreno mayor es la diferencia entre los dos métodos, llegando como tope a ser el doble en el caso de suelos con una tensión admisible de 100 kN/m^2 .

Fig.66. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la tensión admisible del terreno

Finalmente, la Fig.67 presenta la evolución de la diferencia en el momento flector a medida que varía la relación de forma de la zapata de medianería, para las distintas tensiones admisibles del terreno consideradas, siendo mayor dicha diferencia a medida que se utilizan zapatas de medianería cada vez más cuadradas.

Fig.67. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la relación de forma

Resulta interesante señalar que en las Fig. 66 y 67 se aprecia otra cuestión y es que, mientras en el modelo convencional el momento flector crece continuamente a medida que disminuye la tensión admisible o se hace más cuadrada la zapata de medianería, en el modelo de elementos finitos el momento crece ligeramente al inicio de dicha tendencia pero finalmente tiende a estabilizarse o incluso experimenta un pequeño descenso.

De las tres variables analizadas, son las dos últimas las que tienen una clara incidencia en la diferencia en el resultado del momento flector, mientras que la primera (la variación de la rigidez del pórtico) no parece influir.

La escasa influencia de la rigidez del pórtico resulta sorprendente respecto de las intuiciones iniciales, que puede encontrar su explicación en el siguiente razonamiento (Fig.68). La

hipótesis del modelo convencional de distribución de tensiones uniformemente repartida, con resultante centrada, no es cierta. Ambas zapatas, debido al trabajo a flexión de la viga centradora, experimentan giros que invalidan la hipótesis de pilares perfectamente empotrados y suponen empotramientos flexibles de las bases de los pilares.

Fig.68. Giro de la cimentación según el modelo de elementos finitos

Caben a partir de aquí tres posibles lecturas. La primera es que por muy rígido que sea el pórtico, poca influencia puede tener al respecto, si su vinculación con la cimentación se “flexibiliza”. La segunda es que, aunque se hayan considerado tres niveles de rigidez, la eficacia de cualquiera de ellos ha sido muy limitada por ser todos del mismo orden de magnitud y, habría que hablar de pilares mucho más apantallados o incluso pantallas (propias de estructuras sometidas a importantes esfuerzos horizontales) para lograr un resultado realmente eficaz en el control de la deformación de la viga centradora. Y la tercera es que, en el estudio se ha contemplado únicamente la rigidez del pórtico, manteniendo constante el canto de la cimentación. Dado que la flexión de la viga centradora y los giros que induce en las zapatas están en el centro del debate, a la vista de los resultados surge un nuevo camino de búsqueda, que es el estudio de la influencia de la rigidez de la propia cimentación, analizando el comportamiento de ésta con diferentes cantos.

EXCENTRICIDAD DE LAS RESULTANTES DE TENSIONES DE CONTACTO

La explicación de la gran diferencia entre el valor del momento flector de la viga centradora obtenido por métodos convencionales o por elementos finitos (diferencia que puede llegar a tener valor doble), se encuentra en el mecanismo que regula la flexión de la propia viga centradora. Dicho mecanismo queda claramente reflejado en el esquema del modelo convencional representado en la Fig. 69.

Fig.69. Modelo convencional de zapata de medianería con viga centradora

El modelo convencional considera el conjunto de la cimentación (zapatas más viga centradora) como un único elemento lineal, apoyado en los pilares, que recibe como carga las tensiones de contacto entre las zapatas y el terreno. Debido al desplazamiento del centro de la zapata de medianería respecto del eje del pilar, la resultante de dichas tensiones de contacto en la zapata de medianería se sitúa entre ambos apoyos, generando un momento flector cuyo valor aumenta cuanto mayor sea la magnitud de la resultante y más hacia el centro del vano se sitúe la citada resultante.

El modelo convencional plantea un diagrama de distribución de tensiones de contacto uniformemente repartido, con resultante aplicada en el centro de la cara inferior de la zapata de medianería. Dicho diagrama presupone la ausencia de giros en las zapatas y la hipótesis

de pilares perfectamente empotrados. Los resultados del modelo de elementos finitos, en la Etapa I, reflejados en las Tablas 17, 18 y 19, confirman la idea del giro de las zapatas inducido por la flexión de la viga centradora. Dicho giro hace que las resultantes de tensiones de contacto en el modelo de elementos finitos no se apliquen en el centro de la cara inferior de la zapata de medianería, sino que presenten una excentricidad respecto de dicho centro de la zapata que las aleja del centro del vano y las aproxima al eje del pilar (apoyo del elemento lineal virtual del modelo convencional).

En los gráficos de las Fig. 70, 71 y 72 se representa la evolución de la excentricidad de las resultantes de tensiones en la zapata de medianería respecto del centro de la cara inferior de la zapata, así como la variación del valor de las citadas resultantes.

Fig.70. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función del nivel de rigidez del pórtico

Los gráficos de la Fig.70 confirman, de nuevo, la no influencia de la rigidez del pórtico en el comportamiento de la cimentación al no apreciarse variaciones en el valor de la resultante y ser muy reducida la variación en la excentricidad al cambiar el nivel de rigidez del pórtico.

En cambio, los gráficos de las Fig.71 y 72 evidencian la influencia de las otras dos variables, ya que, a medida que disminuye la tensión admisible del terreno o la zapata de medianería se hace más cuadrada, aumentan el valor de la resultante y la excentricidad de la misma respecto del centro de la zapata de medianería.

Fig.71. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función de la tensión admisible del terreno

Fig.72. Variación de la excentricidad y valor de la resultante de la zapata de medianería en función de la relación de forma de la zapata

Este hecho explica el aumento de la diferencia en el momento flector de la viga centradora entre ambos modelos al disminuir la tensión admisible del terreno o hacer la zapata de medianería más cuadrada, ya que es obvio que mayores resultantes desplazadas a una mayor distancia producen una mayor variación del momento flector. El desplazamiento de resultante que manifiesta el modelo de elementos finitos se produce hacia el pilar de medianería, es decir, alejándose del centro del vano de la viga centradora y aproximándose al apoyo, por lo cual, la creciente variación del momento flector se traduce en una creciente reducción del mismo (Fig.73).

Fig.73. Desplazamiento de la resultante de tensiones de la zapata de medianería

Analizado el mecanismo que regula la flexión en la viga centradora, cabe plantearse que las dos variables que sí influyen sobre el momento flector de la misma podrían tener un mecanismo de funcionamiento común. Realmente, tanto las tensiones admisibles bajas, como las zapatas de medianería de forma cuadrada, lo que hacen es conducir a zapatas de mayor tamaño, que invaden cada vez más el espacio correspondiente a la viga centradora. Cuanto mayor es el porcentaje de luz del vano de medianería invadido por la zapata de medianería, mayor es el momento resultante en el modelo convencional y mayor la diferencia de momento respecto del modelo de elementos finitos. Podría afirmarse, entonces, que la tensión admisible y la relación de forma no intervienen directamente en el problema, sino más bien de forma indirecta, a través del porcentaje de luz de vano de medianería que invaden las zapatas que generan.

Asimismo, el mecanismo de la flexión en la viga centradora, a partir de la posición de la resultante de medianería, puede explicar la estabilización observada en el momento en el modelo de elementos finitos (Fig.66 y 67) y puede conducir al concepto de eficacia de la zapata de medianería (Fig.74).

Fig.74. Reducción de eficacia de las zonas de la zapata de medianería próximas al centro del vano

En el modelo convencional, que siempre plantea la resultante en el centro de la cara inferior de la zapata de medianería, la resultante acompaña al crecimiento de la zapata en la dirección del pórtico, de tal modo que cuanto más porcentaje de luz invade la zapata de medianería más hacia el centro del vano se sitúa la resultante y más momento flector produce.

En el modelo de elementos finitos, en cambio, cuanto mayor es el porcentaje de luz invadido por la zapata, mayor es la excentricidad en contra que experimenta la resultante. Es como si al crecer la zapata la resultante se frenase, “negándose” a acompañar a la zapata en su crecimiento y generando un momento flector que tiende a estabilizarse en un tope límite (en el sentido de límite matemático de una función). Esta idea encuentra su apoyo en la deformada de casos extremos que invaden un porcentaje muy elevado de luz de vano (Fig.74). En tales casos, debido al giro y a la deformación que sufre la zapata de medianería, las zonas de la misma situadas hacia el interior del vano no son tan eficaces en su función de transmitir carga al terreno. Por ello, llegará un momento en que, por mucho que crezca la zapata en ese sentido, la distribución de tensiones seguirá produciéndose en un determinado sector en torno al pilar, es como si la resultante se “negará” a acompañar al crecimiento de la zapata más allá de un determinado punto, a partir del cual cualquier crecimiento de la zapata se convierte en ineficaz.

5.1.2. ESFUERZOS EN LA VIGA SUPERIOR

Cuando se utiliza zapata de medianería con viga centradora, la viga de la primera planta que se encuentra sobre la viga centradora cumple una doble misión. Por un lado, el habitual trabajo a flexión de la viga recibiendo las cargas propias del correspondiente forjado y, por otro, la función adicional de tirante para colaborar junto con la viga centradora en la estabilización de la zapata de medianería. Se produce, por tanto, una combinación simultánea de los dos modelos convencionales (viga centradora y tirante). Este hecho puede suponer, en la práctica, el infradimensionado de la armadura de la viga de la primera planta, ya que se encuentra realmente solicitada a flexotracción y es muy usual su dimensionamiento a flexión simple, despreciando el esfuerzo axial de tracción inducido por el efecto tirante.

Las Fig.75, 76 y 77 muestran la evolución del axil de tracción en la viga de la primera planta al variar la rigidez del pórtico, la tensión admisible y la relación de forma respectivamente. Dicha variación en la tracción de la viga superior se expone para los tres modelos estudiados (M.E.F., modelo convencional con tirante y modelo convencional con viga centradora). Los dos primeros modelos sí contemplan directamente la viga de la primera planta. En cambio, el modelo convencional con viga centradora no considera dicha viga, por lo cual, el esfuerzo axial de tracción ofrecido para el citado modelo corresponde al obtenido en el cálculo matricial del pórtico tipo en la hipótesis de pilares perfectamente empotrados en su base.

Fig.75. Variación del esfuerzo axial en la viga de la primera planta en función de la rigidez del pórtico

Tal y como ya se ha comprobado en análisis anteriores, la rigidez del pórtico (Fig.75) tiene poca influencia sobre esta cuestión, siendo de nuevo la tensión admisible del terreno y la relación de forma, las variables que más inciden en el problema (Fig.76 y 77).

Fig.76. Variación del esfuerzo axil en la viga de la primera planta en función de la tensión admisible del terreno

Fig.77. Variación del esfuerzo axil en la viga de la primera planta en función de la relación de forma

A la vista de los gráficos de las Fig. 76 y 77, resulta especialmente llamativa la magnitud de los esfuerzos axiales de tracción que genera el modelo convencional con tirante, que se incrementan considerablemente a medida que disminuye la tensión admisible del terreno o se utilizan zapatas de medianería cada vez más cuadradas.

Por su parte, los resultados proporcionados por el modelo de elementos finitos confirman el trabajo a flexotracción de la viga de la primera planta pero, en contra del temor inicial, las tracciones que se producen en la viga superior en dicho modelo son considerablemente inferiores a las obtenidas por el modelo convencional con tirante y, por supuesto, superiores a las del modelo convencional con viga centradora. Las tracciones obtenidas con el modelo de elementos finitos presentan valores constantes (del orden de 40 - 50 kN) que no dependen de ninguna de las variables analizadas y cuya magnitud viene a ser el doble de las obtenidas en el cálculo matricial del pórtico (del orden de 25 kN).

Resulta difícil dar una regla general cualitativa acerca de cuándo un esfuerzo axial es despreciable frente al cálculo a flexión. Habitualmente los axiales en las vigas de los pórticos (del orden de 25 kN) se desprecian, calculando las vigas a flexión simple. En este caso, si bien el resultado no es tan alarmante como indica el método convencional con tirante, parece recomendable no despreciar el esfuerzo axial y considerar la tracción generada por el efecto tirante, evaluándola y calculando la viga a flexotracción.

5.1.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE CONTACTO

La Fig.78, obtenida a partir de los resultados de los modelos de elementos finitos generados en la Etapa I, muestra claramente la no uniformidad de la distribución de tensiones bajo la zapata de medianería, con una tendencia al incremento de tensiones hacia el pilar de medianería.

Fig.78. Distribución de tensiones de contacto en modelos de elementos finitos

Fig.79. Diagrama de distribución de tensiones lineal equivalente

Asimismo, los resultados de las Tablas 20, 21 y 22, muestran que los casos planteados en la Etapa I presentan posiciones relativas de la resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería comprendidas entre el 59% y el 63% de la dimensión de la zapata paralela al plano del pórtico (Fig.79), de tal forma que, en caso de asimilar el diagrama de distribución de tensiones a un esquema lineal equivalente, habría que utilizar un modelo trapecial con tensión máxima bajo el pilar de medianería.

La punta de tensión máxima que se produce en los diagramas trapeciales, supone un incremento de tensión respecto de los diagramas iniciales uniformemente repartidos de los modelos convencionales. Dicho incremento de tensión coloca, a priori, a los diagramas trapeciales en una posición cualitativamente desfavorable respecto de los diagramas uniformemente distribuidos ya que, a igualdad de resultante transmitida, generan tensiones máximas superiores, susceptibles de no cumplir la comprobación de tensiones de contacto o verificación del E.L.U. de hundimiento, incluso admitiendo un incremento de la tensión en punta del 25% respecto de la tensión admisible.

Fig.80. Verificación de tensiones de contacto con modelos de elementos finitos. Etapa I

Ahora bien, en contra del temor cualitativo inicial, los resultados de las Tablas 20, 21 y 22 muestran que, si bien hay casos que presentan un nivel de agotamiento de la comprobación de tensiones de contacto ligeramente superior a 1 (incumplimiento de la comprobación) hay otros que, a pesar de la punta de tensión máxima siguen cumpliendo la verificación del E.L.U. de hundimiento (nivel de agotamiento inferior a 1), como puede verse en los gráficos de la Fig.80 que representan la relación entre la tensión máxima bajo la zapata de medianería y el límite marcado por un incremento del 25% sobre la tensión admisible, para el nivel de rigidez del pórtico $h = 600$. Puede comprobarse en los gráficos de la Fig.80 que el grado de cumplimiento de la comprobación de tensiones de contacto mejora cuanto mayor sea la

tensión admisible del terreno y cuanto más rectangular sea la zapata de medianería, llegando a cumplir en algunos casos a pesar incluso del pico de tensiones que le introduce el esquema trapecial de distribución de tensiones.

Fig.81. Contraste de resultantes de tensiones de contacto en zapata de medianería y viga centradora

La explicación de este hecho puede encontrarse en el análisis del valor de las resultantes de tensiones de contacto tanto bajo la zapata de medianería como bajo la viga centradora (Fig.81). En efecto, si se comparan las resultantes bajo la zapata de medianería entre ambos modelos (Fig.81.a) se comprueba que la resultante con el modelo de elementos finitos siempre es menor que con el modelo convencional, siendo similar para tensiones admisibles bajas y progresivamente menor a medida que aumenta la tensión admisible del terreno. Este descenso en el valor de la resultante bajo la zapata de medianería con el modelo de elementos finitos se debe al protagonismo de la viga centradora puesto de manifiesto en la Fig.81.b. El modelo convencional desprecia por completo la colaboración de la viga centradora como elemento de cimentación para transmitir carga al terreno, sin embargo el modelo de elementos finitos muestra que la resultante de tensiones de contacto correspondiente a la viga centradora aumenta a medida que se incrementa el valor de la tensión admisible del terreno.

Es más, el gráfico de la Fig.82, que analiza la relación entre la resultante de tensiones bajo la viga centradora y la resultante de tensiones bajo la zapata de medianería, muestra claramente que el protagonismo de la viga centradora como elemento de cimentación aumenta con la tensión admisible del terreno, llegando a adquirir su resultante un valor próximo

al 50% de la resultante de la zapata. Difícilmente puede ser despreciable una variable que alcanza el 50% del valor de otra que sí se tiene en cuenta.

Fig.82. Relación resultante viga centradora - resultante zapata

Estos datos conducen a la conclusión de que es erróneo el planteamiento de despreciar la resultante de las tensiones de contacto que realmente se producen bajo la viga centradora. Dicha viga centradora, además de estabilizar e intentar centrar el comportamiento de la zapata de medianería, lleva a cabo la misión de viga de cimentación o viga flotante, que colabora junto con las zapatas de medianería e interior, en la tarea de transmitir la carga al terreno.

Figura 83. Viga centradora como viga de cimentación

El mecanismo por el cual aumenta el protagonismo de la viga centradora al incrementarse la tensión admisible parece claro (Fig.83). Cuanto mayor es la tensión admisible, más pequeñas resultan las zapatas y mayor es, en proporción, el tamaño de la viga centradora. Cuanto mayor superficie relativa de contacto presenta la viga centradora respecto de la zapata de medianería mayor es el porcentaje de reacción que asume la viga.

5.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA II

5.2.1. ESFUERZOS EN LA VIGA CENTRADORA

Los resultados de los modelos de elementos finitos elaborados en la Etapa II (apartado 4.2, Tablas 45 a 56) vuelven a poner de manifiesto la considerable diferencia en el momento flector que solicita la viga centradora, según se realice el cálculo con modelos convencionales o con modelos de elementos finitos (Fig.84 y 85)

Fig.84. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la relación de forma y de la tensión admisible del terreno

Fig.85. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora en función de la luz y el número de plantas del pórtico

Al igual que en los resultados de la Etapa I, se comprueba que la diferencia en el valor de los momentos aumenta cuanto menor es la tensión admisible del terreno y más cuadrada se hace la zapata de medianería y, respecto de las nuevas variables introducidas en la Etapa II, dicha diferencia en el valor de los momentos aumenta con la luz del pórtico y con el número de plantas del mismo.

Ahora bien, lo que resulta especialmente llamativo es el incremento en la reducción del momento experimentado en la Etapa II frente a los resultados de la Etapa I. Ciertamente en la Etapa I se llegaban a encontrar casos de modelos de elementos finitos cuyo momento flector en la viga centradora era del orden del 50% del momento del correspondiente modelo convencional. Pero es que en la Etapa II esa cifra, ya de por sí llamativa, desciende por término medio al 40% y llega a bajar al 30% en casos extremos de reducida tensión admisible $\sigma_{adm.} = 100 \text{ kN/m}^2$, relación de forma 1,5 : 1, elevada luz $L = 7 \text{ m}$ y alto número de plantas (Baja +3).

Fig.86. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería. Etapa II

El mecanismo que conduce a esta mayor reducción en el momento de la viga centradora se encuentra en la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería. Frente a los resultados de la Etapa I, que ofrecían posiciones relativas de la resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería entre el 59% y el 63% del tamaño de la zapata (distribución trapezoidal), los resultados de la Etapa II (Fig.86) presentan excentricidades o posiciones relativas de la resultante de la zapata de medianería entre el 64% y el 71% del tamaño de la zapata de medianería, colocándose de este modo dicha zapata en torno al límite de la distribución triangular de tensiones.

El aumento experimentado en la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería, aproxima dicha resultante al pilar medianero y la aleja del centro de la viga centradora, reduciendo así el momento flector que genera (Fig.87).

Fig.87. Aumento de la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería.

La causa primera del citado aumento en la excentricidad de la resultante está en el planteamiento fundamental que caracteriza a la Etapa II, la consideración del hormigón como un material con comportamiento parabólico rectangular y con una muy reducida resistencia a tracción que trae consigo la fisuración y fractura del hormigón en la zona traccionada de la viga centradora. Dicho proceso de fisuración debilita la viga centradora, perdiendo inercia y, por ello, rigidez. Al ser la viga centradora menos rígida, experimenta una mayor deformación al entrar en carga, permitiendo un mayor giro de la zapata de medianería, que desplaza la resultante hacia el pilar medianero.

El impulso inmediato ante la drástica reducción del momento en la viga centradora sería la correspondiente reducción en el armado de la misma, acorde con el momento que realmente la solicita. Ahora bien, esa reducción plantea dos cuestiones, por un lado, la reducción de armadura empeoraría el problema de la fisuración en la viga, que se vería más debilitada, aún menos rígida y permitiría un mayor giro de la zapata, generando de nuevo un menor momento flector que sugiere un probable bucle indefinido que conduciría prácticamente a la eliminación de la viga centradora y, por otro lado, llegado a ese punto, podría cuestionarse cuál sería el comportamiento real de la cimentación sin viga centradora, dependiendo solamente de la colaboración de la viga superior como en el segundo modelo convencional.

Estas dos cuestiones, junto con otras que surgen a continuación, plantean la necesidad de una nueva etapa experimental, la Etapa III, para darles respuesta.

5.2.2. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE CONTACTO

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, a raíz de la Fig.86, los resultados de los modelos de elementos finitos de la Etapa II presentan excentricidades o posiciones relativas de la resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería entre el 64% y el 71% del tamaño de la zapata de medianería, lo que coloca a dicha zapata en torno al límite de la distribución triangular de tensiones estricta.

Fig.88. Distribución de tensiones triangular estricta

Una distribución triangular de tensiones, aunque sea límite y no llegue a producir despegues en la zapata, es una distribución más desfavorable que la distribución trapezoidal, por presentar una mayor punta de tensiones en el borde medianero y un peor comportamiento geotécnico.

Fig.89. Relación resultante viga centradora - resultante zapata medianería. Etapa II

A ello se le une, en esta ocasión, otro efecto adicional igualmente desfavorable. Debido a la pérdida de rigidez de la viga centradora por la fisuración de la misma y al aumento de la deformación de la viga que ello genera, el contacto de la viga centradora con el terreno no es

tan intenso, reduciéndose la colaboración portante de la viga centradora como viga de cimentación. En la Fig.89 se muestra la variación de la relación entre la resultante bajo la viga centradora y la resultante de la zapata de medianería, alcanzando tan solo un valor en torno al 35% como máximo en la Etapa II, cuando en la Etapa I algunos casos alcanzaban hasta el 50%.

Fig.90. Verificación de tensiones de contacto. Etapa II

El incremento de tensión en punta del diagrama triangular, unido a la menor colaboración portante de la viga centradora, genera una situación muy problemática para la zapata de medianería en todos los modelos de elementos finitos de la Etapa II, ya que ninguno de ellos cumple la comprobación de tensiones de contacto, llegándose en ocasiones a superar en más de un 50% el valor límite establecido en $1,25 \cdot \sigma_{adm.}$ (Fig.90).

Se llega así a un escenario contradictorio, con una viga centradora ineficaz (aparentemente sobredimensionada en su armado) incapaz de evitar el giro de una zapata de medianería que, por ello, resulta finalmente infradimensionada.

Estando la insuficiente rigidez de la viga centradora en el origen del problema, surgen dos posibles vías de solución. Por un lado, el incremento de la armadura de la propia viga centradora buscando minimizar el problema de la fisuración, que la debilita quitándole rigidez y, por otro, el aumento del canto de la viga centradora para incrementar su inercia y con ello su rigidez.

Estas dos nuevas cuestiones, junto con las dos anteriores, refuerzan la necesidad de una nueva etapa experimental, la Etapa III, para darles respuesta.

5.2.3. ESFUERZOS EN LA VIGA SUPERIOR

Los resultados de los modelos de elementos finitos elaborados en la Etapa II (apartado 4.2, Tablas 45 a 56) vuelven a poner de manifiesto el trabajo a flexotracción de la viga de la primera planta (Fig.91 y 92).

Fig.91. Contraste del esfuerzo axil en la viga superior en función de la relación de forma y de la tensión admisible del terreno

Fig.92. Contraste del axil en la viga superior en función de la luz y el número de plantas del pórtico

Al igual que en los resultados de la Etapa I, se comprueba (Fig.91) que las tracciones obtenidas presentan valores sensiblemente constantes respecto de la tensión admisible del terreno y la relación de forma del terreno no dependiendo, por ello, de ninguna de estas dos variables. En cambio, el contraste de resultados en función de las nuevas variables introducidas en la Etapa II, luz y número de plantas del pórtico (Fig.92), si muestra una influencia clara de estas variables, observándose un incremento del axil de tracción en la viga de la primera planta a medida que aumentan, tanto la luz como el número de plantas del pórtico, pero especialmente con el aumento de luz.

Frente a los valores de axil de tracción obtenidos en los modelos de elementos finitos de la Etapa I, que permanecían sensiblemente constantes en torno a 40 - 50 kN, los resultados de la Etapa II muestran valores bastante superiores que llegan a alcanzar los 125 kN. Dichos resultados, ciertamente están lejos de las cotas de axil de tracción que ofrece el método convencional de viga centradora con colaboración exclusiva de la viga superior, pero suelen superar en muchos casos el 50% del axil proporcionado por el método convencional puro, lo cual ya es una cifra significativa.

Nuevamente el efecto de la fisuración del hormigón en los modelos de elementos finitos de la Etapa II se encuentra detrás el incremento de axil de tracción en la viga de la primera planta de los modelos de la Etapa II, frente a los modelos de la Etapa I. Dicho proceso de fisuración debilita la viga centradora, que pierde inercia y, por ello, rigidez. Al ser la viga centradora menos rígida, experimenta una mayor deformación al entrar en carga, permitiendo un mayor giro de la zapata de medianería, la cual, ante la pérdida de ayuda por parte de la viga centradora, necesita buscar apoyo en otros elementos recurriendo así a la colaboración de la viga de la primera planta como tirante a tracción.

5.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA III

5.3.1. AUMENTO DE ARMADURA DE LA VIGA CENTRADORA

El análisis de los resultados de la Etapa II (apartado 5.2) pone de manifiesto una situación muy problemática en el comportamiento geotécnico de la zapata de medianería, con una importante excentricidad de la resultante de tensiones de contacto, que conduce a un diagrama de tensiones en el límite de las distribuciones triangulares, con inadmisibles tensiones en el borde medianero, incrementadas por la poca colaboración portante de la viga centradora como viga de cimentación.

Según el análisis realizado, en el origen del problema se encuentra la pérdida de inercia y rigidez de la viga centradora debido a la fisuración y fractura del hormigón en la zona traccionada de la viga. El debilitamiento de la viga centradora por el proceso de fisuración produce una mayor deformación por flexión de la viga que permite giros excesivos de la zapata de medianería con las correspondientes consecuencias negativas sobre su comportamiento geotécnico.

Una de las posibles vías a plantear para solucionar el problema es reforzar la armadura de tracción de la viga centradora, intentando minimizar con ello el proceso de fisuración de la viga que desencadena su pérdida de rigidez.

En el apartado 3.1.3.3. se argumenta el criterio que fija el máximo nivel de refuerzo de armado que resultaría razonable, estableciéndose dicho nivel en un aumento de armadura tal que no llegue a generar una profundidad de la fibra neutra superior a $0,45 \cdot d$. Por su parte, en el apartado 4.3.3, Tabla 62, se ofrece la relación detallada de los refuerzos de armadura propuestos para los distintos casos estudiados, disponiéndose en todos los casos armaduras de tracción del orden de dos veces y media las armaduras de referencia de la Etapa II, lo cual supone un muy importante aumento de armadura.

Los resultados obtenidos en la Etapa III en los casos de incremento de armadura (apartado 4.3.3, Tablas 63 y 64) ciertamente muestran la efectividad conceptual de la medida, ya que todos los casos experimentan una reducción en la excentricidad de la resultante, un cierto aumento en la colaboración portante de la viga centradora y, por todo ello, una reducción en la tensión máxima en el borde de la zapata. Ahora bien, la eficacia real obtenida es mínima, dado que las excentricidades de la resultantes de la zapata de medianería se reducen solamente en tres puntos porcentuales (Fig.93), generando diagramas que se siguen

situando al límite de las distribuciones triangulares y que las tensiones máximas en el borde de la zapata de medianería siguen siendo en todos los casos excesivas, a pesar de haberse reducido ligeramente (Fig.94).

Fig.93. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería con aumento de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III

Fig.94. Verificación de tensiones de contacto con aumento de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III

Resulta decepcionante disponer una armadura de tracción más de dos veces y media la original para obtener tan solo una reducción de tres puntos porcentuales en el control de la excentricidad.

5.3.2. REDUCCIÓN DE ARMADURA DE LA VIGA CENTRADORA

El análisis de los resultados, tanto de la Etapa I (apartado 5.1) como de la Etapa II (apartado 5.2), pone de manifiesto la considerable disminución del valor del momento flector de la viga centradora de los modelos de elementos finitos respecto de los modelos convencionales.

Este hecho, junto con las consecuencias negativas que sobre el comportamiento geotécnico de la zapata de medianería tiene el proceso de fisuración de la viga centradora, conduce a dos ideas posiblemente contradictorias. Por un lado, la importante disminución del momento flector invita a una importante reducción del armado, acorde a los esfuerzos que realmente solicitan la viga centradora. Pero, por otro lado, surge el temor a que una reducción de la armadura acentúe el proceso de fisuración de la zona traccionada de la viga, incrementando la pérdida de rigidez de la misma, que a su vez conduciría a mayores giros de la cimentación que generarían todavía menores momentos en la viga centradora, demandando así aún una menor armadura, entrando en un posible bucle sin fin que terminaría con la práctica anulación de la viga centradora.

Resulta por ello obligado experimentar con la reducción de la armadura acorde con los momentos flectores que solicitan la viga centradora de acuerdo con los resultados de la Etapa II. En el apartado 4.3.1, Tabla 57, se ofrece la relación detallada de las armaduras empleadas en todos los casos con reducción de armadura, disponiéndose sección de armadura que llegan a ser inferiores al 40% de las armaduras de referencia de la Etapa II, lo cual supone una muy importante reducción de armadura.

Los resultados obtenidos en la Etapa III en los casos de reducción de armadura (apartado 4.3.1, Tablas 58 y 59) ciertamente confirman la influencia conceptual de la reducción de armadura sobre una mayor pérdida de rigidez de la viga centradora, que conduce a un mayor giro de la cimentación puesto de manifiesto en el incremento de la excentricidad de la resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería.

Ahora bien, de forma similar a como ocurría con los casos de incremento de armadura, las diferencias no son significativas, ya que se ha procedido a una drástica reducción de armado, llegando a casos con armadura inferior al 40% de la armadura original y, sin embargo, el incremento en la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería es de tan solo dos puntos porcentuales (Fig 95).

Fig.95. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería con reducción de armadura. Contraste Etapa II - Etapa III

Por ello, puede afirmarse que ajustar la armadura a las solicitaciones reales de momento flector de la viga centradora no empeora significativamente el problema, ni conduce a bucles indefinidos que supongan la práctica anulación de la viga centradora.

Puede también afirmarse con lo analizado hasta este punto, que la viga centradora está demostrando poca eficacia en su función estabilizadora (centradora) de la zapata de medianería, pareciendo tener la armadura poca influencia sobre dicha eficacia, ya sea por exceso o por defecto de la misma.

5.3.3. ELIMINACIÓN DE LA VIGA CENTRADORA

La experimentación de modelos de elementos finitos sin viga centradora tiene un doble objetivo, Por un lado, comprobar la eficacia real de la viga centradora, puesta en duda como consecuencia de los resultados obtenidos en etapas anteriores y, por otro, contrastar el modelo convencional de colaboración de viga superior sin viga centradora.

Los resultados obtenidos en la Etapa III para los casos sin viga centradora (apartado 4.3.2, Tablas 60 y 61) muestran un comportamiento geotécnico extremo para la zapata de medianería, con excentricidades del orden del 80%, doce puntos porcentuales por encima de los resultados de la Etapa II, que conducen a la zapata de medianería hacia diagramas de distribución de tensiones netamente triangulares, altamente desfavorables y nada deseables (Fig.96).

Fig.96. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería sin viga centradora. Contraste Etapa II - Etapa III

Se trata, por tanto de un empeoramiento claramente significativo, muy diferente de los dos puntos porcentuales que suponía la reducción de armadura, que pone de manifiesto la

eficacia de la viga centradora, no tanto por su armado, como por la viga en sí misma, mediante su propia geometría, definida por su escuadría y, especialmente por su canto.

Asimismo, los resultados mostrados en la Fig.96 indican lo alejado que se encuentra de la realidad el modelo convencional de colaboración de viga superior, que considera una distribución de tensiones uniformemente repartida en la zapata de medianería, totalmente opuesta a la realmente obtenida.

Finalmente, los modelos de elementos finitos sin viga centradora, permiten contrastar el trabajo a flexotracción de la viga de la primera planta en su doble función de viga y tirante. El contraste entre los valores de esfuerzo axial de tracción en la viga de la primera planta obtenidos tanto con los modelos de elementos finitos como con los modelos convencionales (Fig.97) muestra el incremento experimentado por el axil de tracción en la viga superior en os modelos de elementos finitos el eliminar la viga centradora, aun así siguen siendo menores los esfuerzos de tracción en los modelos de elementos finitos, debido a que al estar desplazada la resultante hacia el pilar medianero, el momento desestabilizante de la zapata de medianería es más pequeño y por ello se requiere una menor fuerza de tracción en la viga superior para equilibrarlo.

Fig.97. Contraste del axil en la viga superior en función de la luz y el número de plantas del pórtico

5.3.4. AUMENTO DEL CANTO DE LA VIGA CENTRADORA

La segunda posible vía para aumentar la rigidez de la viga centradora es el aumento del canto de la viga centradora para lograr el correspondiente aumento en la inercia de la sección. Los casos desarrollados en la Etapa II están realizados con el mínimo canto compatible con la condición de anclaje de la armadura de los pilares. En la Etapa III, se ensayan tres niveles adicionales de rigidez que se obtienen incrementando dicho canto mínimo en un 25%, 50% y 75% respectivamente.

Los resultados obtenidos en la Etapa III en los casos de incremento de canto de la viga centradora (apartado 4.3.4, Tablas 65 a 70) muestran la clara eficacia de la medida de cara a conseguir una viga centradora suficientemente rígida, con reducida deformación y, por ello, con capacidad para controlar el giro de la zapata de medianería que, junto con el aumento de su capacidad portante como viga de cimentación conducen a un comportamiento geotécnico más apropiado de la zapata de medianería. Lógicamente el resultado es especialmente nítido en la propuesta de un 75% de aumento de canto que, frente a las llamativas propuestas realizadas con la variable aumento de armadura que conducían a armaduras dos veces y media la original, generan casos de no más de 1,250 m de canto que, siendo ligeramente elevado, resulta razonable y no especialmente llamativo.

Fig.98. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de medianería. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$

La Fig.98 muestra las excentricidades o posiciones relativas de la resultante de tensiones de contacto bajo la zapata de medianería que manifiestan haberse logrado un suficiente nivel de rigidez en la viga centradora pues se obtienen importantes reducciones, del orden de diez o doce puntos porcentuales respecto de los resultados de la Etapa II. Si bien alcanzar el centrado absoluto (50% de posición relativa) resulta imposible pues requeriría un nivel de rigidez infinito, las excentricidades relativas obtenidas son muy satisfactorias, con valores en torno al 56% - 60% que generan diagramas netamente trapeciales.

Fig.99. Verificación de tensiones de contacto. $H = 1,75 \cdot H_{\min}$

La reducción en la excentricidad, unida a la recuperación del papel colaborador de la viga centradora como elemento transmisor de carga al terreno conducen a un razonable comportamiento geotécnico de las zapatas de medianería (Fig.99) donde, si bien hay casos que superan ligeramente el límite de tensión establecido en la comprobación de tensiones de contacto, hay otros que llegan a cumplir la verificación del E.L.U. de hundimiento a pesar de la punta de tensiones de los diagramas trapeciales.

Finalmente resulta muy llamativo el gráfico de la Fig.100 que muestra la comparación entre los momentos flectores obtenidos en la viga centradora con las distintas variables contempladas en el estudio. En dicha figura puede observarse que, cuando el nivel de rigidez de la viga centradora es suficiente, los momentos flectores vuelven a crecer considerablemente, pareciéndose mucho a los proporcionados por el método convencional, siendo del orden del 80% de éstos.

Fig.100. Contraste del valor del momento flector en la viga centradora

Podría concluirse que, al final, el método convencional parece no estar tan desencaminado, si bien el centrado absoluto de la zapata de medianería es imposible porque requeriría una rigidez infinita en la viga centradora. El auténtico problema en este tipo de cimentaciones es el giro de la zapata de medianería. Para evitarlo, la única solución claramente eficaz es disponer una viga centradora de suficiente rigidez, lo cual se logra únicamente con el aumento del canto de la misma. En dichas condiciones los momentos flectores en la viga centradora son también altos, si bien no hay ningún problema en ajustar la armadura al momento que realmente se produzca, ya que se ha comprobado que ligeras reducciones de armadura no se traducen en importantes incrementos de la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería.

5.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ETAPA IV

Concluido el estudio relativo a las zapatas de medianería, la Etapa IV constituye la aplicación del proceso a las zapatas de esquina con dos vigas centradoras, entendidas como caso particular de las anteriores. Dada la experiencia previa tras el trabajo realizado con las zapatas de medianería, solamente se ensaya la variable que ha demostrado tener influencia real sobre el problema, como es la variación en el canto de las vigas centradoras, aplicado todo ello a un conjunto de casos definido por las permutaciones de luces y número de plantas contempladas hasta ahora. Para el canto de la cimentación se estudian dos casos, el primero correspondiente al canto mínimo compatible con el anclaje de la armadura de los pilares y, el segundo, aplicando un incremento de un 75% sobre el canto mínimo.

Fig.101. Excentricidades relativas de la resultante de la zapata de esquina

Los resultados obtenidos en la Etapa IV para la zapata de esquina (apartado 4.4, Tablas 71 a 77) muestran similitudes y diferencias con los resultados obtenidos para los casos equivalentes de zapata de medianería. Ciertamente, al igual que ocurría con las zapatas de medianería, las excentricidades generadas en la resultante de tensiones de contacto de la zapata de esquina dejan a ésta con diagramas de tensiones equivalentes al triangular en 3D para los casos de canto mínimo y diagramas equivalentes al trapecial para los casos de canto $1,75 H_{\min}$ (Fig.101).

Ahora bien, la magnitud de las excentricidades obtenidas para los casos de zapata de esquina es superior a la de las obtenidas para los casos de zapata de medianería, lo cual señala a las zapatas de esquina como un caso más desfavorable que las zapatas de

medianería. La explicación de este hecho puede encontrarse en la forma cuadrada de la zapata de esquina. Debido a la confluencia de dos medianerías, no es recomendable utilizar en este caso zapatas rectangulares, ya que una de las vigas centradoras se vería muy beneficiada por el lado corto del rectángulo, pero la otra se vería condenada por la mayor dimensión de la zapata que dejaría muy excéntrico el pilar respecto del centro de gravedad de la misma en esa dirección. La solución de zapata cuadrada pretende equilibrar ambas direcciones pero, como ya se comprobó en los casos de zapata de medianería, es una relación de forma desfavorable, que conduce a que la resultante de las tensiones de contacto se desplace más hacia el centro de las vigas centradoras, generando mayor flexión y deformación de las mismas.

Fig.102. Verificación de tensiones de contacto en la zapata de esquina

Por su parte, se constata igualmente la situación problemática de la comprobación de tensiones de contacto en la zapata de esquina para los casos de canto mínimo (Fig.102), si bien el problema aparece en las zapatas de esquina de un modo más agudo que en las zapatas de medianería. La causa del agravamiento de la situación en las zapatas de esquina está, por un lado, en el aumento de las excentricidades comentado en el párrafo anterior y, por otro, en el hecho de tratarse de una situación de, podría decirse, flexión desviada, con una doble excentricidad simultánea que acentúa la cuestión de las tensiones de contacto.

Se comprueba, asimismo, el efecto claramente favorable del incremento de canto en las vigas centradoras, situándose en torno a la zona de cumplimiento los casos de canto $1,75 H_{\min}$ (Fig.102). Ahora bien, cabe indicar que las excentricidades obtenidas con este canto en los casos de zapata de esquina son, en general, ligeramente superiores a las obtenidas en los correspondientes casos de zapata de medianería, lo cual parece indicar la necesidad de un

ligero incremento de canto adicional en las zapatas de esquina para alcanzar el mismo nivel de control de la excentricidad.

Señalar, por último, que también se comprueba en los casos de zapata de esquina una considerable reducción de momento flector de las vigas centradoras en los casos de canto mínimo y, por ello, reducida rigidez de las mismas obteniéndose, en cambio, momentos más próximos a los que genera el método convencional cuando se dota a las vigas centradoras de la suficiente rigidez (canto $1,75 H_{\min}$) (Fig.103).

Fig.103. Contraste del valor del momento flector en las vigas centradoras

No obstante, es preciso matizar que los momentos de los casos $1,75 H_{\min}$ obtenidos en las zapatas de esquina son, en proporción, algo inferiores a los obtenidos con zapata de medianería, lo cual pone de manifiesto la mayor flexión de las vigas centradoras en este caso y la necesidad de un ligero incremento del canto respecto de los casos de zapata de medianería.

5.5. PROPUESTA DE MEJORA DEL MÉTODO CONVENCIONAL

5.5.1. ZAPATA DE MEDIANERÍA CON VIGA CENTRADORA

El método convencional para el cálculo de zapatas de medianería con viga centradora presenta la clara intención de buscar un esquema isostático fácilmente resoluble por medios manuales. Por ello, está planteado de tal modo que solo aparezcan dos incógnitas R_m y R_i , cuya solución requiere solamente del empleo de dos ecuaciones, que se obtienen del equilibrio estático de momentos y de fuerzas verticales en el sólido representado en la Fig.104.a.

Fig.104. Comparación método convencional - resultados M.E.F.

Los resultados de los modelos de elementos finitos ponen de manifiesto, por un lado, la existencia de resultante por tensiones de contacto bajo la viga centradora y, por otro, la clara excentricidad de la resultante de la zapata de medianería. Por lo que respecta a las resultantes, tanto de la zapata interior como de la viga centradora, si bien es cierto que no

están absolutamente centradas, las excentricidades que presentan suelen ser pequeñas especialmente cuando se expresan en términos relativos al tamaño total del correspondiente elemento (Fig.104.b), por lo cual no resulta especialmente problemático considerarlas en la práctica como reacciones centradas. Ello conduce a un total de cuatro incógnitas, tres resultantes más la excentricidad que permite localizar la posición de la resultante de la zapata de medianería (Fig.104.c).

Teniendo en cuenta que solo se dispone de dos ecuaciones de equilibrio estático, se necesitan dos nuevas ecuaciones para poder resolver el problema. En concreto, si se dispusiese de un algoritmo de cálculo que permitiese obtener la resultante bajo la viga centradora y otro para la excentricidad de la zapata de medianería, se tendrían las dos ecuaciones adicionales que permiten abordar el problema.

A ser posible, sería interesante que cada uno de los algoritmos indicados fuese particular y exclusivo de la correspondiente incógnita, de modo que se pudiesen ir resolviendo de forma secuencial sin necesidad de recurrir a la resolución de un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, todo ello con el fin de proponer una alternativa metodológica más ajustada a la realidad, pero igualmente sencilla en su aplicación.

Dado que, gracias a los modelos de elementos finitos, se dispone de un conjunto amplio de valores correspondientes a las indicadas incógnitas, los algoritmos en cuestión pueden obtenerse mediante ajustes de regresión a partir de los resultados de los modelos de elementos finitos.

Se ofrece a continuación en las Tablas 75 a 78 una recopilación de las posiciones de la resultante de la zapata de medianería y del valor de las resultantes de la zapata de medianería y la viga centradora, correspondientes a los casos estudiados tanto en la Etapa II como en la Etapa III, exceptuando los casos de variación de armadura. La posición de la resultante se define respecto del extremo de la zapata y se expresa en tanto por ciento respecto del tamaño total de la misma. Se incluye también la relación luz - canto de cada caso y el porcentaje de área que representa la viga centradora respecto del área total del conjunto de cimentación definido por la zapata de medianería, la zapata interior y la viga centradora.

Posteriormente se procede a obtener los algoritmos indicados que permiten resolver las incógnitas sobrantes del esquema de la Fig.104.b, mediante ajustes de regresión a partir de los datos de las Tablas 75 a 78.

RESULTADOS M.E.F. BAJA+1					
	L/h	a _{Rm} (%)	R _v (kN)	R _m (kN)	A _v (%)
L3_1P 1,5:1 100	6,0	61,3	19,28	348,61	4,0
L5_1P 1,5:1 100	8,3	63,5	71,95	466,46	9,0
L7_1P 1,5:1 100	10,0	66,7	128,88	602,24	9,8
L3_1P 1,5:1 200	6,0	61,0	78,44	249,15	17,5
L5_1P 1,5:1 200	8,3	67,5	120,21	350,16	21,6
L7_1P 1,5:1 200	10,0	69,3	166,37	452,42	23,1
L3_1P 1,5:1 300	6,0	62,5	115,81	205,76	27,2
L5_1P 1,5:1 300	8,3	65,8	145,48	320,65	32,4
L7_1P 1,5:1 300	10,0	68,1	192,64	423,09	34,1
L3_1P 2:1 100	6,0	61,1	28,08	329,09	5,0
L5_1P 2:1 100	8,3	64,8	77,50	444,16	8,2
L7_1P 2:1 100	10,0	68,3	156,91	569,46	11,0
L3_1P 2:1 200	6,0	61,3	84,73	241,29	19,1
L5_1P 2:1 200	8,3	65,0	134,82	342,39	23,3
L7_1P 2:1 200	10,0	68,3	172,34	458,60	24,0
L3_1P 2:1 300	6,0	61,6	112,20	204,31	28,1
L5_1P 2:1 300	8,3	65,0	149,56	317,70	33,6
L7_1P 2:1 300	10,0	66,7	205,00	413,96	35,0
L3_1P 2:1 200 1,25 H	4,8	59,5	90,71	229,01	19,1
L5_1P 2:1 200 1,25 H	6,7	60,0	176,97	329,30	23,3
L7_1P 2:1 200 1,25 H	8,0	63,5	220,74	462,54	24,0
L3_1P 2:1 200 1,50 H	4,0	58,5	94,59	243,45	19,1
L5_1P 2:1 200 1,50 H	5,6	57,0	201,60	319,92	23,3
L7_1P 2:1 200 1,50 H	6,7	59,6	284,37	435,37	24,0
L3_1P 2:1 200 1,75 H	3,4	58,2	97,36	263,68	19,1
L5_1P 2:1 200 1,75 H	4,8	56,0	217,48	324,44	23,3
L7_1P 2:1 200 1,75 H	5,7	57,8	324,48	420,18	24,0

Tabla 75. Resultados M.E.F. Baja+1. Posición y Resultantes

RESULTADOS M.E.F. BAJA+2					
	L/h	a R _m (%)	R _v (kN)	R _m (kN)	A _v (%)
L3_2P 1,5:1 100					
L5_2P 1,5:1 100	8,3	65,7	68,89	742,81	5,0
L7_2P 1,5:1 100	10,0	67,7	129,93	961,70	7,2
L3_2P 1,5:1 200	6,0	63,6	72,26	424,43	10,1
L5_2P 1,5:1 200	8,3	69,3	138,28	543,45	16,1
L7_2P 1,5:1 200	10,0	69,6	205,92	748,81	18,8
L3_2P 1,5:1 300	6,0	64,0	113,54	363,29	19,2
L5_2P 1,5:1 300	8,3	69,1	156,12	505,33	22,6
L7_2P 1,5:1 300	10,0	67,0	268,44	665,87	30,2
L3_2P 2:1 100					
L5_2P 2:1 100	8,3	66,0	76,55	718,03	5,5
L7_2P 2:1 100	10,0	67,8	165,63	942,75	7,7
L3_2P 2:1 200	6,0	63,3	76,27	414,86	11,1
L5_2P 2:1 200	8,3	70,8	134,21	535,39	14,5
L7_2P 2:1 200	10,0	70,0	227,74	719,91	20,4
L3_2P 2:1 300	6,0	64,1	113,90	366,65	19,1
L5_2P 2:1 300	8,3	68,0	158,89	505,03	23,3
L7_2P 2:1 300	10,0	68,6	231,45	697,36	27,4
L3_2P 2:1 200 1,25 H	4,8	59,1	86,12	435,71	11,1
L5_2P 2:1 200 1,25 H	6,7	66,0	158,67	549,02	14,5
L7_2P 2:1 200 1,25 H	8,0	65,9	274,45	744,69	20,4
L3_2P 2:1 200 1,50 H	4,0	57,7	90,69	418,84	11,1
L5_2P 2:1 200 1,50 H	5,6	61,2	190,74	554,70	14,5
L7_2P 2:1 200 1,50 H	6,7	61,7	342,10	740,71	20,4
L3_2P 2:1 200 1,75 H	3,4	56,8	93,83	421,92	11,1
L5_2P 2:1 200 1,75 H	4,8	58,0	211,42	572,27	14,5
L7_2P 2:1 200 1,75 H	5,7	59,0	388,88	728,63	20,4

Tabla 76. Resultados M.E.F. Baja+2. Posición y Resultantes

RESULTADOS M.E.F. BAJA+3					
	L/h	a _{Rm} (%)	R _v (kN)	R _m (kN)	A _v (%)
L3_3P 1,5:1 100	10,0	66,9	130,84	1383,50	4,3
L5_3P 1,5:1 100					
L7_3P 1,5:1 100					
L3_3P 1,5:1 200	6,0	62,9	40,35	640,06	6,0
L5_3P 1,5:1 200	8,3	66,6	141,87	809,45	12,1
L7_3P 1,5:1 200	10,0	68,5	223,60	1044,68	16,0
L3_3P 1,5:1 300	6,0	65,1	101,55	529,58	14,3
L5_3P 1,5:1 300	8,3	67,0	182,48	707,49	19,9
L7_3P 1,5:1 300	10,0	67,7	301,49	924,94	26,1
L3_3P 2:1 100	10,0	67,0	168,32	1328,34	5,6
L5_3P 2:1 100					
L7_3P 2:1 100					
L3_3P 2:1 200	6,0	63,8	71,40	606,28	6,7
L5_3P 2:1 200	8,3	68,7	171,46	765,01	13,3
L7_3P 2:1 200	10,0	68,2	256,91	1035,85	16,6
L3_3P 2:1 300	6,0	64,0	109,48	527,88	14,1
L5_3P 2:1 300	8,3	66,5	177,05	732,99	21,1
L7_3P 2:1 300	10,0	67,8	267,57	984,01	23,9
L3_3P 2:1 200 1,25 H	4,8	61,5	65,27	613,96	6,7
L5_3P 2:1 200 1,25 H	6,7	64,7	184,28	775,83	13,3
L7_3P 2:1 200 1,25 H	8,0	66,5	298,16	1025,60	16,6
L3_3P 2:1 200 1,50 H	4,0	60,0	67,62	622,47	6,7
L5_3P 2:1 200 1,50 H	5,6	61,3	207,72	781,09	13,3
L7_3P 2:1 200 1,50 H	6,7	62,4	350,58	1043,26	16,6
L3_3P 2:1 200 1,75 H	3,4	58,5	69,21	621,71	6,7
L5_3P 2:1 200 1,75 H	4,8	58,0	224,21	821,46	13,3
L7_3P 2:1 200 1,75 H	5,7	59,4	402,64	1079,16	16,6

Tabla 77. Resultados M.E.F. Baja+3. Posición y Resultantes

RESULTADOS M.E.F. BAJA+4					
	L/h	a _{Rm} (%)	R _v (kN)	R _m (kN)	A _v (%)
L3_4P 1,5:1 100					
L5_4P 1,5:1 100					
L7_4P 1,5:1 100					
L3_4P 1,5:1 200					
L5_4P 1,5:1 200	8,3	67,0	142,14	1072,70	9,9
L7_4P 1,5:1 200	10,0	68,7	247,02	1397,20	13,6
L3_4P 1,5:1 300	6,0	60,4	99,19	729,88	10,4
L5_4P 1,5:1 300	8,3	65,5	222,36	955,73	18,4
L7_4P 1,5:1 300	10,0	67,2	289,68	1250,60	20,7
L3_4P 2:1 100					
L5_4P 2:1 100					
L7_4P 2:1 100					
L3_4P 2:1 200					
L5_4P 2:1 200	8,3	68,8	167,30	1009,48	11,5
L7_4P 2:1 200	10,0	70,0	272,68	1329,35	13,1
L3_4P 2:1 300	6,0	60,4	71,16	708,03	11,3
L5_4P 2:1 300	8,3	68,5	208,30	931,69	17,1
L7_4P 2:1 300	10,0	68,7	310,77	1237,38	21,8
L3_4P 2:1 200 1,25 H					
L5_4P 2:1 200 1,25 H	6,7	64,7	174,51	1046,36	11,5
L7_4P 2:1 200 1,25 H	8,0	64,4	324,66	1425,86	13,1
L3_4P 2:1 200 1,50 H					
L5_4P 2:1 200 1,50 H	5,6	61,8	194,36	1037,48	11,5
L7_4P 2:1 200 1,50 H	6,7	63,3	370,95	1376,10	13,1
L3_4P 2:1 200 1,75 H					
L5_4P 2:1 200 1,75 H	4,8	58,8	212,19	1082,76	11,5
L7_4P 2:1 200 1,75 H	5,7	61,3	428,25	1389,21	13,1

Tabla 78. Resultados M.E.F. Baja+4. Posición y Resultantes

POSICIÓN DE LA RESULTANTE DE LA ZAPATA DE MEDIANERÍA

Si se analiza la posición relativa de la resultante de la zapata de medianería a R_m (Fig.105) puede apreciarse que, para una determinada luz y un determinado canto de la viga centradora, dicha posición relativa arroja líneas sensiblemente constantes, que alcanzan una determinada cota de excentricidad en función, exclusivamente, de la rigidez de la viga centradora.

Fig.105. Posición de la resultante de la zapata de medianería en función de la rigidez

Por ello, y considerando como un buen indicador de la rigidez la relación luz - canto (L/h), se opta por ajustar la posición relativa de la resultante de la zapata de medianería mediante una expresión del tipo mostrado en la ec.64, en la que se propone una relación directamente proporcional entre ambos parámetros, ya que al aumentar la rigidez de la cimentación disminuye tanto la excentricidad de la resultante (valorada por a_{Rm}) como la relación L/h .

$$a_{Rm} = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{L}{h} \right)^{k_3} \quad (\text{ec.64})$$

Siendo:

a_{Rm} : Posición de la resultante de la zapata de medianería respecto de un extremo de la misma en (%)

L : Luz del pórtico en (m)

h : Canto de la viga centradora en (m)

Planteado el tipo de expresión a emplear se determinan los distintos coeficientes de la misma ajustándolos por el método de los mínimos cuadrados, obteniéndose el resultado mostrado en la Fig.106.

Fig.106. Gráfico de ajuste por mínimos cuadrados

En la Fig.106 se muestra el gráfico con el ajuste realizado, obteniéndose finalmente la expresión dada por la ec.65. A pesar de haber partido de un planteamiento inicial de carácter potencial, se ha obtenido finalmente un mejor ajuste dándole al coeficiente k_3 valor 1, lo cual convierte la expresión en un ajuste lineal.

$$a_{Rm} = 51,339 + 1,741 \cdot \left(\frac{L}{h} \right) \quad (\text{ec.65})$$

que presenta un coeficiente de correlación $R^2 = 0,81$

RESULTANTE DE LA VIGA CENTRADORA

La viga centradora, junto con la zapata de medianería y la zapata interior, forman un elemento de cimentación conjunto. La magnitud final de la carga transmitida al terreno por cada una de las partes depende del papel protagonista que desempeñe cada una de ellas en función de su geometría, siendo el porcentaje de área de cada parte respecto del área total del conjunto del elemento de cimentación un buen indicador para valorar dicho protagonismo.

La Fig.107 muestra la relación que existe, en los modelos de elementos finitos, entre la resultante de la zapata de medianería y la resultante de la viga centradora. En dichos gráficos se observa cómo al aumentar la luz del pórtico se incrementa la resultante de la viga centradora siguiendo el ritmo de crecimiento de la resultante de la zapata de medianería a un ritmo mayor que ésta última, llegando a superar el 30% del valor de la resultante de la zapata de medianería en casos de 7 m de luz. En cambio, al aumentar el número de plantas manteniendo la luz constante, se aprecia que la resultante de la viga centradora crece muy levemente, quedándose atrás del intenso ritmo de crecimiento de la resultante de la zapata de medianería.

Fig.107. Resultantes de tensiones de contacto en zapata de medianería y viga centradora

La explicación se encuentra en los gráficos de la Fig.108 que representan la evolución del porcentaje del área de la viga centradora respecto del conjunto de cimentación. Efectivamente, al variar la luz con número de plantas constante, el tamaño de las zapatas tiende a estancarse creciendo en proporción el protagonismo de la viga centradora que llega a alcanzar el 20% del total del área. De este modo, a medida que aumenta el porcentaje de área de la viga centradora, su resultante empieza a crecer en porcentaje respecto de la resultante de la zapata de medianería.

Fig.108. Evolución del porcentaje de área de la viga centradora

En cambio, al aumentar el número de plantas, el tamaño de las zapatas de los pilares crece, perdiendo la viga centradora protagonismo, al reducirse su porcentaje de área respecto del total, lo que conduce a que su resultante represente cada vez una proporción más pequeña respecto de la resultante de la zapata de medianería.

Otro factor que influye en la magnitud de la resultante de la viga centradora es la rigidez de la propia viga. Cuando las vigas centradoras tienen rigidez reducida, su deformación es elevada, tendiendo a perder contacto con el terreno. Por el contrario, con rigideces elevadas la deformación se limita y se intensifica el contacto con el terreno, aumentando así la resultante de la viga centradora. Puede observarse en el gráfico de la Fig.109 el incremento en la resultante de la viga centradora al aumentar la rigidez de la misma.

Fig.109. Resultante en la viga centradora en función de su rigidez

Así pues, son tres los factores a tener en cuenta a la hora de proponer una expresión para el valor de la resultante de la viga centradora. El primero, que la resultante de la viga centradora crece con la resultante de la zapata de medianería de forma directamente proporcional al

porcentaje de área que representa la viga centradora. El segundo, que la resultante de la viga centradora es directamente proporcional a la rigidez de la viga y, por ello, inversamente proporcional al coeficiente de relación luz canto (L/h). Y, por último, en tercer lugar está la estrategia de la propuesta, que pretende expresar el valor de la resultante de la viga centradora como un porcentaje del valor de la resultante de la zapata de medianería para, de este modo, poder realizar un cambio de variable que permita eliminar fácilmente la incógnita resultante viga centradora.

Todo ello conduce a proponer el siguiente tipo de expresión para relacionar el valor de la resultante de la viga centradora con el valor de la resultante de la zapata de medianería:

$$R_v = \frac{k_1 \cdot A_v^{k_2}}{k_3 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{k_2}} \cdot R_m \quad (\text{ec.66})$$

Siendo:

R_v : Resultante de tensiones de contacto de la viga centradora

R_m : Resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería

A_v : Proporción del área en planta de la viga centradora respecto del total del área en planta del conjunto zapata medianería – viga centradora - zapata interior en tanto por uno

L : Luz del pórtico en

h : Canto de la viga centradora en

Planteado el tipo de expresión a emplear se determinan los distintos coeficientes de la misma ajustándolos por el método de los mínimos cuadrados, obteniéndose como resultado la siguiente expresión:

$$R_v = \frac{1,979 \cdot A_v^{1,014}}{0,268 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,729}} \cdot R_m \quad (\text{ec.67})$$

Evidentemente, al tener cuatro variables implicadas en el ajuste, no es posible representar un gráfico con dicho ajuste. Ahora bien, puede realizarse una comprobación indirecta de la calidad del ajuste obtenido, correlacionando los valores de la resultante de la viga centradora proporcionados por los modelos de elementos finitos con los correspondientes valores obtenidos con la ec.67, obteniéndose una recta auxiliar de ajuste con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,80$

Fig.110. Correlación del ajuste de la resultante de la viga centradora

MÉTODO OPERATIVO

Fig.111. Método operativo

A modo de resumen, el modo de proceder en la práctica para resolver las cuatro incógnitas de la propuesta del modelo convencional modificado puede ser el siguiente. En primer lugar, empleando la expresión de la ec.65 se procede directamente al cálculo de la posición de la resultante de la zapata de medianería. En segundo lugar, empleando la ec.67, se plantea el cambio de variable que expresa el valor de la resultante de la viga centradora en función de la resultante de la zapata de medianería, el cual, una vez aplicado deja el esquema con solo dos incógnitas, R_m y R_i . A continuación se resuelven estas dos incógnitas planteando las ecuaciones de equilibrio estático de momentos y de fuerzas verticales y, finalmente, se obtiene el valor de R_v a partir de R_m utilizando de nuevo la ec.67.

5.5.2. ZAPATA DE ESQUINA CON DOS VIGAS CENTRADORAS

Una vez desarrollada la propuesta de modificación del método convencional para el caso de la zapata de medianería, la forma de proceder con el caso de zapata de esquina es la misma, con la diferencia de que en esta ocasión, al tratarse de un problema tridimensional, en lugar de una excentricidad de la zapata de medianería es preciso resolver dos excentricidades de la zapata de esquina $a_{R_{ex}}$ y $a_{R_{ey}}$ y, en lugar de una viga centradora, hay dos con sus respectivas resultantes R_{c1} y R_{c2} . La argumentación que conduce a las expresiones necesarias para obtener las incógnitas indicadas es exactamente la misma que la empleada con las zapatas de medianería empleándose, por tanto, el mismo formato de ecuación, variando únicamente el valor de los coeficientes de las ecuaciones.

RESULTADOS M.E.F. ZAP. ESQUINA							
	L/h	$a_{R_{ex}}$ (%)	$a_{R_{ey}}$ (%)	R_e (kN)	R_{c1} (kN)	R_{c2} (%)	A_v (%)
L3_1P 2:1 200 H	6,0	60,8	59,0	95,96	59,04	57,7	24,8
L5_1P 2:1 200 H	8,3	63,4	62,6	144,04	128,41	126,2	27,8
L7_1P 2:1 200 H	10,0	69,9	69,9	268,92	199,99	183,2	23,3
L3_2P 2:1 200 H	6,0	61,7	60,2	178,27	63,17	61,2	14,6
L5_2P 2:1 200 H	8,3	68,0	67,7	272,19	145,36	132,8	16,7
L7_2P 2:1 200 H	10,0	71,7	73,3	505,37	253,39	225,1	18,3
L3_3P 2:1 200 H	6,0	63,1	62,0	297,31	56,03	53,2	8,0
L5_3P 2:1 200 H	8,3	69,3	69,3	450,00	160,76	150,8	12,8
L7_3P 2:1 200 H	10,0	73,0	75,4	746,82	272,23	233,4	13,4
L5_4P 2:1 200 H	8,3	69,5	73,8	748,27	156,71	133,7	8,8
L7_4P 2:1 200 H	10,0	73,7	73,7	1026,53	251,33	229,2	8,4
L3_1P 2:1 200 1,75 H	3,4	57,2	55,7	102,97	66,22	65,4	24,8
L5_1P 2:1 200 1,75 H	4,8	56,2	55,6	143,19	156,21	156,0	27,8
L7_1P 2:1 200 1,75 H	5,7	58,1	58,3	253,91	256,37	249,6	23,3
L3_2P 2:1 200 1,75 H	3,4	57,7	56,4	192,70	68,87	67,3	14,6
L5_2P 2:1 200 1,75 H	4,8	57,2	56,5	280,94	170,12	166,5	16,7
L7_2P 2:1 200 1,75 H	5,7	58,3	59,7	491,96	332,21	315,8	18,3
L3_3P 2:1 200 1,75 H	3,4	59,0	57,9	325,15	57,84	56,6	8,0
L5_3P 2:1 200 1,75 H	4,8	57,6	57,3	492,88	184,62	181,7	12,8
L7_3P 2:1 200 1,75 H	5,7	59,5	60,4	806,01	359,25	329,4	13,4
L5_4P 2:1 200 1,75 H	4,8	59,7	61,7	778,10	166,13	158,2	8,8
L7_4P 2:1 200 1,75 H	5,7	61,5	61,2	1208,48	335,31	303,5	8,4

Tabla 79. Resultados M.E.F. zapata de esquina. Posiciones y Resultantes

Los citados coeficientes, al igual que en los casos de zapata de medianería, se obtienen por ajustes de regresión a partir de los resultados de los modelos de elemento finitos en función de la relación luz canto y del porcentaje de área en planta de la viga centradora.

POSICIÓN DE LA RESULTANTE DE LA ZAPATA DE ESQUINA

Las expresiones obtenidas tras el ajuste para las posiciones de la resultante de la zapata de esquina son las dadas por las ec.68 y 69, representándose en la Fig.112 los gráficos de los ajustes.

Fig.112. Gráficos de ajuste por mínimos cuadrados

$$a_{Re x} = 47,200 + 2,422 \cdot \left(\frac{L}{h} \right) \quad R^2 = 0,88 \quad (\text{ec.68})$$

$$a_{Re y} = 45,304 + 2,723 \cdot \left(\frac{L}{h} \right) \quad R^2 = 0,85 \quad (\text{ec.69})$$

RESULTANTES DE LA VIGAS CENTRADORAS

Las expresiones obtenidas tras el ajuste para las resultantes de las vigas centradoras son las dadas por las ec.70 y 71, representándose en la Fig.113 los gráficos de los ajustes.

Fig.113. Correlación de los ajustes de las resultantes de las vigas centradoras

$$R_{c1} = \frac{1,792 \cdot A_v^{1,205}}{0,273 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,182}} \cdot R_e \quad R^2 = 0,95 \quad (\text{ec.70})$$

$$R_{c2} = \frac{2,049 \cdot A_v^{1,261}}{0,254 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,274}} \cdot R_e \quad R^2 = 0,94 \quad (\text{ec.71})$$

5.6. RECOMENDACIONES DE RELACIÓN LUZ - CANTO

A lo largo del desarrollo de la tesis ha quedado clara la importancia de la rigidez de la viga centradora en el comportamiento de este tipo de cimentaciones, siendo el canto de la viga centradora el parámetro que más influencia tiene sobre esta cuestión. Por ello, parece razonable, a la vista de los resultados obtenidos, dar unas referencias de cantos recomendables que conduzcan a un comportamiento adecuado de este tipo de cimentaciones.

Fig.114. Recomendación de relación luz canto en zapatas de medianería

En el caso de las zapatas de medianería, ha quedado visto por medio de los resultados obtenidos, que el comportamiento geotécnico de las zapatas de medianería resulta adecuado, no generando especiales problemas de tensiones de contacto, cuando la excentricidad o posición relativa de la resultante de la zapata de medianería adopta valores inferiores al 60 - 62%. Tal y como puede deducirse del gráfico de la Fig.114 que ofrece el gráfico de la expresión obtenida para dicho parámetro, esos valores de excentricidad requieren al menos un canto de la viga centradora entre **L/6 y L/5**.

Fig.115. Recomendación de relación luz canto en zapatas de esquina

Por su parte, también se ha visto que el caso de las zapatas de esquina resulta más desfavorable por su trabajo a flexión desviada con doble excentricidad. Ello conduce, en esta ocasión, a que el comportamiento geotécnico de las zapatas de esquina resulta adecuado, no generando especiales problemas de tensiones de contacto, cuando las excentricidades o posiciones relativas de su resultante adopta valores inferiores al 58 - 60%. Tal y como puede deducirse del gráfico de la Fig.115 que ofrece el gráfico de la expresión obtenida para dichos parámetros, en la zapata de esquina es preciso ser algo más exigente, recomendando para sus vigas centradoras al menos un canto de **L/5**.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Tras el trabajo de investigación, culminado con el análisis y discusión de los resultados obtenidos en las diferentes fases experimentales de la tesis, se ofrecen en este capítulo las conclusiones más relevantes derivadas del mismo. Dada la metodología seguida, con sucesivas etapas experimentales, con sus resultados y el correspondiente análisis y discusión de los mismos, parece coherente ordenar las conclusiones de la tesis doctoral según las sucesivas etapas de las que se extraen cada una de ellas.

Asimismo, tras la exposición de las conclusiones, se indican futuras líneas de investigación a desarrollar a raíz del trabajo realizado en la tesis doctoral.

6.2. CONCLUSIONES

Cabe destacar, como primera conclusión global de la tesis doctoral, las grandes posibilidades del Método de Elementos Finitos como herramienta de trabajo para desarrollar modelos de cálculo más ajustados a la realidad que los modelos convencionales, evitando así las simplificaciones que éstos últimos introducen debido a las limitaciones que les son propias.

6.2.1. CONCLUSIONES DE LA ETAPA I

La Etapa I, mediante el contraste realizado con los modelos de elementos finitos, pone de manifiesto una serie de discrepancias respecto del comportamiento de las zapatas de medianería con viga centradora descrito por los modelos convencionales. Las discrepancias más relevantes son las siguientes:

- El comportamiento, tanto de la zapata de medianería como de la zapata interior, no es el de un empotramiento perfecto. Al contrario, acompañando a la flexión de la viga centradora, experimentan giros que las convierten en empotramientos flexibles.
- La distribución de tensiones que se produce bajo la zapata de medianería es irregular y, debido al giro que experimenta la zapata, con tendencia a incrementar las tensiones hacia el pilar de medianería. Como consecuencia de ello, si se simplifica dicha distribución de tensiones mediante un esquema lineal equivalente, debería emplearse un esquema trapecial con tensión máxima bajo el pilar de medianería, no un esquema uniformemente repartido como hacen los modelos convencionales.

- La distribución de tensiones trapecial conduce a resultantes excéntricas respecto del centro de la cara inferior de la zapata, con excentricidad creciente hacia el pilar de medianería a medida que se incrementa el porcentaje de luz de vano invadido por la zapata de medianería.
- La viga centradora, además de servir para estabilizar e intentar centrar el comportamiento de la zapata de medianería, trabaja como viga de cimentación o viga flotante, que colabora junto con la zapata de medianería y la zapata interior en la transmisión de cargas al terreno, formando globalmente un único elemento de cimentación. Como consecuencia de ello, la resultante de las tensiones de contacto bajo la viga centradora no es en absoluto despreciable, siendo mayor su importancia a medida que aumenta el tamaño relativo de la viga centradora respecto de la zapata de medianería.
- Como consecuencia de las cuestiones anteriores, el momento flector máximo en la viga centradora según el modelo de elementos finitos es considerablemente menor que el obtenido con modelos convencionales, pudiendo llegar dicha reducción a valores próximos al 50%. Debido a ello, las armaduras de la viga centradora resultantes de los modelos convencionales parecen estar sobredimensionadas según los modelos de la Etapa I.
- Por el contrario, la viga de la primera planta situada sobre la viga centradora se encuentra solicitada a flexotracción, al combinar su función habitual de viga con la función de tirante que le induce la zapata de medianería. Si bien el valor del esfuerzo axil de tracción no es en la práctica tan elevado como el que indica el modelo convencional, ignorarlo puede conducir a infradimensionar la armadura de la citada viga.
- A pesar de la tendencia al incremento de tensiones en el borde medianero de las zapatas de medianería debido al giro de las mismas, el comportamiento geotécnico no resulta preocupante en los modelos elástico lineales de la Etapa I gracias a la colaboración de la viga centradora como elemento portante capaz de transmitir carga al terreno.

6.2.2. CONCLUSIONES DE LA ETAPA II

El empleo de modelos de elementos finitos que contemplen un comportamiento del hormigón ajustado a la realidad, con diagrama tensión - deformación parabólico rectangular del hormigón y prácticamente nula resistencia a tracción del mismo conduce a resultados sustancialmente diferentes.

El proceso de fisuración que experimenta la viga centradora en su cara traccionada le induce una pérdida de inercia y, por ello, de rigidez que conduce a mayores deformaciones de la viga centradora por flexión al entrar en carga, lo cual permite mayores giros en la zapata de medianería, ya que una viga centradora debilitada se vuelve ineficaz a la hora de impedir o limitar los giros de la cimentación.

El incremento de deformación de la viga centradora en los modelos que contemplan la fisuración del hormigón y el giro excesivo de la cimentación en el escenario que se desencadena, traen consigo las siguientes consecuencias:

- La resultante de las tensiones de contacto con el terreno bajo la zapata de medianería incrementa su excentricidad, desplazándose hacia el pilar medianero, hasta un punto tal que genera distribuciones de tensiones al límite de los diagramas triangulares, con una clara tendencia al incremento de tensiones en el borde medianero.
- El aumento de deformación de la viga centradora reduce su capacidad portante para transmitir cargas al terreno, por lo cual, se reduce la colaboración de la viga centradora y se ve incrementada la resultante que le corresponde a la zapata de medianería.
- Los dos efectos anteriores colocan a la zapata de medianería en una problemática situación geotécnica, pasando a no verificarse convenientemente la comprobación de tensiones de contacto o E.L.U. de hundimiento.
- En este escenario, los momentos flectores que solicitan la viga centradora, debido al desplazamiento de la resultante de tensiones de la zapata de medianería hacia el borde medianero, son cada vez menores, partiendo incluso de unos valores ya de por sí pequeños en la Etapa I elástica lineal. Ello no debe interpretarse ya como un caso de sobredimensionamiento de armadura sino, más bien al contrario, como un síntoma de debilidad de la viga centradora que es preciso resolver.

6.2.3. CONCLUSIONES DE LA ETAPA III

De las distintas medidas puestas en escena para lograr suficientes niveles de rigidez en la viga centradora, que permitan un eficaz control del giro de la cimentación, pueden exponerse las siguientes conclusiones:

- El aumento de la armadura de la viga centradora no es, en modo alguno, una solución eficaz para rigidizar la viga centradora. Se han llegado a ensayar casos con armaduras dos veces y media las originales que finalmente solo han conseguido reducir tres puntos porcentuales la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería. Un incremento de armadura tan desproporcionado no queda justificado con un resultado tan pobre.
- Continuando en línea con lo anterior y, en contra del temor inicial, la reducción de la armadura de la viga centradora, ajustándola a los momentos que realmente la solicitan, no empeora drásticamente el comportamiento de la misma. Armaduras del orden del 40% de las originales solo generan pequeños incrementos de dos puntos porcentuales en la excentricidad de la resultante de la zapata de medianería. Conclusión, la cuantía de armado, tanto por exceso como por defecto, tiene muy poca influencia en la rigidez efectiva de la viga centradora.
- A pesar de la poca eficacia de la viga centradora en los primeros modelos de elementos finitos con fisuración del hormigón, su efecto siempre es positivo. En este sentido, los modelos de elementos finitos sin viga centradora ponen de manifiesto el mal funcionamiento de este modelo, con un comportamiento geotécnico extremo de la zapata de medianería. Estos modelos sin viga centradora, lógicamente, son los que arrojan axiles de tracción en la viga superior más próximos a los obtenidos por el método convencional con colaboración de viga superior, si bien las tracciones de los modelos de elementos finitos son siempre inferiores a las de los modelos convencionales debido al desplazamiento de la resultante de la zapata de medianería hacia el pilar medianero.
- Finalmente, el canto de la viga centradora y de la cimentación en general, termina siendo el parámetro clave que sí incrementa eficazmente la rigidez de la misma. Se ha comprobado que para cantos de la viga centradora un 75% superiores a los cantos mínimos compatibles con la condición de anclaje de la armadura de los pilares, el comportamiento del conjunto del elemento de cimentación vuelve a ser correcto. Con dichos cantos (nada desproporcionados y bastante razonables), la viga

centradora experimenta menor deformación y controla eficazmente el giro de la zapata de medianería, de modo que la excentricidad de la resultante de la viga centradora se reduce, pasando a dar diagramas netamente trapeziales, aumenta la capacidad portante de la viga centradora que ofrece mayor colaboración y se reducen las tensiones de borde que, o bien cumplen directamente, o bien conducen a valores poco preocupantes fáciles de resolver.

- Cuando se emplean vigas centradoras con suficiente canto, los momentos flectores en las mismas vuelven a ser importantes, del orden del 80% de los momentos proporcionados por los métodos convencionales. El ajuste de la armadura a la nueva situación no supone ningún peligro. Una reducción de la armadura de un 20% genera un aumento de excentricidad inapreciable en la zapata de medianería.
- Como conclusión final, la optimización de las cimentaciones de medianería con viga centradora puede resumirse en una doble línea de actuación, por un lado, inversión en hormigón para incrementar el canto de la viga centradora y, por otro lado, ahorro en armadura al ajustarla a unos momentos flectores solo ligeramente más pequeños. Ello probablemente no supone un ahorro global pero sí un conjunto estructural más equilibrado, con niveles de seguridad similares en sus distintas partes.

6.2.4. CONCLUSIONES DE LA ETAPA IV

Los resultados de la cuarta fase experimental, dedicada a las zapatas de esquina, muestran, en términos generales, comportamientos y tendencias de las zapatas de esquina similares a las de la zapata de medianería, confirmando la idea de la zapata de esquina con dos vigas centradoras como caso particular de la zapata de medianería con viga centradora. Ahora bien, deben destacarse las siguientes diferencias por las precauciones de dimensionamiento a que pueden dar lugar:

- Al igual que en el caso de las zapatas de medianería, la distribución de tensiones en la zapata de esquina no es uniformemente repartida, por lo que su resultante no está centrada, presentando una cierta excentricidad. Ahora bien, la magnitud de las excentricidades obtenidas para los casos de zapata de esquina es superior a la de las obtenidas para los casos de zapata de medianería, lo cual señala a las zapatas de esquina como un caso más desfavorable que las zapatas de medianería. Ello es debido a la forma cuadrada habitualmente adoptada para este tipo de zapatas, en un

intento de equilibrar el comportamiento de las dos medianerías que confluyen en la esquina. Si bien es posible que no haya otra opción mejor, la zapata de esquina cuadrada es una relación de forma desfavorable, que implica que la resultante de las tensiones de contacto se desplace más hacia el centro de las vigas centradoras, generando mayor flexión y deformación de las mismas.

- Asimismo, se constata igualmente la situación problemática de la comprobación de tensiones de contacto en la zapata de esquina para los casos de canto mínimo, si bien el problema aparece en las zapatas de esquina de un modo más agudo que en las zapatas de medianería. La causa del agravamiento de la situación en las zapatas de esquina está, por un lado, en el aumento de las excentricidades comentado en el párrafo anterior y, por otro, en el hecho de tratarse de una situación de flexión desviada, con una doble excentricidad simultánea que acentúa la cuestión de las tensiones de contacto.
- Comprobado el efecto claramente favorable del incremento de canto en las vigas centradoras, cabe indicar que las excentricidades obtenidas en las zapatas de esquina son, en general, ligeramente superiores a las obtenidas en los correspondientes casos de zapata de medianería, a igualdad de canto, lo cual parece indicar la necesidad de un ligero incremento de canto adicional en las zapatas de esquina para alcanzar el mismo nivel de control de la excentricidad.
- Por último, es preciso matizar que los momentos obtenidos en las vigas centradoras de las zapatas de esquina son, en proporción, algo inferiores a los obtenidos con zapata de medianería, lo cual pone de manifiesto la mayor flexión de las vigas centradoras en este caso y refuerza la idea de la necesidad de un ligero incremento del canto respecto de los casos de zapata de medianería.

6.2.5. PROPUESTA DE MEJORA DEL MÉTODO CONVENCIONAL

A la vista del estudio realizado se concluye que podría mejorarse el método convencional de cálculo de este tipo de cimentaciones, conduciendo a resultados más ajustados a la realidad, si se ponen en escena, tanto la excentricidad de la resultante de tensiones de la zapata de medianería (o en su caso la de esquina), como la resultante de tensiones de contacto bajo la viga centradora (o en su caso vigas

centradoras). Los resultados obtenidos a partir de los modelos de elementos finitos han permitido obtener las expresiones a las que responden los citados parámetros, que son las siguientes:

$$a_{Rm} = 51,339 + 1,741 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)$$

$$a_{Rex} = 47,200 + 2,422 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)$$

$$a_{Rey} = 45,304 + 2,723 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)$$

$$R_v = \frac{1,979 \cdot A_v^{1,014}}{0,268 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,729}} \cdot R_m$$

$$R_{c1} = \frac{1,792 \cdot A_v^{1,205}}{0,273 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,182}} \cdot R_e$$

$$R_{c2} = \frac{2,049 \cdot A_v^{1,261}}{0,254 \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^{0,274}} \cdot R_e$$

Siendo:

- a_{Rm} : Posición de la resultante de la zapata de medianería respecto de un extremo de la misma en (%)
- a_{Rex} : Posición de la resultante de la zapata de esquina respecto de un extremo de la misma en dirección x en (%)
- a_{Rey} : Posición de la resultante de la zapata de esquina respecto de un extremo de la misma en dirección y en (%)
- L : Luz del pórtico en (m)
- h : Canto de la viga centradora en (m)
- R_v : Resultante de tensiones de contacto de la viga centradora
- R_m : Resultante de tensiones de contacto de la zapata de medianería
- R_{c1} : Resultante de tensiones de contacto de la viga centradora 1
- R_{c2} : Resultante de tensiones de contacto de la viga centradora 2
- A_v : Proporción del área en planta de la viga centradora respecto del total del área en planta del conjunto zapata medianería – viga centradora - zapata interior en tanto por uno

6.2.6. RECOMENDACIONES DE RELACIÓN LUZ - CANTO

A lo largo del desarrollo de la tesis ha quedado clara la importancia de la rigidez de la viga centradora en el comportamiento de este tipo de cimentaciones, siendo el canto de la viga centradora el parámetro fundamental que más influencia tiene sobre esta cuestión. Por ello, parece razonable, a la vista de los resultados obtenidos, dar unas referencias de cantos recomendables que conduzcan a un comportamiento adecuado de este tipo de cimentaciones.

En el caso de las zapatas de medianería, se comprueba que el comportamiento geotécnico de las mismas resulta adecuado, no generando especiales problemas de tensiones de contacto, cuando la excentricidad o posición relativa de la resultante de la zapata de medianería adopta valores inferiores al 60 - 62%. Para lograr dichos valores de excentricidad se requiere, al menos, un canto de viga centradora comprendido entre **L/6 y L/5**.

Por su parte, en el caso de las zapatas de esquina, con una situación más desfavorable por su trabajo a flexión desviada con doble excentricidad, se comprueba que el comportamiento geotécnico de las mismas resulta adecuado, no generando especiales problemas de tensiones de contacto, cuando las excentricidades o posiciones relativas de su resultante adoptan valores inferiores al 58 - 60%. Para lograr dichos valores de excentricidad es preciso ser algo más exigente, requiriendo , al menos, un canto de vigas centradoras de **L/5**.

6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras el trabajo de investigación desarrollado en la presente tesis doctoral pueden plantearse como futuras líneas de investigación las siguientes:

- Dentro del campo de las zapatas de medianería, el paso de los modelos de elementos finitos con planteamiento elástico lineal en todos los materiales implicados a modelos con un estudio del comportamiento del hormigón más ajustado a la realidad, ha supuesto cambios importantes en el estudio e interpretación del problema. En este sentido, queda otro material por abordar en profundidad, que es el terreno. El desarrollo de modelos de elementos finitos que contemplen la plastificación del terreno, especialmente en las zonas donde se producen puntas de tensión, junto con modelos de comportamiento más ajustados a la realidad de dicho material, puede abrir nuevos enfoques y puntos de vista del tema estudiado.
- El estudio de las zapatas de esquina se ha realizado con casos con igual luz que crujía y, por ello, zapata de esquina cuadrada. Resultaría interesante abrir el abanico de casos de estudio, con diferentes combinaciones de luces y crujías, con el fin de alcanzar propuestas de aplicación más general.
- El método de los elementos finitos ha demostrado ser una valiosa herramienta para contrastar métodos de cálculo de carácter convencional, irremediablemente llenos de simplificaciones. Dentro de la amplia lista de posibles temas a estudiar, podría completarse el catálogo de cimentaciones directas habituales en edificación, con el estudio de las zapatas combinadas.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

ACI 318 - 14 (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Ed. American Concrete Institute.

Ansys. (2012). Manual de Referencia ANSYS 12.0. Ed. ANSYS Inc.

Argüelles, R. (2015). Cálculo de Estructuras. Ed. Bellisco

Argüelles, R. (1992). Fundamentos de Elasticidad y su Programación por Elementos Finitos. Ed. Bellisco

Branson, D.E. (1977). Deformation of Concrete Structures. Ed. Mc Graw - Hill

Calavera, J. (2000). Cálculo de Estructuras de Cimentación. Ed. INTEMAC

Calavera, J. (2009). Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón. Ed. Intemac

CEB Task Group 2.2 (1998). Ductility of Reinforced Concrete Structures. CEB Bull. D'Information nº 242

CEB Task Group 4.4. (2008). Practitioner's Guide to Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures. Ed. CEB - FIB

Cervenka, V. (2002). Computer Simulation of Failure of Concrete Structures for Practice. 1st fib Congress 2002, Concrete Structures in 21 Century, Osaka, Japan

CTE (2006). Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda

EHE-08 (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de la Presidencia

Galletero Montero, P. (2009). Estudio del Comportamiento de Zapatas de Medianería con Viga Centradora Mediante Modelos de Elementos Finitos. Trabajo de Investigación. Universidad Politécnica de Madrid.

García Meseguer, A. (2001). Hormigón Armado. Ed. U.N.E.D. Escuela de la Edificación

García Valcarce, A. y otros. (2003). Mecánica de los Terrenos y Cimientos. Ed. Dossat

Guaita Fernández, M y otros. (1999). Aplicación del Método de los Elemento Finitos a Problemas de Construcción Rural. Ed. Unicopia

Ingeciber. (2003). Curso de Teoría y Aplicación Práctica del Método de los Elementos Finitos y Simulación. Ed. U.N.E.D. E.T.S.I. Industriales

Jiménez Montoya, P. y otros. (2009). Hormigón Armado. Ed. Gustavo Gili

Jiménez Salas, J.A. (1981). Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda

Oñate, E. (1995). Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

Perepérez, B.; Barberá, E. (2005). Manual del Hormigón Estructural. Ed. M.P.C.

Rodríguez, J. M.; Serra, J.; Oteo C. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid

Zienkiewicz, O.C. (1994). El Método de los Elementos Finitos. Ed. Mc. Graw – Hill.

ANEJO I

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

ANEJO I

Se ofrece en el presente anejo un listado tipo con los comandos del lenguaje de programación APDL de ANSYS que permiten desarrollar el modelo de elementos finitos utilizado en la fase experimental virtual.

```

!
!-----
!
!  VARIABLES
!
!-----
!
!  DIMENSIONES PÓRTICO (m)
!
L=6
HAQ=1.10
HB=4
HP=3
!
!  SECCIÓN PILARES (m)
!
APM=0.3
BPM=0.45
!
!  SECCIÓN VIGAS (m)
!
BV=0.7
HV=0.3
!
!  ATADO CERRAMIENTOS
!
LC=1
!
!-----
!
!  GENERAL CIMENTACIÓN (m)
!
HZ=0.7
!
!  ZAPATA MEDIANERÍA (m)
!
AZM=1.35
BZM=2.7
!
!  ZAPATA INTERIOR (m)
!
AZI=2.25
BZI=2.25
!
!  VIGA CENTRADORA (m)

```

```

!
BC=0.55
!
! TERCERA ZAPATA (m)
!
AZT=1.7
BZT=1.7
!
!-----
!
! GENERAL SUELO (m)
!
HS=10
AS=5
BS=5
!
!-----
!
! SOLERA
!
! ESPESOR ZAHORRA
!
EZH=0.3
!
! ESPESOR SOLERA
!
ESOL=0.2
!
!-----
!
! TAMAÑO ELEMENTOS MALLADO PÓRTICO - ZAPATAS
!
TEP=0.1
!
!-----
!
! TAMAÑO ELEMENTOS MALLADO SOLERA
!
TESOL=0.08
!
!-----
!
! TAMAÑO ELEMENTOS MALLADO SUELO
!
TES=0.22
!
! GRADUACIÓN LÍNEAS
!
! TAMAÑO DE REFERENCIA
!
TESL=0.4
!
! FACTOR DE GRADUACIÓN
!
FGL=3

```

```

!
!-----
!
! CARGAS
!
!-----
!
! CARGA REPARTIDA PLANTA VIVIENDAS
!
QRP=40.25E3
!
! CARGA REPARTIDA CUBIERTA
!
QRC=38.41E3
!
! CARGA PUNTUAL CERRAMIENTO PLANTA VIVIENDAS
!
QPP=50.03E3
!
! CARGA PUNTUAL ANTEPECHO CUBIERTA
!
QPC=24.68E3
!
!-----
!
! ENTORNO
!
!-----
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/VUP,1,Z
/REPLOT
!
!-----
!
! PREPROCESO
!
!-----
!
/PREP7
!
!-----
!
! TIPO DE ELEMENTOS
!
!-----
!
ET,1,SOLID45
!
!-----
!
! PROPIEDADES MATERIALES
!

```

```

!-----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.73E10
MPDATA,PRXY,1,,0.2
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2500
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,6E7
MPDATA,PRXY,2,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,1800
!
!-----
!
! MODELADO
!
!-----
!
! PIE PILARES 1ª PLANTA
!
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,0,HAQ,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,0,HAQ,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,HAQ,
!
! CREACIÓN COMPONENTE PIE_PILAR_VOL
!
CM,PIE_PILAR_VOL,VOLU
CMSEL,A,PIE_PILAR_VOL
!
CMSEL,U,PIE_PILAR_VOL
!
! CABEZA PILARES 1ª PLANTA
!
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HAQ,HB-HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HAQ,HB-HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HAQ,HB-HV/2,
!
! CREACIÓN COMPONENTE CAB_PILAR_VOL
!
CM,CAB_PILAR_VOL,VOLU
CMSEL,A,CAB_PILAR_VOL
!
CMSEL,U,CAB_PILAR_VOL
!
! INICIO VIGA 1ª PLANTA
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,APM/2,L/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,L/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
!

```

```

! CREACIÓN COMPONENTE INI_VIGA_VOL
!
CM,INI_VIGA_VOL,VOLU
CMSEL,A,INI_VIGA_VOL
!
CMSEL,U,INI_VIGA_VOL
!
! RESTO PILARES
!
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HB+HV/2,HB+HP-HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HB+HP+HV/2,HB+2*HP-HV/2,
!
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HB+HV/2,HB+HP-HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HB+HP+HV/2,HB+2*HP-HV/2,
!
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+HV/2,HB+HP-HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+HP+HV/2,HB+2*HP-
HV/2,
!
! NUDOS
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+HP-
HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
! VIGAS
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L/2,L-APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,

```

```

BLOCK,-BPM/2,0,L/2,L-APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,APM/2,L/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,L/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L/2,L-APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L/2,L-APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,APM/2,L/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,L/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L/2,L-APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L/2,L-APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+APM/2,L+L/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+L/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+L/2,2*L-APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+L/2,2*L-APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+APM/2,L+L/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+L/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+L/2,2*L-APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+L/2,2*L-APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+APM/2,L+L/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+L/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BV/2,-BPM/2,L+L/2,2*L-APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
BLOCK,-BPM/2,0,L+L/2,2*L-APM/2,HB+2*HP-HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
! CREACIÓN COMPONENTE PÓRTICO_VOL
!
CM,PORTICO_VOL,VOLU
CMSEL,A,PORTICO_VOL
!
CMSEL,U,PORTICO_VOL
!
! ATADO CERRAMIENTO
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,-APM/2,APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,-APM/2,APM/2,HB+HP-HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,-APM/2,APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB-HV/2,HB+HV/2,
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+HP-
HV/2,HB+HP+HV/2,
!
BLOCK,-(BV/2+LC),-BV/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,HB+2*HP-
HV/2,HB+2*HP+HV/2,
!
! CREACIÓN COMPONENTE ATADO_VOL
!
CM,ATADO_VOL,VOLU

```

```

CMSEL,A,ATADO_VOL
!
CMSEL,U,ATADO_VOL
!
! VIGA CENTRADORA
!
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,AZM-APM/2,L-AZI/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,AZM-APM/2,L-AZI/2,0,-HZ,
!
! CREACIÓN COMPONENTE CENTRADORA_VOL
!
CM,CENTRADORA_VOL,VOLU
CMSEL,A,CENTRADORA_VOL
!
CMSEL,U,CENTRADORA_VOL
!
! ZAPATA MEDIANERÍA
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,-APM/2,APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,-APM/2,APM/2,0,-HZ,
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,APM/2,AZM-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,APM/2,AZM-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,AZM-APM/2,0,-HZ,
!
! ZAPATA INTERIOR
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-AZI/2,L-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-AZI/2,L-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,L-AZI/2,L-APM/2,0,-HZ,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-APM/2,L+APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,L-APM/2,L+APM/2,0,-HZ,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L+APM/2,L+AZI/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L+APM/2,L+AZI/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+AZI/2,0,-HZ,
!
! TERCERA ZAPATA
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,-HZ,
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,-HZ,
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,-HZ,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,-HZ,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,-HZ,
!
! CREACIÓN COMPONENTE ZAPATAS_VOL

```

```

!
CM,ZAPATAS_VOL,VOLU
CMSEL,A,ZAPATAS_VOL
!
CMSEL,U,ZAPATAS_VOL
!
! SUELO MEDIANERÍA
!
BLOCK,-BS,0,-AS,1.5*L,-HZ,-(HZ+HS),
!
! SUELO TERCERA ZAPATA
!
BLOCK,-BS,0,1.5*L,2*L+AS,-HZ,-(HZ+HS),
!
! CREACIÓN COMPONENTE SUELO_VOL
!
CM,SUELO_VOL,VOLU
CMSEL,A,SUELO_VOL
!
CMSEL,U,SUELO_VOL
!
! ELECCIÓN COLOR COMPONENTES
!
ALLSEL,ALL
VPLOT
!
/COLOR,CM,DGRA,PIE_PILAR_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,CAB_PILAR_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,INI_VIGA_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,PORTICO_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,ATADO_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,CENTRADORA_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,ZAPATAS_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,ORAN,SUELO_VOL
/REPLOT
!*
!-----
!
! MALLADO
!
!-----

```



```

!
NUMMRG,KP, , , ,LOW
!
!
!-----
!
! MALLADO PIE PILAR 1ª PLANTA
!
!
CMSEL,S,PIE_PILAR_VOL
VPLOT
VATT, , 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
FLST,5,3,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,PIE_PILAR_ELE,ELEM
CMSEL,A,PIE_PILAR_ELE
!
CMSEL,U,PIE_PILAR_ELE
!
!-----
!
! MALLADO CABEZA PILAR 1ª PLANTA
!
CMSEL,S,CAB_PILAR_VOL
VPLOT
VATT, , 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
FLST,5,3,6,ORDE,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-6
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*

```

```

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,CAB_PILAR_ELE,ELEM
CMSEL,A,CAB_PILAR_ELE
!
CMSEL,U,CAB_PILAR_ELE
!
!-----
!
! MALLADO INICIO VIGA 1ª PLANTA
!
CMSEL,S,INI_VIGA_VOL
VPLT
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,INI_VIGA_ELE,ELEM
CMSEL,A,INI_VIGA_ELE
!
CMSEL,U,INI_VIGA_ELE
!
!-----
!
! MALLADO PÓRTICO
!
CMSEL,S,PORTICO_VOL
VPLT
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
FLST,5,46,6,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,-54
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1

```

```

!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,PORTICO_ELE,ELEM
CMSEL,A,PORTICO_ELE
!
CMSEL,U,PORTICO_ELE
!
!-----
!
! MALLADO ATADOS
!
CMSEL,S,ATADO_VOL
VPLOT
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
FLST,5,6,6,ORDE,2
FITEM,5,55
FITEM,5,-60
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,ATADO_ELE,ELEM
CMSEL,A,ATADO_ELE
!
CMSEL,U,ATADO_ELE
!
!-----
!
! MALLADO VIGA CENTRADORA
!
CMSEL,S,CENTRADORA_VOL
VPLOT
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE,TEP,0,
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,61
FITEM,5,-62
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*

```

```

VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,CENTRADORA_ELE,ELEM
CMSEL,A,CENTRADORA_ELE
!
CMSEL,U,CENTRADORA_ELE
!
!-----
!
! MALLADO ZAPATAS
!
CMSEL,S,ZAPATAS_VOL
VPLOT
VATT, 1, , 1, 0
ESIZE,0.1,0,
FLST,5,24,6,ORDE,2
FITEM,5,63
FITEM,5,-86
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,ZAPATAS_ELE,ELEM
CMSEL,A,ZAPATAS_ELE
!
CMSEL,U,ZAPATAS_ELE
!
!-----
!
! MALLADO SUELO
!
CMSEL,S,SUELO_VOL
VPLOT
VATT, 2, , 1, 0
ESIZE,TES,0,
!
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,1042
FITEM,5,-1043
FITEM,5,1055
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE

```

```

CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,TESL, , ,1/FGL, , , ,1
!*
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,1041
FITEM,5,1044
FITEM,5,1056
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,TESL, , ,FGL, , , ,1
!*
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,87
FITEM,5,-88
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,SUELO_ELE,ELEM
CMSEL,A,SUELO_ELE
!
CMSEL,U,SUELO_ELE
!
!
! ELECCIÓN COLOR COMPONENTES
!
ALLSEL,ALL
EPLOT
/COLOR,CM,DGRA,PIE_PILAR_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,CAB_PILAR_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,INI_VIGA_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,PORTICO_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,ATADO_ELE
/REPLOT
!*

```

```

/COLOR,CM,DGRA,CENTRADORA_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,DGRA,ZAPATAS_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,ORAN,SUELO_ELE
/REPLOT
!*
CMSEL,NONE,ZAPATAS_VOL
!
!-----
!
! MODELADO ZAHORRA
!
!-----
!
! ZAPATA MEDIANERÍA
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,-APM/2,APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,0,EZH,
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,APM/2,AZM-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,APM/2,AZM-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,AZM-APM/2,0,EZH,
!
! ZAPATA INTERIOR
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-AZI/2,L-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-AZI/2,L-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BPM/2,0,L-AZI/2,L-APM/2,0,EZH,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-APM/2,L+APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,0,EZH,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L+APM/2,L+AZI/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L+APM/2,L+AZI/2,0,EZH,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+AZI/2,0,EZH,
!
! TERCERA ZAPATA
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,0,EZH,
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,0,EZH,
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,EZH,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,EZH,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,0,EZH,
!
! VIGA CENTRADORA
!
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,AZM-APM/2,L-AZI/2,0,EZH,

```

```

BLOCK,-BPM/2,0,AZM-APM/2,L-AZI/2,0,EZH,
!
FLST,3,23,6,ORDE,2
FITEM,3,89
FITEM,3,-111
VGEN, ,P51X, , ,-1,1,1, , ,1
NUMMRG,KP, , , ,LOW
!
!
! CREACIÓN COMPONENTE ZAHORRA_VOL
!
CM,ZAHORRA_VOL,VOLU
CMSEL,A,ZAHORRA_VOL
!
CMSEL,U,ZAHORRA_VOL
!
CMSEL,NONE,ZAPATAS_VOL
!
!-----
!
! MODELADO SOLERA
!
!-----
!
! ZAPATA MEDIANERÍA
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,-APM/2,APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,-APM/2,APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!
BLOCK,-BZM/2,-BC/2,APM/2,AZM-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,APM/2,AZM-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,APM/2,AZM-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!
! ZAPATA INTERIOR
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-AZI/2,L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-AZI/2,L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,L-AZI/2,L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L-APM/2,L+APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L-APM/2,L+APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!
BLOCK,-BZI/2,-BC/2,L+APM/2,L+AZI/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,L+APM/2,L+AZI/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,L+APM/2,L+AZI/2,EZH,EZH+ESOL,
!
! TERCERA ZAPATA
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L-AZT/2,2*L-APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!
BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L-APM/2,2*L+APM/2,EZH,EZH+ESOL,
!

```

```

BLOCK,-BZT/2,-BC/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,2*L+APM/2,2*L+AZT/2,EZH,EZH+ESOL,
!
! VIGA CENTRADORA
!
BLOCK,-BC/2,-BPM/2,AZM-APM/2,L-AZI/2,EZH,EZH+ESOL,
BLOCK,-BPM/2,0,AZM-APM/2,L-AZI/2,EZH,EZH+ESOL,
!
FLST,3,23,6,ORDE,2
FITEM,3,112
FITEM,3,-134
VGEN, ,P51X, , , -2,2,2, , , 1
NUMMRG,KP, , , ,LOW
!
! CREACIÓN COMPONENTE SOLERA_VOL
!
CM,SOLERA_VOL,VOLU
CMSEL,A,SOLERA_VOL
!
CMSEL,U,SOLERA_VOL
!
!-----
!
! MALLADO ZAHORRA
!
!-----
!
CMSEL,S,ZAHORRA_VOL
FLST,3,23,6,ORDE,2
FITEM,3,89
FITEM,3,-111
VGEN, ,P51X, , , 1,-1,-1, , , 1
VPLT
VATT, 2, , 1, 0
ESIZE, TESOL,0,
FLST,5,23,6,ORDE,2
FITEM,5,89
FITEM,5,-111
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,ZAHORRA_ELE,ELEM
CMSEL,A,ZAHORRA_ELE
!
CMSEL,U,ZAHORRA_ELE

```



```

!
!-----
!
! MALLADO SOLERA
!
!-----
!
CMSEL,S,SOLERA_VOL
FLST,3,23,6,ORDE,2
FITEM,3,112
FITEM,3,-134
VGEN,,P51X,,2,-2,-2,,1
VPLOT
VATT,,1,,1,0
ESIZE,TESOL,0,
FLST,5,23,6,ORDE,2
FITEM,5,112
FITEM,5,-134
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,SOLERA_ELE,ELEM
CMSEL,A,SOLERA_ELE
!
CMSEL,U,SOLERA_ELE
!
ALLSEL,ALL
EPLOT
/COLOR,CM,YELL,ZAHORRA_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,YELL,ZAHORRA_VOL
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,LGRA,SOLERA_ELE
/REPLOT
!*
/COLOR,CM,LGRA,SOLERA_VOL
/REPLOT
!*
!
!-----
!
! DEFINICIÓN COACCIONES
!
!-----

```

```

!
FLST,2,2448,1,ORDE,4
FITEM,2,21985
FITEM,2,-23544
FITEM,2,62545
FITEM,2,-63432
!*
/GO
D,P51X, , , , , UX,UY,UZ, , ,
!
FLST,2,600,1,ORDE,4
FITEM,2,23545
FITEM,2,-23568
FITEM,2,25105
FITEM,2,-25680
!*
/GO
D,P51X, , , , , UY, , , , ,
!
FLST,2,600,1,ORDE,5
FITEM,2,63433
FITEM,2,63470
FITEM,2,-63492
FITEM,2,64321
FITEM,2,-64896
!*
/GO
D,P51X, , , , , UY, , , , ,
!
FLST,2,2550,1,ORDE,17
FITEM,2,23545
FITEM,2,23633
FITEM,2,23656
FITEM,2,-23718
FITEM,2,25105
FITEM,2,-25128
FITEM,2,25705
FITEM,2,-25728
FITEM,2,26257
FITEM,2,-27768
FITEM,2,63470
FITEM,2,63493
FITEM,2,-63528
FITEM,2,64345
FITEM,2,-64368
FITEM,2,64897
FITEM,2,-65760
!*
/GO
D,P51X, , , , , UX, , , , ,
!
FLST,2,6858,1,ORDE,515
FITEM,2,5
FITEM,2,8
FITEM,2,-10

```

FITEM,2,18
FITEM,2,21
FITEM,2,-23
FITEM,2,43
FITEM,2,-52
FITEM,2,73
FITEM,2,-82
FITEM,2,133
FITEM,2,-152
FITEM,2,197
FITEM,2,200
FITEM,2,-202
FITEM,2,210
FITEM,2,213
FITEM,2,-215
FITEM,2,235
FITEM,2,-244
FITEM,2,265
FITEM,2,-274
FITEM,2,325
FITEM,2,-344
FITEM,2,389
FITEM,2,392
FITEM,2,-394
FITEM,2,402
FITEM,2,405
FITEM,2,-407
FITEM,2,427
FITEM,2,-436
FITEM,2,457
FITEM,2,-466
FITEM,2,517
FITEM,2,-536
FITEM,2,578
FITEM,2,581
FITEM,2,-583
FITEM,2,620
FITEM,2,-646
FITEM,2,701
FITEM,2,-727
FITEM,2,863
FITEM,2,-916
FITEM,2,1026
FITEM,2,1029
FITEM,2,-1031
FITEM,2,1068
FITEM,2,-1094
FITEM,2,1149
FITEM,2,-1175
FITEM,2,1311
FITEM,2,-1364
FITEM,2,1474
FITEM,2,1477
FITEM,2,-1479
FITEM,2,1516

FITEM,2,-1542
FITEM,2,1597
FITEM,2,-1623
FITEM,2,1759
FITEM,2,-1812
FITEM,2,2280
FITEM,2,2283
FITEM,2,-2310
FITEM,2,2367
FITEM,2,2370
FITEM,2,-2398
FITEM,2,2457
FITEM,2,-2458
FITEM,2,2463
FITEM,2,-2464
FITEM,2,2469
FITEM,2,-2524
FITEM,2,2640
FITEM,2,-2642
FITEM,2,2650
FITEM,2,2653
FITEM,2,-2655
FITEM,2,2691
FITEM,2,-2716
FITEM,2,2769
FITEM,2,-2794
FITEM,2,2925
FITEM,2,-2976
FITEM,2,3085
FITEM,2,3088
FITEM,2,-3090
FITEM,2,3098
FITEM,2,3101
FITEM,2,-3103
FITEM,2,3139
FITEM,2,-3164
FITEM,2,3217
FITEM,2,-3242
FITEM,2,3373
FITEM,2,-3424
FITEM,2,3533
FITEM,2,3536
FITEM,2,-3538
FITEM,2,3546
FITEM,2,3549
FITEM,2,-3551
FITEM,2,3587
FITEM,2,-3612
FITEM,2,3665
FITEM,2,-3690
FITEM,2,3821
FITEM,2,-3872
FITEM,2,3981
FITEM,2,3984
FITEM,2,-3986

FITEM,2,3994
FITEM,2,3997
FITEM,2,-3999
FITEM,2,4035
FITEM,2,-4060
FITEM,2,4113
FITEM,2,-4138
FITEM,2,4269
FITEM,2,-4320
FITEM,2,4429
FITEM,2,4432
FITEM,2,-4434
FITEM,2,4442
FITEM,2,4445
FITEM,2,-4447
FITEM,2,4483
FITEM,2,-4508
FITEM,2,4561
FITEM,2,-4586
FITEM,2,4717
FITEM,2,-4768
FITEM,2,4877
FITEM,2,4880
FITEM,2,-4882
FITEM,2,4890
FITEM,2,4893
FITEM,2,-4895
FITEM,2,4931
FITEM,2,-4956
FITEM,2,5009
FITEM,2,-5034
FITEM,2,5165
FITEM,2,-5216
FITEM,2,5351
FITEM,2,-5352
FITEM,2,5357
FITEM,2,-5360
FITEM,2,5409
FITEM,2,-5410
FITEM,2,5415
FITEM,2,-5416
FITEM,2,5421
FITEM,2,-5424
FITEM,2,5477
FITEM,2,5480
FITEM,2,-5482
FITEM,2,5489
FITEM,2,-5490
FITEM,2,5495
FITEM,2,-5496
FITEM,2,5501
FITEM,2,-5504
FITEM,2,5553
FITEM,2,-5554
FITEM,2,5559

FITEM,2,-5560
FITEM,2,5565
FITEM,2,-5568
FITEM,2,5617
FITEM,2,-5618
FITEM,2,5623
FITEM,2,-5624
FITEM,2,5629
FITEM,2,-5632
FITEM,2,5685
FITEM,2,5688
FITEM,2,-5690
FITEM,2,5697
FITEM,2,-5698
FITEM,2,5703
FITEM,2,-5704
FITEM,2,5709
FITEM,2,-5712
FITEM,2,5761
FITEM,2,-5762
FITEM,2,5767
FITEM,2,-5768
FITEM,2,5773
FITEM,2,-5776
FITEM,2,5825
FITEM,2,-5826
FITEM,2,5831
FITEM,2,-5832
FITEM,2,5837
FITEM,2,-5840
FITEM,2,5893
FITEM,2,5896
FITEM,2,-5898
FITEM,2,5905
FITEM,2,-5906
FITEM,2,5911
FITEM,2,-5912
FITEM,2,5917
FITEM,2,-5920
FITEM,2,6265
FITEM,2,-6292
FITEM,2,6349
FITEM,2,-6376
FITEM,2,6433
FITEM,2,-6488
FITEM,2,6949
FITEM,2,6952
FITEM,2,-6979
FITEM,2,7036
FITEM,2,-7064
FITEM,2,7123
FITEM,2,-7124
FITEM,2,7129
FITEM,2,-7184
FITEM,2,7633

FITEM,2,-7660
FITEM,2,7717
FITEM,2,-7744
FITEM,2,7801
FITEM,2,-7856
FITEM,2,8317
FITEM,2,8320
FITEM,2,-8347
FITEM,2,8404
FITEM,2,-8432
FITEM,2,8491
FITEM,2,-8492
FITEM,2,8497
FITEM,2,-8552
FITEM,2,9001
FITEM,2,-9028
FITEM,2,9085
FITEM,2,-9112
FITEM,2,9169
FITEM,2,-9224
FITEM,2,9685
FITEM,2,9688
FITEM,2,-9715
FITEM,2,9772
FITEM,2,-9800
FITEM,2,9859
FITEM,2,-9860
FITEM,2,9865
FITEM,2,-9920
FITEM,2,10369
FITEM,2,-10396
FITEM,2,10453
FITEM,2,-10480
FITEM,2,10537
FITEM,2,-10592
FITEM,2,11053
FITEM,2,11056
FITEM,2,-11083
FITEM,2,11140
FITEM,2,-11168
FITEM,2,11227
FITEM,2,-11228
FITEM,2,11233
FITEM,2,-11288
FITEM,2,11737
FITEM,2,-11764
FITEM,2,11821
FITEM,2,-11848
FITEM,2,11905
FITEM,2,-11960
FITEM,2,12421
FITEM,2,12424
FITEM,2,-12451
FITEM,2,12508
FITEM,2,-12536

FITEM,2,12595
FITEM,2,-12596
FITEM,2,12601
FITEM,2,-12656
FITEM,2,13105
FITEM,2,-13132
FITEM,2,13189
FITEM,2,-13216
FITEM,2,13273
FITEM,2,-13328
FITEM,2,15009
FITEM,2,15012
FITEM,2,-15048
FITEM,2,15123
FITEM,2,15126
FITEM,2,-15162
FITEM,2,15237
FITEM,2,-15242
FITEM,2,15255
FITEM,2,-15260
FITEM,2,15273
FITEM,2,-15488
FITEM,2,16333
FITEM,2,16336
FITEM,2,-16338
FITEM,2,16345
FITEM,2,-16350
FITEM,2,16363
FITEM,2,-16368
FITEM,2,16381
FITEM,2,-16392
FITEM,2,17545
FITEM,2,-17554
FITEM,2,17575
FITEM,2,-17584
FITEM,2,17605
FITEM,2,-17664
FITEM,2,18736
FITEM,2,18739
FITEM,2,-18747
FITEM,2,18766
FITEM,2,-18774
FITEM,2,18793
FITEM,2,-18798
FITEM,2,18811
FITEM,2,-18864
FITEM,2,19234
FITEM,2,19237
FITEM,2,-19238
FITEM,2,19243
FITEM,2,-19248
FITEM,2,19261
FITEM,2,-19272
FITEM,2,20177
FITEM,2,20180

FITEM,2,-20188
FITEM,2,20207
FITEM,2,-20216
FITEM,2,20237
FITEM,2,-20242
FITEM,2,20255
FITEM,2,-20308
FITEM,2,20928
FITEM,2,20931
FITEM,2,-20937
FITEM,2,20952
FITEM,2,20955
FITEM,2,-20960
FITEM,2,20973
FITEM,2,-20978
FITEM,2,20991
FITEM,2,-20996
FITEM,2,21009
FITEM,2,-21044
FITEM,2,21306
FITEM,2,21309
FITEM,2,-21310
FITEM,2,21315
FITEM,2,-21320
FITEM,2,21333
FITEM,2,-21344
FITEM,2,21817
FITEM,2,21820
FITEM,2,-21825
FITEM,2,21838
FITEM,2,-21844
FITEM,2,21859
FITEM,2,-21864
FITEM,2,21877
FITEM,2,-21912
FITEM,2,23546
FITEM,2,23569
FITEM,2,-23632
FITEM,2,25129
FITEM,2,-25152
FITEM,2,25681
FITEM,2,-25704
FITEM,2,27769
FITEM,2,-29280
FITEM,2,63433
FITEM,2,-63469
FITEM,2,64321
FITEM,2,-64344
FITEM,2,65761
FITEM,2,-66624
FITEM,2,87153
FITEM,2,87156
FITEM,2,-87169
FITEM,2,87198
FITEM,2,87201

FITEM,2,-87214
FITEM,2,87243
FITEM,2,-87245
FITEM,2,87252
FITEM,2,-87254
FITEM,2,87261
FITEM,2,-87299
FITEM,2,88288
FITEM,2,88291
FITEM,2,-88303
FITEM,2,88330
FITEM,2,88333
FITEM,2,-88345
FITEM,2,88372
FITEM,2,-88374
FITEM,2,88381
FITEM,2,-88383
FITEM,2,88390
FITEM,2,-88425
FITEM,2,89603
FITEM,2,89606
FITEM,2,-89618
FITEM,2,89645
FITEM,2,89648
FITEM,2,-89660
FITEM,2,89687
FITEM,2,-89689
FITEM,2,89696
FITEM,2,-89698
FITEM,2,89705
FITEM,2,-89740
FITEM,2,90313
FITEM,2,90316
FITEM,2,-90324
FITEM,2,90343
FITEM,2,90346
FITEM,2,-90354
FITEM,2,90373
FITEM,2,-90375
FITEM,2,90382
FITEM,2,-90384
FITEM,2,90391
FITEM,2,-90414
FITEM,2,91113
FITEM,2,91116
FITEM,2,-91124
FITEM,2,91143
FITEM,2,91146
FITEM,2,-91154
FITEM,2,91173
FITEM,2,-91175
FITEM,2,91182
FITEM,2,-91184
FITEM,2,91191
FITEM,2,-91214

FITEM,2,91713
FITEM,2,-91757
FITEM,2,91848
FITEM,2,-91892
FITEM,2,91983
FITEM,2,-92117
FITEM,2,93604
FITEM,2,93607
FITEM,2,-93620
FITEM,2,93649
FITEM,2,93652
FITEM,2,-93665
FITEM,2,93694
FITEM,2,-93695
FITEM,2,93700
FITEM,2,-93701
FITEM,2,93706
FITEM,2,-93731
FITEM,2,94512
FITEM,2,94515
FITEM,2,-94527
FITEM,2,94554
FITEM,2,94557
FITEM,2,-94569
FITEM,2,94596
FITEM,2,-94597
FITEM,2,94602
FITEM,2,-94603
FITEM,2,94608
FITEM,2,-94631
FITEM,2,95564
FITEM,2,95567
FITEM,2,-95579
FITEM,2,95606
FITEM,2,95609
FITEM,2,-95621
FITEM,2,95648
FITEM,2,-95649
FITEM,2,95654
FITEM,2,-95655
FITEM,2,95660
FITEM,2,-95683
FITEM,2,96132
FITEM,2,96135
FITEM,2,-96143
FITEM,2,96162
FITEM,2,96165
FITEM,2,-96173
FITEM,2,96192
FITEM,2,-96193
FITEM,2,96198
FITEM,2,-96199
FITEM,2,96204
FITEM,2,-96219
FITEM,2,96772

```

FITEM,2,96775
FITEM,2,-96783
FITEM,2,96802
FITEM,2,96805
FITEM,2,-96813
FITEM,2,96832
FITEM,2,-96833
FITEM,2,96838
FITEM,2,-96839
FITEM,2,96844
FITEM,2,-96859
FITEM,2,97252
FITEM,2,-97296
FITEM,2,97387
FITEM,2,-97431
FITEM,2,97522
FITEM,2,-97611
!*
/GO
D,P51X, , , , , UX, , , , ,
!
!-----
!
! DEFINICIÓN CONTACTO
!
!-----
!
! ZAPATAS MEDIANERÍA - INTERIOR
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
NROPT,UNSYM

```

```
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,517
ASEL,A,,,518
ASEL,A,,,519
ASEL,A,,,520
ASEL,A,,,521
ASEL,A,,,522
CM,_TARGET,AREA
TYPE,2
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,361
ASEL,A,,,362
ASEL,A,,,365
ASEL,A,,,367
ASEL,A,,,368
ASEL,A,,,372
ASEL,A,,,373
ASEL,A,,,374
ASEL,A,,,375
ASEL,A,,,377
ASEL,A,,,379
ASEL,A,,,380
ASEL,A,,,381
ASEL,A,,,385
ASEL,A,,,387
ASEL,A,,,390
ASEL,A,,,391
ASEL,A,,,392
ASEL,A,,,394
ASEL,A,,,395
ASEL,A,,,397
ASEL,A,,,398
ASEL,A,,,403
ASEL,A,,,404
ASEL,A,,,408
ASEL,A,,,409
ASEL,A,,,410
ASEL,A,,,411
ASEL,A,,,413
```

```
ASEL,A,,,415
ASEL,A,,,416
ASEL,A,,,421
ASEL,A,,,422
ASEL,A,,,426
ASEL,A,,,427
ASEL,A,,,428
ASEL,A,,,431
ASEL,A,,,433
ASEL,A,,,434
ASEL,A,,,439
ASEL,A,,,444
ASEL,A,,,445
ASEL,A,,,446
ASEL,A,,,448
ASEL,A,,,449
ASEL,A,,,451
ASEL,A,,,452
ASEL,A,,,454
ASEL,A,,,457
ASEL,A,,,458
ASEL,A,,,460
ASEL,A,,,462
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
```

```

CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
! TERCERA ZAPATA
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,0
NROPT,UNSYM
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,0
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
KEYOPT,4,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,520
ASEL,A,,,523
ASEL,A,,,524
ASEL,A,,,526
ASEL,A,,,527
ASEL,A,,,528
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface

```

```
ASEL,S,,13
ASEL,A,,463
ASEL,A,,464
ASEL,A,,465
ASEL,A,,467
ASEL,A,,469
ASEL,A,,470
ASEL,A,,471
ASEL,A,,475
ASEL,A,,476
ASEL,A,,477
ASEL,A,,480
ASEL,A,,481
ASEL,A,,482
ASEL,A,,485
ASEL,A,,487
ASEL,A,,488
ASEL,A,,493
ASEL,A,,498
ASEL,A,,499
ASEL,A,,500
ASEL,A,,502
ASEL,A,,503
ASEL,A,,505
ASEL,A,,506
ASEL,A,,508
ASEL,A,,511
ASEL,A,,512
ASEL,A,,514
ASEL,A,,516
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
```



```

CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
! ZAHORRA MEDIANERÍA-INTERIOR
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,5
REAL,5
ET,6,170
ET,7,174
R,5,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,7,4,0
KEYOPT,7,5,0
NROPT,UNSYM
KEYOPT,7,7,0
KEYOPT,7,8,0
KEYOPT,7,9,0
KEYOPT,7,10,2
KEYOPT,7,11,0
KEYOPT,7,12,0
KEYOPT,7,2,0
KEYOPT,6,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,361
ASEL,A,,,362
ASEL,A,,,365
ASEL,A,,,367
ASEL,A,,,368
ASEL,A,,,372

```

```
ASEL,A,,,373
ASEL,A,,,374
ASEL,A,,,375
ASEL,A,,,377
ASEL,A,,,379
ASEL,A,,,380
ASEL,A,,,381
ASEL,A,,,385
ASEL,A,,,387
ASEL,A,,,390
ASEL,A,,,391
ASEL,A,,,392
ASEL,A,,,394
ASEL,A,,,395
ASEL,A,,,397
ASEL,A,,,398
ASEL,A,,,403
ASEL,A,,,404
ASEL,A,,,408
ASEL,A,,,409
ASEL,A,,,410
ASEL,A,,,411
ASEL,A,,,413
ASEL,A,,,415
ASEL,A,,,416
ASEL,A,,,421
ASEL,A,,,422
ASEL,A,,,426
ASEL,A,,,427
ASEL,A,,,428
ASEL,A,,,431
ASEL,A,,,433
ASEL,A,,,434
ASEL,A,,,439
ASEL,A,,,444
ASEL,A,,,445
ASEL,A,,,446
ASEL,A,,,448
ASEL,A,,,449
ASEL,A,,,451
ASEL,A,,,452
ASEL,A,,,454
ASEL,A,,,457
ASEL,A,,,458
ASEL,A,,,460
ASEL,A,,,462
CM,_TARGET,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
```

ASEL,S,,19
ASEL,A,,25
ASEL,A,,31
ASEL,A,,88
ASEL,A,,92
ASEL,A,,94
ASEL,A,,95
ASEL,A,,107
ASEL,A,,115
ASEL,A,,119
ASEL,A,,128
ASEL,A,,131
ASEL,A,,140
ASEL,A,,143
ASEL,A,,167
ASEL,A,,175
ASEL,A,,176
ASEL,A,,191
ASEL,A,,195
ASEL,A,,196
ASEL,A,,201
ASEL,A,,203
ASEL,A,,213
ASEL,A,,215
ASEL,A,,227
ASEL,A,,231
ASEL,A,,239
ASEL,A,,244
ASEL,A,,249
ASEL,A,,250
ASEL,A,,261
ASEL,A,,267
ASEL,A,,268
ASEL,A,,279
ASEL,A,,285
ASEL,A,,287
ASEL,A,,292
ASEL,A,,297
ASEL,A,,299
ASEL,A,,303
ASEL,A,,311
ASEL,A,,321
ASEL,A,,322
ASEL,A,,323
ASEL,A,,330
ASEL,A,,342
ASEL,A,,534
ASEL,A,,535
ASEL,A,,538
ASEL,A,,540
ASEL,A,,541
ASEL,A,,545
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,7
NSLA,S,1

```

ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,5
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,5
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
!  ZAHORRA TERCERA ZAPATA
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,6
REAL,6
ET,8,170
ET,9,174
R,6,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,

```

```
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,9,4,0
KEYOPT,9,5,0
NROPT,UNSYM
KEYOPT,9,7,0
KEYOPT,9,8,0
KEYOPT,9,9,0
KEYOPT,9,10,2
KEYOPT,9,11,0
KEYOPT,9,12,0
KEYOPT,9,2,0
KEYOPT,8,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,463
ASEL,A,,,464
ASEL,A,,,465
ASEL,A,,,467
ASEL,A,,,469
ASEL,A,,,470
ASEL,A,,,471
ASEL,A,,,475
ASEL,A,,,476
ASEL,A,,,477
ASEL,A,,,480
ASEL,A,,,481
ASEL,A,,,482
ASEL,A,,,485
ASEL,A,,,487
ASEL,A,,,488
ASEL,A,,,493
ASEL,A,,,498
ASEL,A,,,499
ASEL,A,,,500
ASEL,A,,,502
ASEL,A,,,503
ASEL,A,,,505
ASEL,A,,,506
ASEL,A,,,508
ASEL,A,,,511
ASEL,A,,,512
ASEL,A,,,514
ASEL,A,,,516
CM,_TARGET,AREA
TYPE,8
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,348
ASEL,A,,,354
```

```
ASEL,A,,,360
ASEL,A,,,383
ASEL,A,,,389
ASEL,A,,,393
ASEL,A,,,399
ASEL,A,,,406
ASEL,A,,,407
ASEL,A,,,417
ASEL,A,,,419
ASEL,A,,,425
ASEL,A,,,429
ASEL,A,,,435
ASEL,A,,,441
ASEL,A,,,447
ASEL,A,,,453
ASEL,A,,,473
ASEL,A,,,479
ASEL,A,,,483
ASEL,A,,,491
ASEL,A,,,494
ASEL,A,,,497
ASEL,A,,,501
ASEL,A,,,509
ASEL,A,,,525
ASEL,A,,,529
ASEL,A,,,530
ASEL,A,,,531
ASEL,A,,,533
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,9
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,8
ESEL,A,TYPE,,9
ESEL,R,REAL,,6
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,8
ESEL,A,TYPE,,9
ESEL,R,REAL,,6
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
```

```

CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
! SOLERA MEDIANERÍA-INTERIOR
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,7
REAL,7
ET,10,170
ET,11,174
R,7,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,11,4,0
KEYOPT,11,5,0
NROPT,UNSYM
KEYOPT,11,7,0
KEYOPT,11,8,0
KEYOPT,11,9,0
KEYOPT,11,10,2
KEYOPT,11,11,0
KEYOPT,11,12,0
KEYOPT,11,2,0
KEYOPT,10,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,19
ASEL,A,,,25
ASEL,A,,,31
ASEL,A,,,88
ASEL,A,,,92
ASEL,A,,,94
ASEL,A,,,95
ASEL,A,,,107
ASEL,A,,,115
ASEL,A,,,119

```

```
ASEL,A,,,128
ASEL,A,,,131
ASEL,A,,,140
ASEL,A,,,143
ASEL,A,,,167
ASEL,A,,,175
ASEL,A,,,176
ASEL,A,,,191
ASEL,A,,,195
ASEL,A,,,196
ASEL,A,,,201
ASEL,A,,,203
ASEL,A,,,213
ASEL,A,,,215
ASEL,A,,,227
ASEL,A,,,231
ASEL,A,,,239
ASEL,A,,,244
ASEL,A,,,249
ASEL,A,,,250
ASEL,A,,,261
ASEL,A,,,267
ASEL,A,,,268
ASEL,A,,,279
ASEL,A,,,285
ASEL,A,,,287
ASEL,A,,,292
ASEL,A,,,297
ASEL,A,,,299
ASEL,A,,,303
ASEL,A,,,311
ASEL,A,,,321
ASEL,A,,,322
ASEL,A,,,323
ASEL,A,,,330
ASEL,A,,,342
ASEL,A,,,534
ASEL,A,,,535
ASEL,A,,,538
ASEL,A,,,540
ASEL,A,,,541
ASEL,A,,,545
CM,_TARGET,AREA
TYPE,10
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,104
ASEL,A,,,127
ASEL,A,,,151
ASEL,A,,,187
```


ASEL,A,,,243
ASEL,A,,,251
ASEL,A,,,273
ASEL,A,,,309
ASEL,A,,,315
ASEL,A,,,336
ASEL,A,,,423
ASEL,A,,,437
ASEL,A,,,461
ASEL,A,,,489
ASEL,A,,,537
ASEL,A,,,542
ASEL,A,,,543
ASEL,A,,,547
ASEL,A,,,548
ASEL,A,,,549
ASEL,A,,,550
ASEL,A,,,552
ASEL,A,,,554
ASEL,A,,,555
ASEL,A,,,560
ASEL,A,,,561
ASEL,A,,,563
ASEL,A,,,565
ASEL,A,,,566
ASEL,A,,,567
ASEL,A,,,570
ASEL,A,,,572
ASEL,A,,,573
ASEL,A,,,577
ASEL,A,,,578
ASEL,A,,,579
ASEL,A,,,581
ASEL,A,,,582
ASEL,A,,,584
ASEL,A,,,585
ASEL,A,,,587
ASEL,A,,,590
ASEL,A,,,591
ASEL,A,,,592
ASEL,A,,,593
ASEL,A,,,595
ASEL,A,,,644
ASEL,A,,,645
ASEL,A,,,648
ASEL,A,,,650
ASEL,A,,,651
ASEL,A,,,655
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,11
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL

```

ESEL,S,TYPE,,10
ESEL,A,TYPE,,11
ESEL,R,REAL,,7
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,10
ESEL,A,TYPE,,11
ESEL,R,REAL,,7
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
!  SOLERA TERCERA ZAPATA
!
CM,_TARGET,AREA
!*
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.36
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,8
REAL,8
ET,12,170
ET,13,174
R,8,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,13,4,0
KEYOPT,13,5,0

```

```
NROPT,UNSYM
KEYOPT,13,7,0
KEYOPT,13,8,0
KEYOPT,13,9,0
KEYOPT,13,10,2
KEYOPT,13,11,0
KEYOPT,13,12,0
KEYOPT,13,2,0
KEYOPT,12,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,348
ASEL,A,,,354
ASEL,A,,,360
ASEL,A,,,383
ASEL,A,,,389
ASEL,A,,,393
ASEL,A,,,399
ASEL,A,,,406
ASEL,A,,,407
ASEL,A,,,417
ASEL,A,,,419
ASEL,A,,,425
ASEL,A,,,429
ASEL,A,,,435
ASEL,A,,,441
ASEL,A,,,447
ASEL,A,,,453
ASEL,A,,,473
ASEL,A,,,479
ASEL,A,,,483
ASEL,A,,,491
ASEL,A,,,494
ASEL,A,,,497
ASEL,A,,,501
ASEL,A,,,509
ASEL,A,,,525
ASEL,A,,,529
ASEL,A,,,530
ASEL,A,,,531
ASEL,A,,,533
CM,_TARGET,AREA
TYPE,12
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,596
ASEL,A,,,597
ASEL,A,,,598
ASEL,A,,,600
ASEL,A,,,602
ASEL,A,,,603
```

```
ASEL,A,,,604
ASEL,A,,,608
ASEL,A,,,609
ASEL,A,,,610
ASEL,A,,,611
ASEL,A,,,613
ASEL,A,,,614
ASEL,A,,,615
ASEL,A,,,618
ASEL,A,,,620
ASEL,A,,,621
ASEL,A,,,625
ASEL,A,,,626
ASEL,A,,,627
ASEL,A,,,629
ASEL,A,,,630
ASEL,A,,,632
ASEL,A,,,633
ASEL,A,,,635
ASEL,A,,,638
ASEL,A,,,639
ASEL,A,,,640
ASEL,A,,,641
ASEL,A,,,643
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,13
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,12
ESEL,A,TYPE,,13
ESEL,R,REAL,,8
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,12
ESEL,A,TYPE,,13
ESEL,R,REAL,,8
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
```

```

CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
!-----
!
! CARGAS
!
!-----
!
! DEFINICIÓN GRAVEDAD
!
ACEL,0,0,9.81,
!
! CARGA 1ª PLANTA
!
FLST,2,114,1,ORDE,10
FITEM,2,2399
FITEM,2,2429
FITEM,2,-2456
FITEM,2,6405
FITEM,2,-6432
FITEM,2,9801
FITEM,2,9831
FITEM,2,-9858
FITEM,2,10509
FITEM,2,-10536
!*
/GO
F,P51X,FZ,-1977.8
!
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,2369
FITEM,2,3534
FITEM,2,3540
FITEM,2,4436
!*
/GO
F,P51X,FZ,-988.90
!
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,13501
FITEM,2,-13502
FITEM,2,13981
FITEM,2,-13982
!*
/GO
F,P51X,FZ,-11945
!
! CARGA 2ª PLANTA
!
FLST,2,114,1,ORDE,10
FITEM,2,7065

```

```
FITEM,2,7095
FITEM,2,-7122
FITEM,2,7773
FITEM,2,-7800
FITEM,2,11169
FITEM,2,11199
FITEM,2,-11226
FITEM,2,11877
FITEM,2,-11904
!*
/GO
F,P51X,FZ,-1977.80
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,3086
FITEM,2,3982
FITEM,2,3988
FITEM,2,4884
!*
/GO
F,P51X,FZ,-988.90
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,13661
FITEM,2,-13662
FITEM,2,14141
FITEM,2,-14142
!*
/GO
F,P51X,FZ,-11945
!
! CARGA PLANTA CUBIERTA
!
FLST,2,114,1,ORDE,10
FITEM,2,8433
FITEM,2,8463
FITEM,2,-8490
FITEM,2,9141
FITEM,2,-9168
FITEM,2,12537
FITEM,2,12567
FITEM,2,-12594
FITEM,2,13245
FITEM,2,-13272
!*
/GO
F,P51X,FZ,-1887.39
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,5483
FITEM,2,5687
FITEM,2,5691
FITEM,2,5895
!*
/GO
```

F,P51X,FZ,-943.69
!
FLST,2,4,1,ORDE,4
FITEM,2,13821
FITEM,2,-13822
FITEM,2,14301
FITEM,2,-14302
!*
/GO
F,P51X,FZ,-5607.5
!
ALLSEL,ALL
EPLOT

ANEJO II

**PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN
DEL MATERIAL HORMIGÓN**

ANEJO II

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent
! solver unit system.

! See Solving Units in the help system for more information.

!

!-----

! HORMIGÓN

!-----

!

ET,matid,SOLID65

!

KEYOPT,matid,1,0

KEYOPT,matid,3,2

KEYOPT,matid,5,2

KEYOPT,matid,6,0

KEYOPT,matid,7,1

KEYOPT,matid,8,0

!

!

!-----

! DIAGRAMA TENSIÓN - DEFORMACIÓN

!-----

!

TB,KINH,matid,1,5,0

TBTEMP,0

TBPT,,0.0005,1.094E+007

TBPT,,0.001,1.875E+007

TBPT,,0.0015,2.344E+007

TBPT,,0.002,2.5E+007

TBPT,,0.006,2.55E+007

!

!

!-----

! MODELO DE FRACTURA Y APLASTAMIENTO

!-----

!

TB,CONC,matid,1,9,

TBTEMP,0

TBDATA,,0.3,0.8,2.35E+006,2.5E+007,0,0

TBDATA,,0,0,0.2,,,

!

!

!

!-----

! ADHERENCIA HORMIGÓN ARMADURA

!-----

!

/prep7

allsel,all

cpintf,all,0.01

!

```
!  
!-----  
! CONFIGURACIÓN SOLVER  
!-----  
!  
/solu  
outres,all,all  
nropt,unsym,,on  
neqit,20  
cutcontrol,noshape,1  
!  
!
```