

COMENTARIOS A LA EHE

COMMENTARIES ON THE SPANISH BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE

FRANCISCO GALAN SORALUCE. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesión libre. fgalsor@ciccp.es

RESUMEN: La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) tiene, quizá por la dificultad de los temas, un planteamiento excesivamente matemático, que hace perder el sentido estructural y mecánico de los cálculos, lo que implica, para los que la usamos de manera esporádica, el riesgo de no saber lo que se está haciendo. Además es probable que los planteamientos matemáticos estén establecidos para intervalos determinados fuera de los cuales dan resultados numéricos pero, quizá no estructurales. Ello unido a que, en ocasiones, detectamos resultados chocantes, pone de manifiesto la necesidad de que se incluya en los comentarios referencias a los intervalos de aplicación de las formulaciones.

PALABRAS CLAVE: HORMIGÓN ARMADO, INSTRUCCIÓN HORMIGÓN ESTRUCTURAL, CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

ABSTRACT: The Spanish Building Code Requirements for Structural Concrete (EHE) has an excessively mathematical focus, perhaps due to the complexity of the subject matter, which detracts from the structural and mechanical sense of the calculations and poses the risk that the occasional user will not know exactly what he or she is doing. It is also possible that the mathematical phrasings are established for specific intervals and, once outside these limits, only provide numerical results and not the structural results for the same. On occasions we may obtain surprising results when applying the code and this, together with the aspects indicated above, underlines the need for the inclusion of references in the commentaries to the intervals of application of the formulas.

KEYWORDS: REINFORCED CONCRETE, BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE, CALCULATION OF STRUCTURES.

PLANTEAMIENTO DEL TEMA

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) es el documento técnico con el que se calculan, en España, todas las estructuras de hormigón armado y pretensado. Su aplicación, preceptiva, debe permitir asegurar resultados adecuados en los cálculos que se realicen aplicando sus criterios.

Sin embargo estos criterios son planteamientos matemáticos obtenidos en determinados entornos, fuera de los cuales pueden dar lugar a resultados inadecuados, a veces insuficientes, a veces exagerados.

A continuación voy a exponer algunos de estos casos que he encontrado, en mi limitada utilización de la EHE, y que me crean incertidumbres sobre su aplicación.

La conclusión de todo ello es, a mi entender, que la EHE debiera incluir, en sus comentarios, indicaciones sobre el entorno en que se han obtenido sus determinaciones y referencias a los casos en los que no procede una aplicación literal de los métodos expuestos.

Este planteamiento es importante para usuarios de la EHE, como yo, no especialistas en estructuras, que nos vemos obligados a utilizarla, teniendo necesidad de confiar ciegamente en los resultados obtenidos de su aplicación literal, con el agravante de que el carácter quizá excesivamente matemático de la EHE hace que se desconozca, en muchos apartados, el as-

pecto estructural o mecánico del cálculo que se realiza, teniendo que valorar únicamente el resultado numérico obtenido.

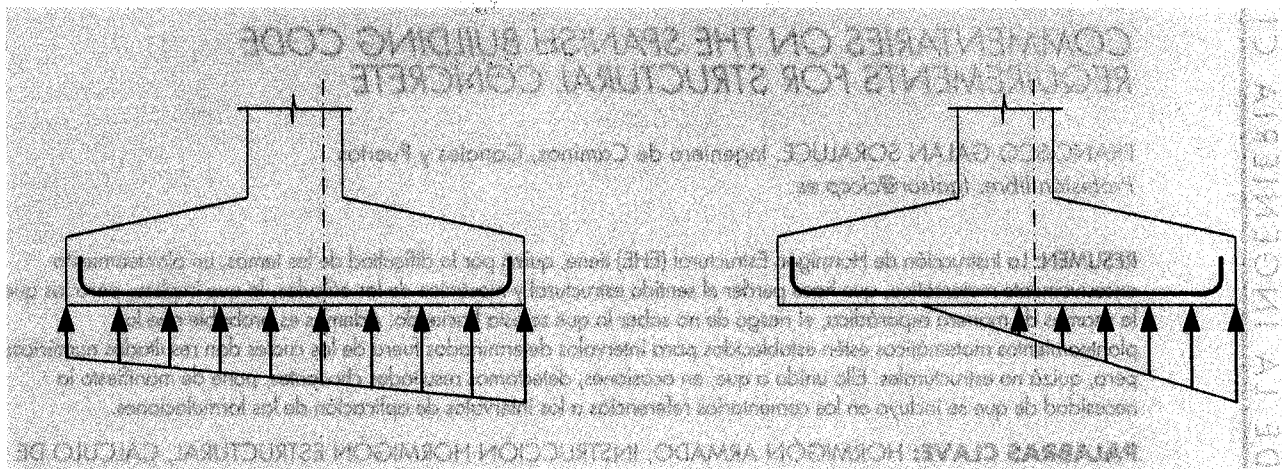
A continuación voy a detallar algunos casos en los que he encontrado resultados, en mi opinión, inadecuados de la aplicación literal de la EHE. No dudo que todos ellos serán de sobra conocidos por los expertos, pero creo que puede ser interesante resaltarlos, a fin de motivar a los responsables de la redacción de la EHE para que incluyan en el texto las observaciones pertinentes.

CÁLCULO DE ZAPATAS FLEXIBLES

El método normal de cálculo de zapatas flexibles se basa en determinar, en la sección de referencia, el momento flector M_f producido por las tensiones de reacción del terreno, calculadas para los esfuerzos, fuerza y momento (N y M), actuantes en la base de la zapata. Como es usual se arma la sección para el momento de cálculo M_{fd} obtenido mayorando el M_f en base al coeficiente de mayoración de acciones ($M_{fd} = g_G M_f$).

La ley de tensiones de reacción del terreno puede ser trapezoidal o triangular, según sea la relación de M a N.

Además de armar la zapata, el cálculo nos permite comprobar que las tensiones máximas σ_{max} son admisibles por el terreno.



En la mayoría de los casos este método da resultados adecuados, pero tiene el inconveniente de que la mayoración realizada se aplica del mismo modo a N y M , lo que en caso de fuerzas horizontales importantes puede no ser correcto.

En algunas estructuras sometidas a grandes fuerzas de viento, puede aumentar M muy apreciablemente sin que apenas varíe N . Ello puede suponer que la ley de tensiones, en la situación extrema, pase, de trapezoidal a triangular, que $\sigma_{\max}$ aumente extraordinariamente, que el momento M_{fd}' de cálculo de las armaduras, determinado en base a las reacciones de la situación de esfuerzos N y $g_G M$, sea superior al M_{fd} calculado mayorando el M_f , e incluso que se produzca el vuelco del pilar y la zapata.

En el siguiente cuadro se resumen los resultados de cálculos de dos zapatas, cuyo detalle figura en el Anejo nº 1. En la parte izquierda se opera del modo habitual y en la derecha mayorando el momento, es decir sustituyendo M por $g_G M$. Figuran los cálculos de dos zapatas cuadradas, de 2,60 y 10,00 m de lado, sometidas, cada una, al mismo esfuerzo axial y diferentes momentos.

En los dos primeros casos el método habitual proporciona resultados correctos, el momento de cálculo M_{fd} es superior al M_{fd}' y las tensiones en la hipótesis de operar con el momento mayorado no son muy superiores a las correspondientes a los esfuerzos N y M . En cambio en el tercer caso la tensión máxima en el terreno es elevadísima (4.055 kN/m²) y podría producir el colapso de la cimentación.

En todos los casos de la segunda zapata, vemos que al hacer el cálculo con el momento mayorado, aumentan muy apreciablemente las tensiones máximas en el terreno y también el momento de cálculo M_{fd}' . Se pasa de tensiones máximas admisibles a valores que producirán el hundimiento de la zapata.

Este resultado aconseja, en mi opinión, que la EHE incluya en sus comentarios que cuando los esfuerzos de viento

puedan hacer aumentar el momento sin apenas alterar el axil se calcule la ley de tensiones en el terreno y el armado de la zapata para la hipótesis N y $g_G M$.

CUANTÍAS MÍNIMAS EN FLEXIÓN

La EHE establece dos criterios de cuantías mínimas. El primero de ellos (art. 42.3.2) establece que la armadura resistente traccionada debe cumplir:

$$A_s f_{yd} \geq 0,25 W_1 / h f_{cd}$$

Siendo:

- A_s Área de la armadura pasiva
- f_{yd} Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción
- W_1 Módulo resistente de la sección bruta relativo a la fibra más traccionada
- h Canto total de la sección
- f_{cd} Resistencia de cálculo del hormigón en compresión

Como se indica en los comentarios el objeto de esta cuantía es asegurar que se disponga armadura suficiente para poder resistir la transmisión de esfuerzos en el momento en que el hormigón se fisura.

Este planteamiento parece razonable y es indudable que en los casos normales de vigas, para los que seguramente estará pensado, es muy adecuado. Sin embargo hay casos de grandes zapatas flexibles, en los que el dimensionado lo condiciona no la resistencia sino el peso necesario para asegurar la estabilidad, en los que no parece que deba ser un condicionante vinculante. Si el momento de vuelco aumenta por encima de lo previsto la zapata producirá el colapso del terreno de apoyo o volcará, sin que un armado adicional suponga cambiar las condiciones de la rotura. El segundo criterio de

RESUMEN DE CÁLCULO DE ZAPATA

FOLIO 1

Lado m	Cálculo con esfuerzos sin mayorar						Cálculo con momento mayorado						Relación tensiones máximas	Relación momentos MEd'/MEd
	Axil kN	Momento kNm	Tensiones en el terreno			Momento de cálculo MEd kNm	Axil kN	Momento kNm	Tensiones en el terreno			Momento de cálculo MEd' kNm		
			mínima kN/m²	máxima kN/m²	actúan en m				mínima kN/m²	máxima kN/m²	actúan en m			
2,60	635	50	77	111	2,60	296	635	80	67	121	2,60	198	1,09	0,67
2,60	635	300	0	197	2,48	465	635	480	0	299	1,63	399	1,52	0,86
2,60	635	500	0	318	1,54	665	635	800	0	4.055	0,12	711	12,75	1,07
10,00	5.700	16.000	0	173	6,58	13.970	5.700	25.600	0	747	1,53	17.050	4,32	1,22
10,00	5.700	17.000	0	188	6,05	14.900	5.700	27.200	0	1.666	0,68	18.650	8,86	1,25
10,00	5.700	17.700	0	201	5,68	15.620	5.700	28.320	0	12.033	0,09	19.770	59,87	1,27

cuantías mínimas lo establece la tabla 42.3.5 de la EHE, en que se fijan % de cuantías de acero para diferentes elementos estructurales. Como en el caso anterior los valores fijados pueden ser razonables para elementos dimensionados en función de los esfuerzos actuantes, sin embargo en, por ejemplo, obras hidráulicas es frecuente que el dimensionado lo condicione el peso o incluso el aspecto estético, con elementos de grandes dimensiones en los que los esfuerzos son muy reducidos. ¿Tiene sentido, en estos casos aplicar uno y otro criterios de cuantías mínimas? o se está fuera del entorno para el que se fijaron, de modo vinculante, en la EHE.

Un ejemplo de estos casos puede ser el muro lateral del aliviadero de una presa. La carga de agua es de 1,00 m y con un canto de 0,50 m se puede asegurar un armado correcto. Sin embargo, por razones estéticas, se decide construir un muro de 1,20 m de canto. ¿Qué sentido tienen, en ese caso, las cuantías mínimas? Se debe colocar el 3,2 % de 1,20 m o basta con considerar el canto razonable de 0,50 m? Otro tanto podríamos decir del primer criterio de cuantía mínima.

Sería deseable que en los comentarios de la EHE se indiquen respuestas a problemas de este tipo ya que, de aplicar el texto literalmente, se pueden dar lugar a armados muy superiores a los necesarios, con el costo consiguiente, y sin que se traduzcan en ningún aumento de la seguridad.

RESISTENCIA DEL HORMIGÓN AL CORTANTE

La contribución del hormigón al cortante se establece (comentarios al art. 44.2.3.2.2) como

$$V_{cu} = 0,10 \xi (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} b_0 d$$

Siendo:

$$x = 1 + \sqrt{200/d}, \text{ d en mm}$$

ρ_l Cuantía geométrica de la armadura longitudinal

f_{ck} Resistencia de proyecto del hormigón a compresión

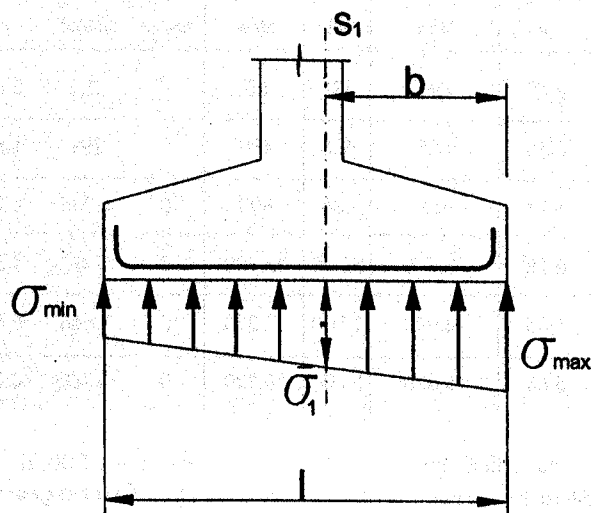
Para una misma cuantía ρ_l y resistencia de hormigón f_{ck} , la tensión resistente del hormigón a cortante (V_{cu}/b_0d) es función lineal de x . Para diferentes cantos se obtiene la relación siguiente

d	ξ
200	2,00
300	1,82
400	1,71
500	1,63
600	1,58
700	1,53
800	1,50
900	1,47
1000	1,45
1100	1,43
1200	1,41
1300	1,39
1400	1,38
1500	1,37

¿Es correcta esta extrapolación? Las vigas de 1500 mm de canto aguantan a cortante una tensión $2/1,37 = 0,68$ de las de 200 mm? o hay un entorno de valores de d , por encima de los cuales la reducción de resistencia del hormigón a cortante deja de tener realidad estructural. Este es un caso claro en el que el planteamiento matemático puede tener un entorno de aplicación que convendría se indicase.

ANEJO 1

Ley trapezoidal de tensiones



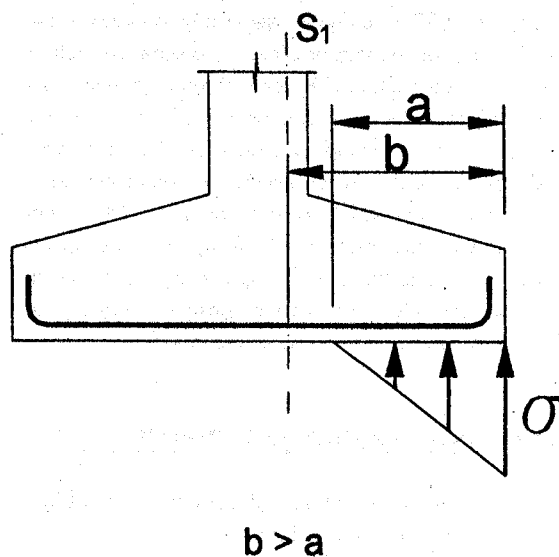
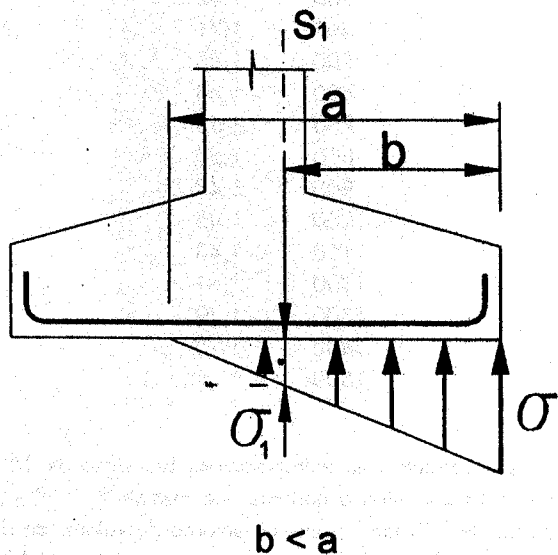
$$\sigma_{\max} = N/l + M/w$$

$$\sigma_{\min} = N/l - M/w$$

$$\text{Tensión en la sección de referencia } \sigma_1 = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (l - b)/l$$

$$\text{Momento en la sección de referencia } M_f = s_1 b^2 l/2 + (s_{\max} - s_{\min}) b^2 l/3$$

Ley triangular de tensiones



El equilibrio de sistemas de vectores supone:

$$N = a \alpha / 2 l$$

$$e = M/N = l/2 - a/3$$

$$\text{Deduciéndose } a = 3(l/2 - e)$$

$$\alpha = 2N/(l a)$$

Momento en la sección de referencia

Si $b < a$

Tensión en la sección de referencia $\sigma_1 = \sigma + (a-b)/a$

Momento

$$M_f = \sigma_1 b^2 l/2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 l/3$$

Si $b > a$

Momento

$$M_f = a \alpha / 2 (b + a/3) l$$

COMPARACIÓN ENTRE TENSIONES DE UNA ZAPATA CUADRADA MAYORANDO LOS RESULTADOS DE CONDICIONES NORMALES Y MAYORANDO EL MOMENTO

Dimensiones de la zapata

Lado l **2,60 m**

Esfuerzos sobre terreno datos

Axil N **635 kN**

Momento M **50 kNm**

Coefficiente **1,6**

Ley triangular

Ley trapezoidal

Reacciones con esfuerzos sin mayorar

Reacciones con esfuerzos sin mayorar

Excentricidad $e = M/N$ **0,08 m**

Excentricidad $e = M/N$ **0,08 m**

Ámbito de aplicación $e > l/6$ **0,43 m**

Ámbito de aplicación $e \leq l/6$ **0,43 m**

Longitud de reacción $a = 3(l/2 - e)$ **1,11 m**

Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l + M/W$ **111 kN/m²**

Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l a)$ **111 kN/m²**

Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l - M/W$ **77 kN/m²**

kg/cm²

siendo $W = l^3/6$ **2,93 m³**

Distancia de sección de referencia

Distancia de sección de referencia

al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

Momento de tensiones en b

Momento de tensiones en b

$b > a$ $M_r = a l a/2 (b - a/3)$ **185 kNm**

$M_f = \sigma_1 b^2 l/2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 l/3$ **185 kNm**

$b < a$ $M_r = \sigma_1 b^2 l/2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 l/3$ **96 kNm**

siendo $\sigma_1 = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (l - b)/l$ **96 kNm**

siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$ **296 kNm**

Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ **296 kNm**

Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ **635,000**

635,000

Reacciones con esfuerzos mayorados

Reacciones con esfuerzos mayorados

Excentricidad $e_d = M_d/N$ **0,13 m**

Excentricidad $e_d = M_d/N$ **0,13 m**

Longitud de reacción $a = 3(l/2 - e_d)$ **1,11 m**

Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l + M_d/W$ **121 kN/m²**

Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l a)$ **121 kN/m²**

Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l - M_d/W$ **67 kN/m²**

kg/cm²

siendo $W = l^3/6$ **2,93 m³**

Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata	b	1,16	m	Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata	b	1,16	m
Momento de tensiones en b				Momento de tensiones en b			
$b > a$	$M_{rd}' = a \sigma / 2 (b - a/3)$		kNm	$M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 / 3$	198		kNm
$b < a$	$M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 / 3$			siendo $\sigma_1 = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (l - b) / l$	97		kN/m ²
siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$			kN/m ²	Relación M_{rd}' / M_{rd}	0,67		
Relación M_{rd}' / M_{rd}							

Dimensiones de la zapataLado l **2,60 m****Esfuerzos sobre terreno datos**

Axil N **635 kN**
 Momento M **300 kNm**
 Coeficiente **1,6**

Ley triangular**Reacciones con esfuerzos sin mayorar**

Excentricidad $e = M/N$ 0,47 m
 Ambito de aplicación $e > l/6$ 0,43 m
 Longitud de reacción $a = 3 (l/2 - e)$ 2,48 m
 Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l \cdot a)$ 197 kN/m²
 1,97 kg/cm²

Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

Momento de tensiones en b
 $b > a$ $M_r = a | \sigma / 2 (b - a/3)$ 291 kNm
 $b < a$ $M_r = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 / 3$
 siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$ 105 kN/m²
 Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ 465 kNm

Reacciones con esfuerzos mayorados

Excentricidad $e_d = M_d/N$ 0,76 m
 Longitud de reacción $a = 3 (l/2 - e_d)$ 1,63 m
 Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l \cdot a)$ 299 kN/m²
 2,99 kg/cm²

Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

Momento de tensiones en b
 $b > a$ $M_{rd}' = a | \sigma / 2 (b - a/3)$ 399 kNm
 $b < a$ $M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 / 3$
 siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$ 87 kN/m²
 Relación M_{rd}' / M_{rd} 0,86

Ley trapezoidal**Reacciones con esfuerzos sin mayorar**

Excentricidad $e = M/N$ 0,47 m
 Ambito de aplicación $e \leq l/6$ 0,43 m
 Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l^2 + M/W$ kN/m²
 Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l^2 - M/W$ kN/m²
 siendo $W = l^3/6$ m³

Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

Momento de tensiones en b
 $M_r = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 / 3$ kNm
 siendo $s_1 = s_{\min} + (s_{\max} - s_{\min}) (l - b) / l$ kN/m²
 Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ kNm
 635,000

Reacciones con esfuerzos mayorados

Excentricidad $e_d = M_d/N$ 0,76 m
 Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l^2 + M_d/W$ kN/m²
 Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l^2 - M_d/W$ kN/m²
 siendo $W = l^3/6$ m³

Distancia de sección de referencia al borde exterior de la zapata b **1,16 m**

Momento de tensiones en b
 $M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 / 3$ kNm
 siendo $s_1 = s_{\min} + (s_{\max} - s_{\min}) (l - b) / l$ kN/m²
 Relación M_{rd}' / M_{rd}

Dimensiones de la zapataLado l **10,00 m****Esfuerzos sobre terreno datos**

Axil N **5.700 kN**
 Momento M **17.700 kNm**
 Coeficiente **1,6**

Ley triangular**Reacciones con esfuerzos sin mayorar**

Excentricidad $e = M/N$ 3,11 m
 Ambito de aplicación $e > l/6$ 1,67 m
 Longitud de reacción $a = 3(l/2 - e)$ 5,68 m
 Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l \cdot a)$ 201 kN/m²
 2,01 kg/cm²

Distancia de sección de referencia
 al borde exterior de la zapata b **3,50 m**

Momento de tensiones en b
 $b > a$ $M_r = a l \sigma / 2 (b - a/3)$ 9.763 kNm
 $b < a$ $M_r = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 / 3$
 siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$ 77 kN/m²
 Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ 15.620 kNm

Reacciones con esfuerzos mayorados

Excentricidad $e_d = M_d/N$ 4,97 m
 Longitud de reacción $a = 3(l/2 - e_d)$ 0,09 m
 Tensión máxima triangular $\sigma = 2N/(l \cdot a)$ 12.033 kN/m²
 120,33 kg/cm²

Distancia de sección de referencia
 al borde exterior de la zapata b 3,50 m

Momento de tensiones en b
 $b > a$ $M_{rd}' = a l \sigma / 2 (b - a/3)$ 19.770 kNm
 $b < a$ $M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma - \sigma_1) b^2 / 3$
 siendo $\sigma_1 = \sigma (a-b)/a$ kN/m²
 Relación M_{rd}'/M_{rd} 1,27

Ley trapezoidal**Reacciones con esfuerzos sin mayorar**

Excentricidad $e = M/N$ 3,11 m
 Ambito de aplicación $e \leq l/6$ 1,67 m
 Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l^2 + M/W$ kN/m²
 Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l^2 - M/W$ kN/m²
 siendo $W = l^3/6$ m³

Distancia de sección de referencia
 al borde exterior de la zapata b **3,50 m**

Momento de tensiones en b
 $M_r = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 / 3$ kNm
 siendo $\sigma_1 = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (l-b)/l$ kN/m²
 Momento mayorado $M_{rd} = c M_r$ kNm
 5.700,000

Reacciones con esfuerzos mayorados

Excentricidad $e_d = M_d/N$ 4,97 m
 Tensión máxima trapezoidal $\sigma_{\max} = N/l^2 + M_d/W$ kN/m²
 Tensión mínima trapezoidal $\sigma_{\min} = N/l^2 - M_d/W$ kN/m²
 siendo $W = l^3/6$ m³

Distancia de sección de referencia
 al borde exterior de la zapata b 3,50 m

Momento de tensiones en b
 $M_{rd}' = \sigma_1 b^2 / 2 + (\sigma_{\max} - \sigma_1) b^2 / 3$ kNm
 siendo $\sigma_1 = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (l-b)/l$ kN/m²
 Relación M_{rd}'/M_{rd}

REFERENCIAS

INSTRUCCIÓN HORMIGÓN ESTRUCTURAL