

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

CIMENTACIONES

DISEÑO, ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE UNA ZAPATA COMBINADA

PROFESOR:

MSc. Carlos Celi

Estudiantes:

Germán Caicedo

Alejandro Villa

Octavo Nivel

Paralelo 1

Fecha de Entrega:

04 de Diciembre de 2018

1. Introducción.....	3
2. Diseño	3
2.1. Cargas y Momentos.....	3
2.2. Dimensionamiento Inicial	4
3. Análisis del Elemento	7
3.1. Resolución como un Marco Plano.....	7
4. Determinación de la altura de la zapata.....	13
5. Dimensionamiento de la zapata:	17
6. Modelación del suelo en SAP	18
6.1. Primer modelo	20
6.2. Segundo modelo.....	24
6.3. Tercer Modelo	26
6.4. Cuarto Modelo.....	27
6.5. Quinto Modelo	32
6.6. Sexto Modelo.....	34
7. Armado de la Cimentación.....	39
8. Conclusiones	42

Zapatas Combinadas

1. Introducción

Es conveniente el empleo de zapatas combinadas cuando ante la alternativa de plintos aislados, éstos se encuentran ubicados muy cerca y por este motivo sus bulbos de presión y/o sus áreas físicamente se conectan.

En el presente trabajo se describirá a detalle el diseño de una zapata combinada de base rectangular. Se desprecia el peso propio del elemento y el peso del relleno, inicialmente. Para el presente trabajo no se considera una distribución uniforme de esfuerzos dado que las cargas que actúan sobre las columnas, así como los momentos que actúan en estas no son iguales.

2. Diseño

Se diseñará una zapata combinada de base rectangular, para lo cual se tienen como premisas que la resistencia del hormigón a la compresión a los 28 días es $f'c = 210 \frac{kg}{cm^2}$, se utilizará varillas de acero corrugado grado 60, $f_y = 4200 \frac{kg}{cm^2}$, y se conoce que el suelo posee una capacidad admisible $q_a = 1 \frac{kg}{cm^2}$.

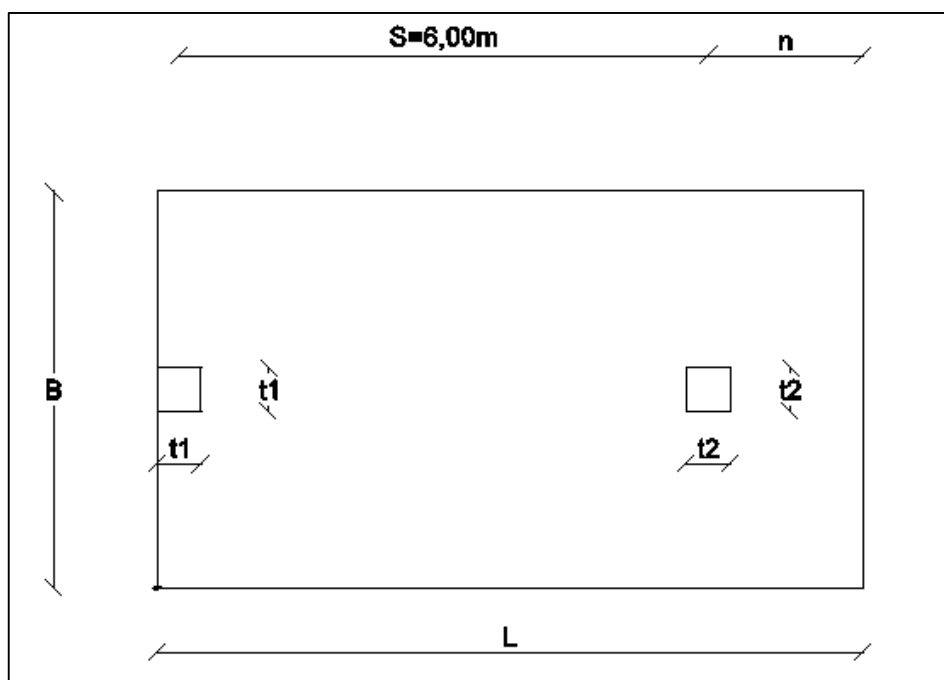


Figura 1. Esquema Referencial de la Zapata Combinada

2.1. Cargas y Momentos

Para la cimentación en cuestión se tiene como dato que llegan a los cuellos de columnas las siguientes acciones:

Col. No.	Dim. (t x t)	P_L (t)	P_D (t)	M_L (t·m)	M_D (t·m)
1	50x50	40	90	15	25
2	50x50	70	95	0	0

Tabla 1. Cargas y Momentos

Sumando dichas cargas entre sí se obtiene:

$$P_1 = P_{L1} + P_{D1} = 40 + 90 = 130 \text{ t.}$$

$$P_2 = P_{L2} + P_{D2} = 70 + 95 = 165 \text{ t.}$$

$$M_1 = M_{L1} + M_{D1} = 15 + 25 = 40 \text{ t} \cdot \text{m.}$$

$$M_2 = 0 \text{ t} \cdot \text{m.}$$

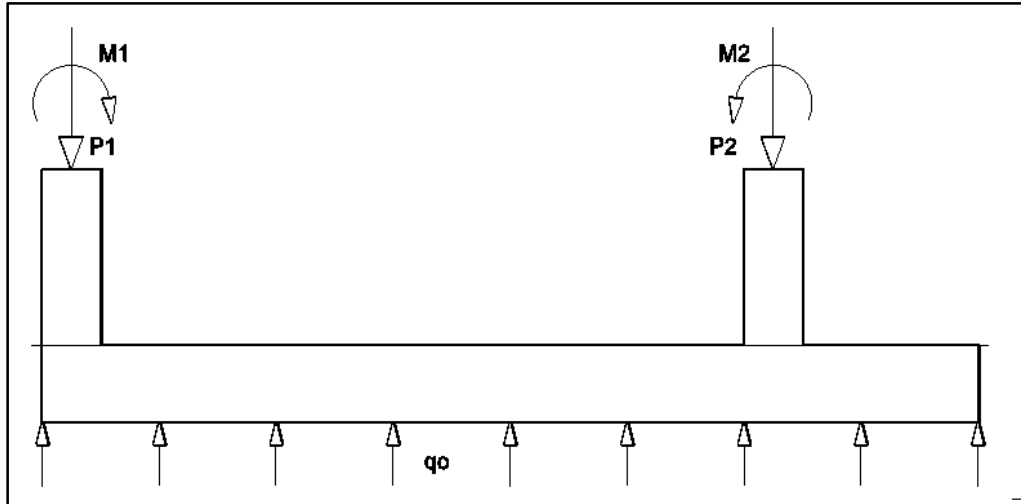


Figura 2. Esquema de las Cargas sobre la Zapata Combinada

2.2. Dimensionamiento Inicial

Se supone de forma preliminar y con motivos prácticos la premisa de que la reacción del suelo debido al contacto con el cimiento es uniforme, en la realidad no es así debido a que el suelo no es un material homogéneo bajo la zapata.

La reacción por unidad de área, conocida como presión de contacto será igual al esfuerzo conjunto debido a la carga de la estructura misma, del plinto y del relleno, sin embargo, se ha obviado los dos últimos debido a que se los desconoce y estimarlos no sería posible al nivel de profundidad que tiene el diseño actualmente. Lo que si se sabe es que la suma de todos estos será necesariamente menor a la capacidad admisible del suelo, de otra manera no sería seguro cimentar. Por tanto:

$$q_0 = q_{edif} + q_{rell} + q_{plinto} \leq qa = 1 \frac{kg}{cm^2} = 10 \frac{t}{m^2}$$

Como se explicó, no se considerarán las cargas debido al relleno y al peso propio del plinto, y se considerará que el suelo podría estar trabajando al límite por lo cual la presión de contacto se considera igual a la capacidad admisible del suelo:

$$q_0 = q_{edif} = 10 \frac{t}{m^2}$$

Se plantea el equilibrio de fuerzas verticales en la cimentación:

$$\sum F_y = 0$$

$$R = P_1 + P_2 = 130 + 165$$

$$R = 295 \text{ t}$$

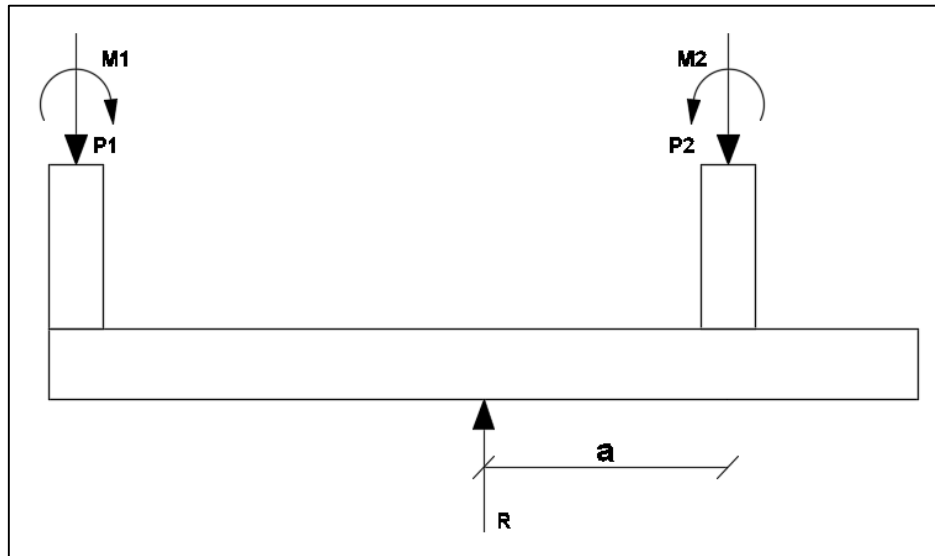


Figura 3. Fuerzas actuantes verticales

Por lo tanto, para que la carga pueda repartirse adecuadamente sin exceder la capacidad admisible, el área mínima que se requiere es:

$$A \geq \frac{R}{q_n} = 29,5m^2$$

Dado que la dimensión “n” es desconocida, se recurre a un sistema virtual de fuerzas a partir de la resultante $R = q_n \cdot A$. Como sigue a continuación:

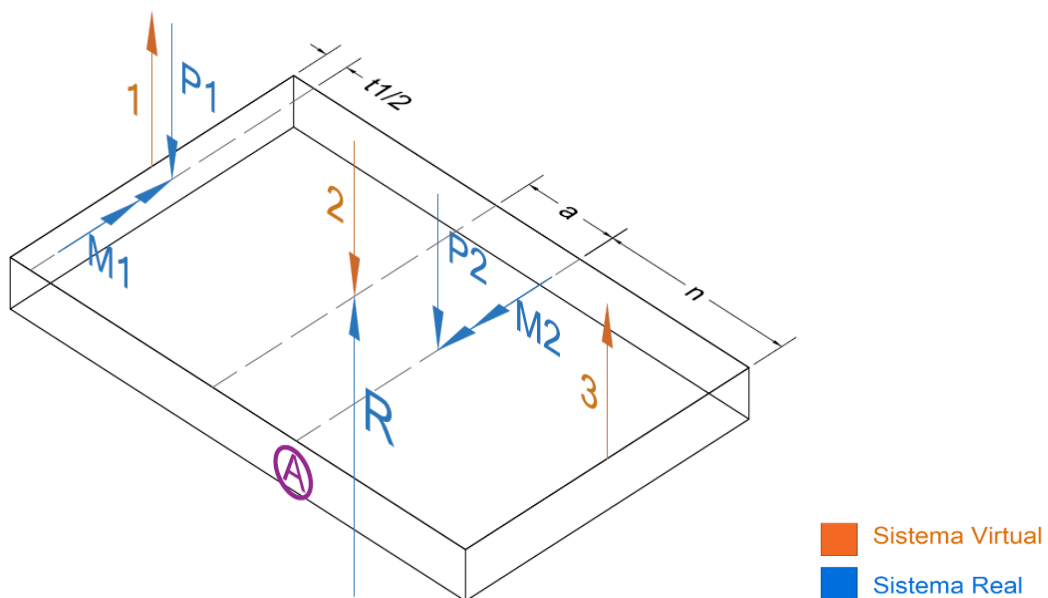


Figura 4. Sistemas Real y Virtual

Estos vectores virtuales $\vec{1}$, $\vec{2}$ y $\vec{3}$ producen los mismos efectos que la resultante del esfuerzo de contacto:

$$R = \vec{1} = \vec{2} = \vec{3} = q_n * A$$

Por ende, los momentos que deben producir estos vectores de cargas virtuales deben generar el mismo momento que la resultante, al igualar los dos sistemas, los momentos por esta fuerza respecto al eje A de la zapata (eje en la segunda columna) quedan:

$$R \cdot a = q_n \cdot A \left[\left(s + \frac{t_1}{2} \right) - a - n \right]$$

Ecuación No. 1

Al plantear el equilibrio de momentos de todas las cargas con el fin de determinar la distancia a con respecto al eje A de la zapata se tiene:

$$\sum M_A = 0$$

$$P_1 \cdot s - M_1 + M_2 - R \cdot a = 0$$

Ecuación No. 2

$$a = \frac{P_1 \cdot s - M_1 + M_2}{R} = \frac{130 \cdot 6 - 40 + 0}{295}$$

$$a = 2,51m$$

Al reemplazar $R \cdot a$ de la ecuación No. 1 en la ecuación No. 2, se determina la distancia n:

$$\sum M_A = 0$$

$$-q_n \cdot A \cdot \left(s + \frac{t_1}{2} \right) + p_1 \cdot s + q_n \cdot A_n - M_1 + M_2 + q_n \cdot A \cdot a = 0$$

$$n = \frac{[q_n \cdot A \left(-a + s + \frac{t_1}{2} \right) - P_1 \cdot s + M_1 - M_2]}{q_n \cdot A}$$

$$n = 1,23m$$

Comprobando el resultado en la ecuación No. 1:

$$(295)(2,51) = (10)(29,5)[6,25 - 2,51 - 1,23]$$

$$740,45 = 740,45 \quad \text{OK}$$

Con estos valores de “a” y “n”, se definen las dimensiones de la zapata:

$$L_{calculado} = \frac{t_1}{2} + s + n = 7,48m$$

$$L_{asumido} = 7,50m \Rightarrow n_{recalculado} = 1,25m$$

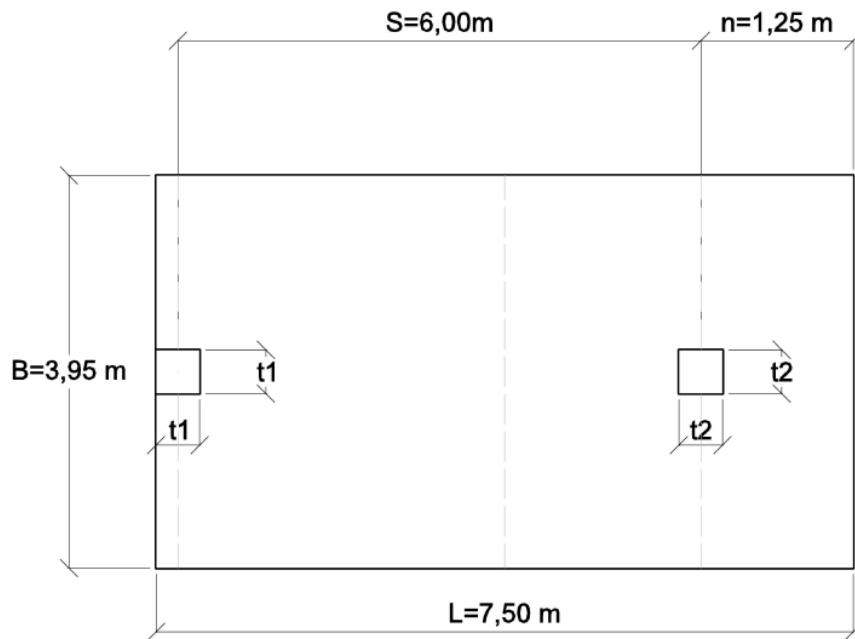
A partir de la longitud y el área ya conocidas se puede determinar el valor de la dimensión de la base B:

$$A = 29,5m^2$$

$$B_{calculado} = \frac{A}{L} = 3,93m$$

$$B_{asumido} = 3,95m$$

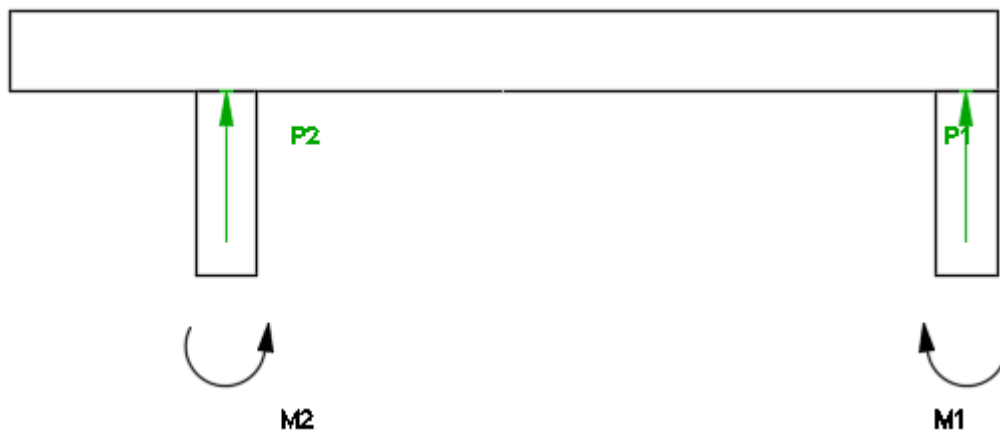
Por lo tanto, las dimensiones preliminares que se tienen para la zapata combinada son las siguientes:



3. Análisis del Elemento

3.1. Resolución como un Marco Plano

La metodología con la que se está analizando y diseñando la presente cimentación no considera el efecto que produce el suelo sobre la zapata para aliviar la flexión en el hormigón, además, la zapata combinada puede ser supuesta como un pórtico plano, donde el plinto combinado puede suponerse como una viga apoyada sobre tantas articulaciones como uniones con columnas tenga. Estos nodos se considerarán rígidos debido al aporte de las columnas en la unión con la cimentación. Se deberá considerar además como restringido lateralmente debido a la acción de confinamiento del suelo. Para efectos didácticos se visualiza de la siguiente manera:



Se utilizan las condiciones pseudo-últimas de carga sobre la estructura para el análisis, debido a que, aunque se desprecia inicialmente el peso del relleno y del plinto, se debe de considerar de alguna manera el efecto de éstos y se debe mayorar la carga sobre la zapata.

$$P_{U1} = 1,2D_1 + 1,6L_1 = 172t$$

$$P_{U2} = 1,2D_2 + 1,6L_2 = 226t$$

$$M_{u1} = 54t \cdot m$$

$$M_{u2} = 0t \cdot m$$

Estas cargas mayoradas se deben de distribuir sobre las dimensiones de la zapata que se han definido en la sección anterior, de lo que se obtiene el esfuerzo de contacto pseudo-último:

$$q_{su} = \frac{398t}{(3,95)(7,50)m^2} = 13.43 \text{ t/m}^2$$

Para el análisis de la cimentación como un marco plano se transforma este esfuerzo en una carga distribuida a lo largo de L :

$$w = (13,43)(3,95) = 53,05 \text{ t/m}$$

Para resolver este marco se ha considerado simplificar el modelo del marco plano a una viga, la misma que es hiperestática, pero para un proceso más simplificado se considerará un modelo aún más simple, añadiendo los efectos de los momentos que se producen en los volados que producen la indeterminación:

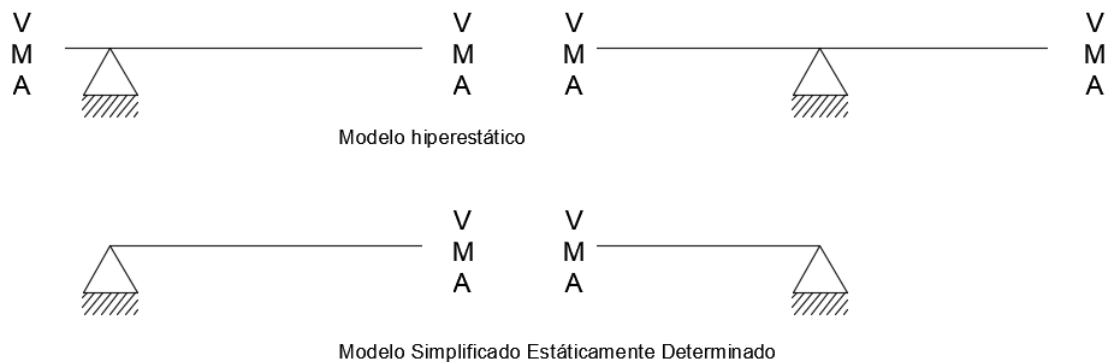


Figura 5. Modelos Considerados

Se analizará como una viga a partir de este punto a través de un script de Matlab, el cual resuelve la viga mediante el método de la rigidez. Éste trabaja a partir de las siguientes tablas de datos:

Tabla de Coordenadas: a través de la cual se define la geometría de la estructura, para el caso de la viga. Se ha definido un nudo intermedio en 3.25 m a partir de la columna de la izquierda con el fin de poder obtener los resultados del momento en dicho punto.

Tabla de Apoyos: a través de la cual se definen que nudos están o no restringidos.

Tabla de Conectividad: A través de la cual se define de qué nudo a qué nudo va cada barra, en este caso los dos volados y los dos tramos intermedios en los que se ha dividido, para efecto del uso del programa, a la viga. Además, en ésta se incluye el área, inercia y módulo de elasticidad E de cada barra.

Tabla de Cargas de Vano: A través de la cual se definen las cargas distribuidas en el caso de la viga, la carga lineal de 53,05 t/m.

A través de estas tablas se define el grado de indeterminación cinemática de la viga, el cual es de 11. Tres desplazamientos en cada volado (6), dos giros en las uniones con las columnas y 3 desplazamientos posibles en el nudo adicional creado en el vano entre columnas.

Se determinan las matrices de rigidez de cada elemento en sus respectivos sistemas locales:

Cabe aclarar que, aunque se definen las áreas, inercias y el módulo de elasticidad, se han dado valores que no corresponden precisamente a la sección de la cimentación, sin embargo, se ha hecho esto porque lo que se busca en sí son las acciones en puntos específicos, y en las expresiones utilizadas para este efecto se simplifican los términos de Inercia, módulo de elasticidad y área. Por lo tanto, las siguientes matrices son para mera constancia de que se ha utilizado el script mencionado.

La matriz de rigidez elemental que se ha utilizado es la siguiente:

$$[ke]_L = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & -AE/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L \\ -AE/L & 0 & 0 & AE/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix}$$

Las matrices ke_{L1} y ke_{L2} :

```
val(:, :, 1) =

    9000000      0      0   -9000000      0      0
      0    2256000    282000      0   -2256000    282000
      0    282000     47000      0   -282000     23500
   -9000000      0      0    9000000      0      0
      0   -2256000   -282000      0    2256000   -282000
      0    282000     23500      0   -282000     47000

val(:, :, 2) =

    1.0e+05 *

    7.5000      0      0   -7.5000      0      0
      0    0.0131    0.0196      0   -0.0131    0.0196
      0    0.0196    0.0392      0   -0.0196    0.0196
   -7.5000      0      0    7.5000      0      0
      0   -0.0131   -0.0196      0    0.0131   -0.0196
      0    0.0196    0.0196      0   -0.0196    0.0392
```

Las matrices ke_{L3} y ke_{L4} :

```
val(:, :, 3) =

    1.0e+05 *

    7.5000      0      0   -7.5000      0      0
      0    0.0131    0.0196      0   -0.0131    0.0196
      0    0.0196    0.0392      0   -0.0196    0.0196
   -7.5000      0      0    7.5000      0      0
      0   -0.0131   -0.0196      0    0.0131   -0.0196
      0    0.0196    0.0196      0   -0.0196    0.0392
```

```

val(:, :, 4) =
    18000000         0         0   -18000000         0         0
         0      18048      11280         0     -18048      11280
         0      11280       9400         0     -11280       4700
   -18000000         0         0    18000000         0         0
         0     -18048     -11280         0      18048     -11280
         0      11280       4700         0     -11280       9400

```

A partir de estas matrices de rigidez de cada elemento en sus sistemas locales se obtiene la matriz de rigidez de cada elemento en el sistema global a través de la siguiente expresión:

$$[k_e]_G = [T][k_e]_L[T]^T$$

Donde la matriz T es la matriz de rotación expresada por la siguiente matriz, general para todos los elementos:

$$[T]^T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde el ángulo θ en este caso sería igual a 0 para todos los elementos dado que es una viga.

Así, se obtienen las siguientes matrices $[k_e]_{G1}$, $[k_e]_{G2}$, $[k_e]_{G3}$, $[k_e]_{G4}$, respectivamente:

```

val(:, :, 1) =
    90000000         0         0   -90000000         0         0
         0      2256000      282000         0     -2256000      282000
         0      282000       47000         0     -282000       23500
   -90000000         0         0    90000000         0         0
         0     -2256000     -282000         0      2256000     -282000
         0      282000       23500         0     -282000       47000

```

```

val(:, :, 2) =
    1.0e+05 *
    7.5000         0         0   -7.5000         0         0
         0      0.0131      0.0196         0     -0.0131      0.0196
         0      0.0196      0.0392         0     -0.0196      0.0196
   -7.5000         0         0    7.5000         0         0
         0     -0.0131     -0.0196         0      0.0131     -0.0196
         0      0.0196      0.0196         0     -0.0196      0.0392

```

```

val(:, :, 3) =
    1.0e+05 *
    7.5000         0         0   -7.5000         0         0
         0      0.0131      0.0196         0     -0.0131      0.0196
         0      0.0196      0.0392         0     -0.0196      0.0196
   -7.5000         0         0    7.5000         0         0
         0     -0.0131     -0.0196         0      0.0131     -0.0196
         0      0.0196      0.0196         0     -0.0196      0.0392

```

`val(:, :, 4) =`

```

1800000      0      0 -1800000      0      0
      0      18048      11280      0 -18048      11280
      0      11280      9400      0 -11280      4700
-1800000      0      0 1800000      0      0
      0 -18048 -11280      0      18048 -11280
      0      11280      4700      0 -11280      9400

```

A partir de estas matrices se utiliza una matriz de colocación que ubica los coeficientes de rigidez de las matrices de rigidez en sistema global, ordenándolos de acuerdo con la numeración de éstos, para posteriormente poder sumar los mismos y obtener la matriz de rigidez de la estructura:

$[K] =$

9000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9000000	0	0	0
0	2256000	282000	282000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2256000	0	0
0	282000	47000	23500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-282000	0	0
0	282000	23500	50916,67	0	-1958,33	1958,333	0	0	0	0	0	0	-280042	0	0
0	0	0	0	1500000	0	0	0	0	0	0	0	-750000	0	-750000	0
0	0	0	-1958,33	0	2611,111	0	1958,333	0	0	0	0	0	-1305,56	0	-1305,56
0	0	0	1958,333	0	0	7833,333	1958,333	0	0	0	0	0	1958,333	0	-1958,33
0	0	0	0	0	1958,333	1958,333	13316,67	0	-11280	4700	0	0	0	0	9321,667
0	0	0	0	0	0	0	0	1800000	0	0	0	0	0	-1800000	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-11280	0	18048	-11280	0	0	0	-18048
0	0	0	0	0	0	0	4700	0	-11280	9400	0	0	0	0	11280
-9000000	0	0	0	-750000	0	0	0	0	0	0	0	9750000	0	0	0
0	-2256000	-282000	-280042	0	-1305,56	1958,333	0	0	0	0	0	0	2257306	0	0
0	0	0	0	-750000	0	0	0	-1800000	0	0	0	0	0	2550000	0
0	0	0	0	0	-1305,56	-1958,33	9321,667	0	-18048	11280	0	0	0	0	19353,56

Donde:

	Bloque
	KQQ
	KQR
	KRQ
	KRR

Para resolver la estructura, como se mencionó, se consideran las cargas de vano sobre la viga, de la cual se obtiene el vector de fuerzas de empotramiento perfecto para cada elemento en sistemas locales:

`val(:, :, 1) =`

```

      0
      6.6312
      0.2763
      0
      6.6312
     -0.2763

```

`val(:, :, 3) =`

```

      0
     79.5750
     39.7875
      0
     79.5750
    -39.7875

```

`val(:, :, 2) =`

```

      0
     79.5750
     39.7875
      0
     79.5750
    -39.7875

```

`val(:, :, 4) =`

```

      0
     33.1563
      6.9076
      0
     33.1563
     -6.9076

```

De igual manera que las matrices de rigidez de cada elemento se hace la rotación de las matrices y su colocación según la numeración de los grados de libertad (GDL). Una vez colocados según el orden de los GDL se obtienen varios vectores de fuerzas de empotramiento perfecto (FEP) ya colocados, los cuales se suman entre sí para obtener un vector de FEPQ:

$$\Sigma\{FEPQ\} =$$

	1
1	0
2	6.6313
3	0.2763
4	39.5112
5	0
6	159.1500
7	0
8	-32.8799
9	0
10	33.1563
11	-6.9076
12	0
13	86.2062
14	0
15	112.7312

Este se ingresa en la siguiente ecuación, al igual que el bloque $[k_{QQ}]$ determinado anteriormente, junto con las acciones en los nudos que forman el vector $\{Q\}$, lo cual no aplica para la viga modelada ya que no se considera más que la carga distribuida mencionada de 53,05 t/m:

$$\{\Delta Q\} = [k_{QQ}]^{-1}(\{Q\} - \Sigma\{FEPQ\})$$

De esto se resuelve y se determinan los desplazamientos, todos incorrectos debido a las propiedades E, I, A no definidos anteriormente. Sin embargo, eso no es lo que se está analizando sino se buscan las acciones en los cuellos de columna y en el centro del vano de 6 m.

Para ello se utilizan las deflexiones determinadas en $\{\Delta Q\}$ y se realiza un proceso de “descolocación” y se las transforma en deflexiones en el sistema local:

$$\{\Delta e\}_L = [T]^T [L]^T \{\Delta\}$$

Con estos se determinan las acciones de extremo de barra $\{FEB\}$ en cada elemento mediante la expresión:

$$\{FEB\} = [ke]_L \{\Delta e\}_L + \{FEP\}_L$$

De lo cual se obtienen los siguientes resultados que es lo que se buscaba, donde los valores resaltados son los de los momentos en los puntos deseados:

val(:, :, 1) =

```

0
-0.0000
-0.0000
0
13.2625
-1.6578

```

val(:, :, 2) =

```

0
152.5187
1.6578
0
6.6313
217.1734

```

val(:, :, 3) =

```

0
-6.6312
-217.1734
0
165.7812
-41.4453

```

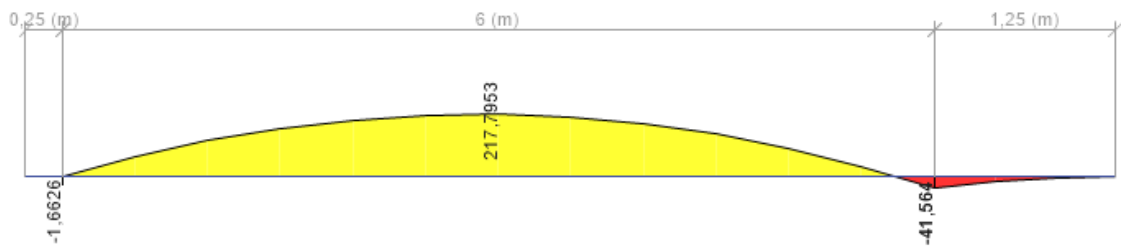
val(:, :, 4) =

```

0
66.3125
41.4453
0
-0.0000
0.0000

```

Esto graficándose en el diagrama de momentos correspondiente queda así, al graficarse como una cimentación y no como una viga:



Sin embargo, como se describió previamente, en esta metodología trabaja únicamente el hormigón recibiendo todos estos esfuerzos lo cual no es cierto en la realidad. Se debería modelar en conjunto al suelo y al elemento estructural, permitiendo su interacción y mostrando que ambos trabajan juntos. Cuando se modela considerando el suelo, los valores de los esfuerzos de flexión disminuyen considerablemente.

4. Determinación de la altura de la zapata

Procedemos a calcular la altura de la zapata en base a las cargas factoradas a partir de la expresión $1,2C_{muerta} + 1,6C_{viva}$, estas son:

$$Pu_1 = 172t.$$

$$Mu_1 = 54tm.$$

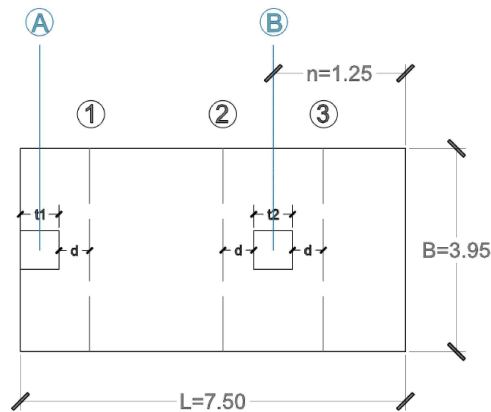
$$Pu_2 = 226t.$$

$$Mu_1 = 0$$

$$q_{su2} = 13,43 \text{ t/m}^2$$

$$\omega_u = 53,05 \text{ t/m}$$

Corte Unidireccional

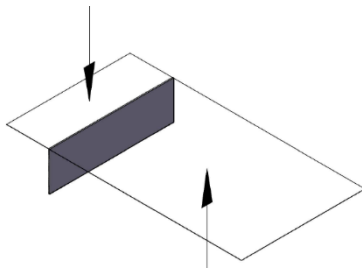


Calcularemos la distancia “d” necesaria para soportar este corte a lo largo de la dimensión “L” de la zapata, esto se debe a que este caso será más crítico que en el otro sentido tendremos un mayor ancho en la superficie resistente.

La demanda en el corte será diferente para los posibles casos 1,2 y 3 que se presentan en este sentido debido a que tendrán un área diferente de la zapata a una distancia “d” de su respectiva columna. Descartaremos el caso 3 debido a que al caso 2 le corresponde la misma columna pero tendrá una mayor fuerza de reacción del suelo hacia arriba y por lo tanto una mayor demanda.

Nos impondremos una resistencia del hormigón

$$f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$$



La fuerza resistente para este tipo de corte viene definida por:

$$\phi V_c = 0,75(0,53 * \sqrt{f'_c} * b_w * d * 10)$$

Definición a la que añadimos un factor de convergencia de 10 para evitar encontrar las infinitas soluciones posibles, la dimensión b_w será igual a B debido a que el ancho del área resistente coincide con este valor. Para este caso:

$$\phi V_c = 0,75(0,53 * \sqrt{210} * 3,95 * d * 10) = 227,53d$$

La demanda en el caso de la sección 1 será:

$$\sum F_y = V_u(\uparrow +)$$

$$V_u = q_{su}(L - t_1 - d) * B - Pu_2$$

$$V_u = 13,43 * (7,5 - 0,5 - d) * 3,95 - 226$$

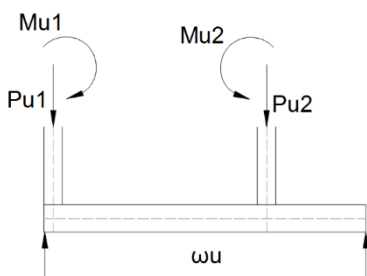
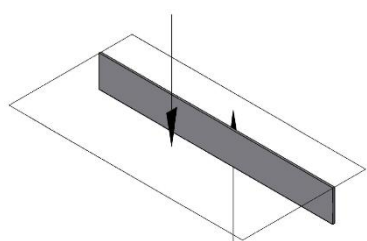
$$V_u = 145,34 - 53,05d$$

Al igualar la capacidad con la demanda (estado limite):

$$\phi V_c = V_u$$

$$227,53d = 145,34 - 53,05d$$

$$d = 0,518 \text{ m.}$$



De la misma manera, en la sección 2 tendremos la demanda:

$$\sum F_y = V_U(\uparrow +)$$

$$V_u = q_{su}(L - n - t_2/2 - d) * B - Pu_1$$

$$V_u = 13,43 * \left(7,5 - 1,25 - \frac{0,5}{2} - d\right) * 3,95 - 172$$

$$V_u = 142,29 - 53,05d$$

$$\phi V_c = V_U$$

$$227,53d = 142,29 - 53,05d$$

$$d = 0,521 \text{ m.}$$

Corte Bidireccional

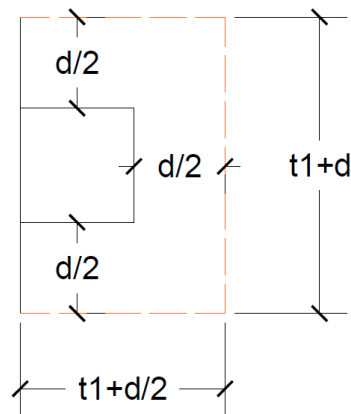
Se consideró necesario la determinación de la distancia “d” para ambas columnas debido a que la que se encuentra en el lado izquierdo tiene una carga más pequeña que la otra, pero de igual manera, tiene un área resistente menor ya que está ubicada a un lado de la zapata.

La fuerza resistente de la zapata para este corte viene dada por:

$$\phi V_c = 0,75(1,06 * \sqrt{f'_c} * b_o * d * 10)$$

Donde b_o es el perímetro del área que encierra la columna a $d/2$ de sus caras. A esta definición, de igual manera, le multiplicaremos por un factor 10.

- Columna en el eje A:



Capacidad:

$$\phi V_c = 0,75 * 1,06 * \sqrt{210} * \left[2 * \left(t_1 + \frac{d}{2}\right) + (t_1 + d)\right] * 10 * d$$

$$\phi V_c = 230,42d^2 + 172,82d$$

Demanda:

$$\sum F_y = V_U(\downarrow +)$$

$$V_u = Pu_1 - q_{su} * \left(t_1 + \frac{d}{2}\right) * (t_1 + d)$$

$$V_u = 172 - 13,43 * \left(0,5 + \frac{d}{2}\right) * (0,5 + d)$$

$$V_u = 168,72 - 9,85d - 6,715d^2$$

En su estado límite:

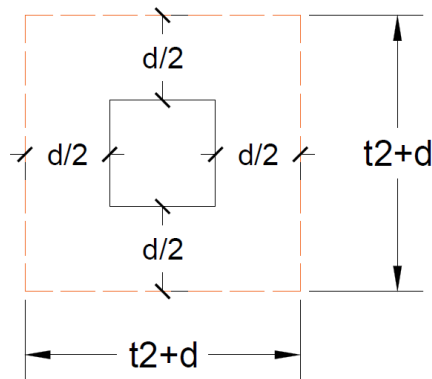
$$\phi V_c = V_u$$

$$230,42d^2 + 172,82d = 168,72 - 9,85d - 6,715d^2$$

$$d_1 = 0,542m$$

$$d_2 = -1,31m, \text{ lo descartamos}$$

- Columna en el eje B:



Capacidad:

$$\phi V_c = 0,75 * 1,06 * \sqrt{210} * [4 * (t_2 + d)] * 10 * d$$

$$\phi V_c = 230,413d + 460,83d^2$$

Demanda:

$$\sum F_y = V_u (\downarrow +)$$

$$V_u = Pu_2 - q_{su} * (t_1 + d)^2$$

$$V_u = 226 - 13,43 * (0,5 + d)^2$$

$$V_u = 222,64 - 13,43d - 13,43d^2$$

En su estado límite:

$$\phi V_c = V_u$$

$$230,413d + 460,83d^2 = 222,64 - 13,43d - 13,43d^2$$

$$d_1 = 0,475m$$

$$d_2 = -0,988m, \text{ lo descartamos}$$

La distancia “d”, por lo tanto, está regida por el corte bidireccional en la columna en el eje A debido al mayor valor calculado.

La altura total de la zapata será por lo tanto:

$$H = d + 1,5\phi + rec$$

Con un recubrimiento de 7,5cm y una varilla supuesta de 16mm:

$$H = 0,542 + 1,5 * 0,016 + 0,075 = 0,641m$$

Nos impondremos como altura 65cm con el fin de tener un valor múltiplo de 5cm adecuado para la construcción.

$$d_{recalc.} = H_{impuesto} - 1,5\phi - rec$$

$$d_{recalc.} = 0,65 - 1,5 * 0,016 - 0,075 = 0,55m$$

5. Dimensionamiento de la zapata

Para este caso supondremos que la capacidad portante del suelo, relacionada con el desplante, se dio a una distancia $D_f = 2m$ y que tendremos un suelo con peso específico $\gamma = 1,9 t/m^3$

Para este caso:

$$V_{plinto} = 7,5 * 3,95 * 0,65 + 2 * 0,5^2 * (2 - 0,65) = 19,93 m^3$$

$$V_{relleno} = 2 * 3,95 * 7,5 - 19,93 = 39,32 m^3$$

$$P_{plinto} = V_{plinto} * \gamma_{H.A} = 19,93 * 2,4 = 47,84 t.$$

$$P_{suelo} = V_{suelo} * \gamma_{suelo} = 39,32 * 1,9 = 74,71 t.$$

El peso total añadiendo también las cargas sin mayorar será igual a:

$$P_t = P_{edif} + P_{plinto} + P_{rell}$$

$$P_t = (130 + 165) + 47,84 + 74,71 = 417,55t.$$

$$q_o = \frac{P_t}{A} = \frac{417,55}{7,5 * 3,95} = 14,09 t/m^2 \geq 10t/m^2$$

Las dimensiones de la zapata calculadas, con el fin de no sobrepasar la capacidad admisible del suelo y al mismo tiempo, mantener la relación de aspecto similar a $L : B = 2 : 1$, serán:

$$H = 0,65m$$

$$L = 10,35m$$

$$B = 5m$$

Con una profundidad de desplante $D_f = 2m$, con una densidad del suelo $\gamma = 1,9 \frac{t}{m^3}$ y una densidad del hormigón armado de $\gamma = 2,4 \frac{t}{m^3}$

$$V_{plinto} = 10,35 * 5 * 0,65 + 2 * 0,5^2 * (2 - 0,65) = 34,31 m^3$$

$$V_{relleno} = 10,35 * 5 * 0,65 - 34,31 = 69,19 m^3$$

$$P_{plinto} = V_{plinto} * \gamma_{H.A} = 34,31 * 2,4 = 82,35 t.$$

$$P_{suelo} = V_{suelo} * \gamma_{suelo} = 69,19 * 1,91 = 131,08 \text{ t.}$$

Los modelos de interacción entre el suelo y la zapata que crearemos usando el software SAP 2000, requerirán que estas fuerzas, además de las provenientes de las columnas, sean distribuidas a lo largo del área de la zapata o como una fuerza distribuida linealmente a lo largo de su longitud:

$$Area = B * L = 5 * 10,35 = 51,75 \text{ m}^2$$

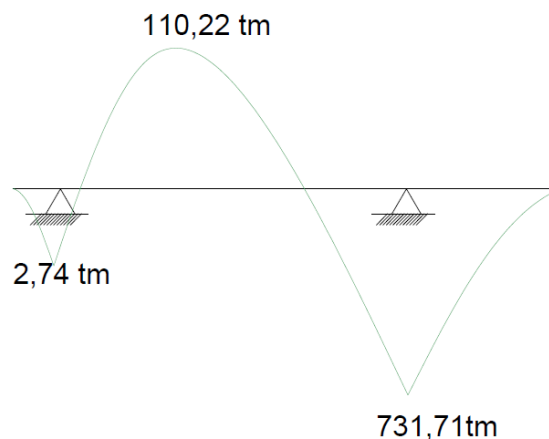
Como cargas repartidas en un área:

1. $q_{su} = 13,43 \text{ t/m}^2$, carga pseudo-ultima proveniente del dimensionamiento inicial de la zapata, no es compatible con las dimensiones actuales, pero fue la carga usada en clase
2. $q_{plinto} = \frac{P_{plinto}}{A} = \frac{82,35}{51,75} = 1,59 \text{ t/m}^2$
3. $q_{relleno} = \frac{P_{relleno}}{A} = \frac{131,46}{51,75} = 2,53 \text{ t/m}^2$

Como cargas lineales:

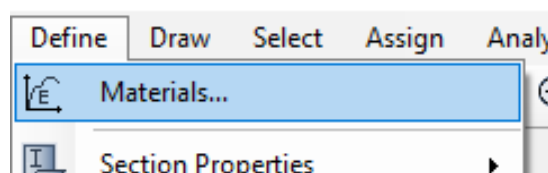
4. $\omega_u = q_{su} * B = 13,43 * 5 = 67,15 \text{ t/m}$
5. $\omega_{plinto} = q_{plinto} * B = 1,59 * 5 = 7,96 \text{ t/m}$
6. $\omega_{relleno} = q_{relleno} * B = 1,59 * 5 = 12,66 \text{ t/m}$

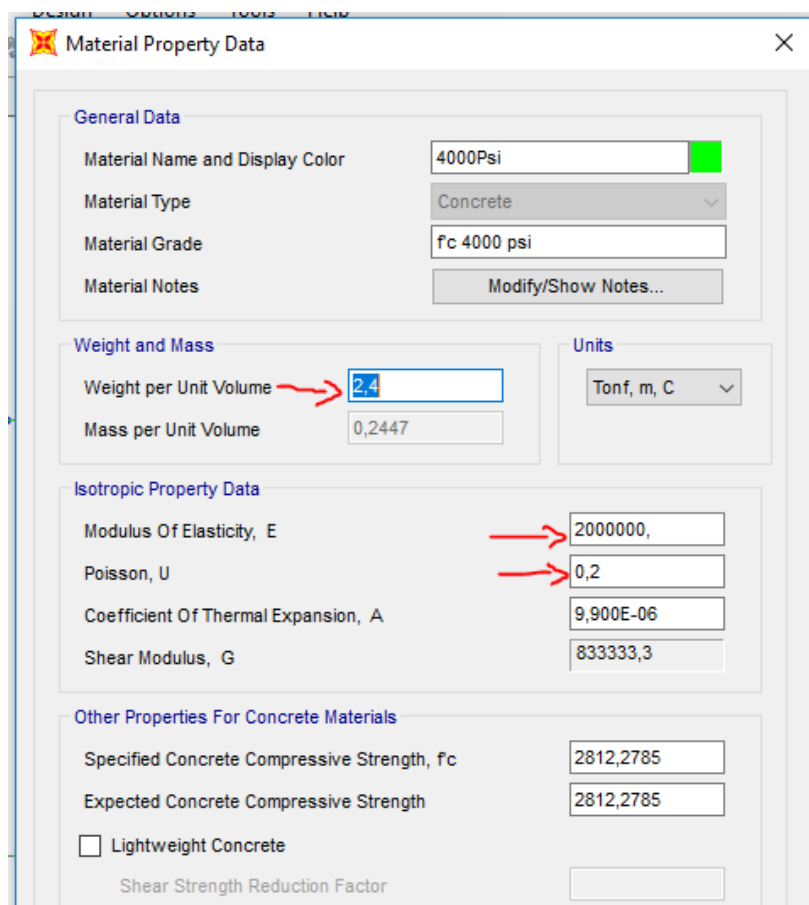
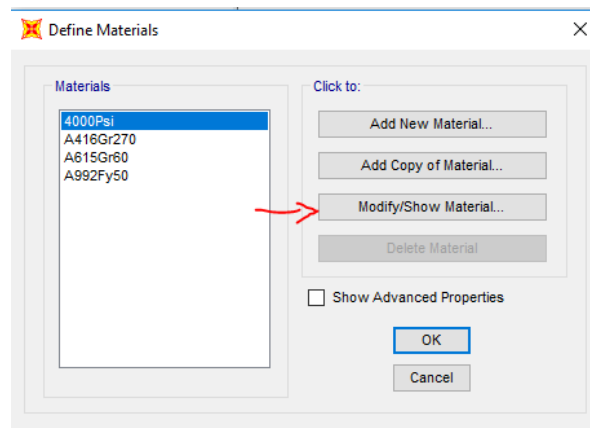
Al resolverlo matricialmente, el diagrama de momentos obtenido con la carga total ($\omega_t = 87,77 \text{ t/m}$)



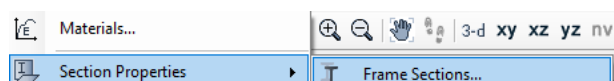
6. Modelación del suelo en SAP

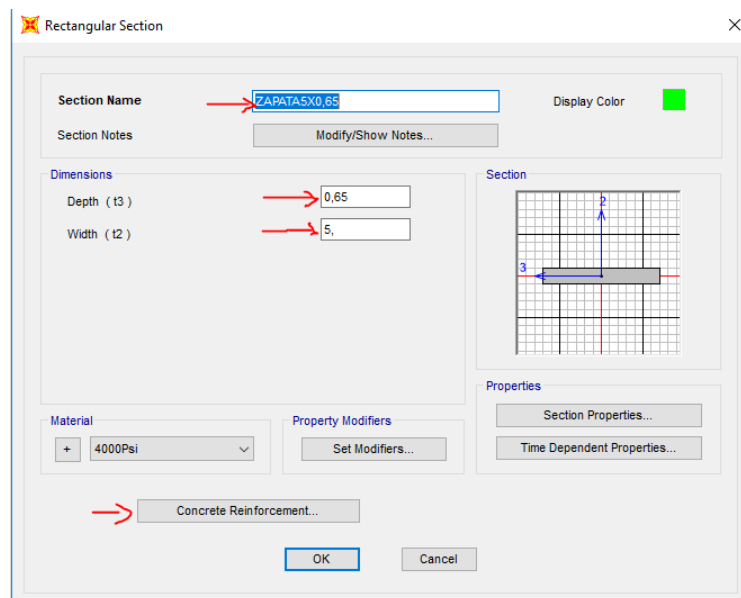
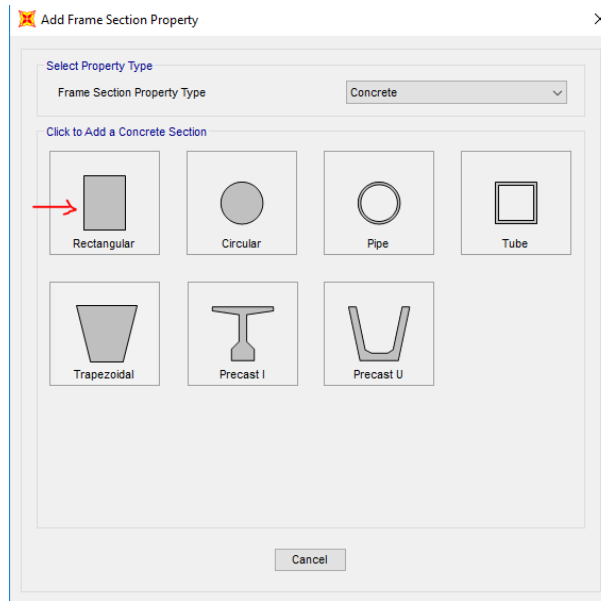
Primeramente, empezaremos definiendo el material, utilizaremos concreto de resistencia 4000PSI o de alrededor de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, dentro del análisis de la zapata combinada los valores de resistencia ultima en los materiales son indiferentes a la resolución de la misma, ya que dependerá de variables como la inercia, el módulo de Poisson en caso de considerar las deformaciones por corte, el área y su módulo de elasticidad exclusivamente. Asimismo, escogeremos un módulo de elasticidad de $E = 2 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de Poisson $\mu = 0,2$ y una densidad del hormigón armado de $\gamma = 2,4 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$.





Definimos la sección de la zapata:





Dentro del apartado de refuerzo de concreto, existe la posibilidad de diseñar el elemento como si fuera una viga o una columna, el método de la rigidez que utilizan los programas computacionales no requiere en ningún momento definir las barras que componen un marco plano



6.1. Primer modelo

Procederemos a crear un modelo en el que las uniones zapata-columna debido a la gran rigidez que tienen funcionan como los apoyos de una viga, la zapata en este caso asumiría el papel de viga, sobre ella actúa el esfuerzo de contacto del suelo, resultado de haber sumado el esfuerzo pseudo-último, el esfuerzo debido al peso del plinto y el peso del relleno. Con el fin de tener puntos de referencia para la creación del marco plano, definiremos la grilla de modo que coincida con las dimensiones de nuestra zapata y para que los nodos donde se encuentran los apoyos se ubiquen sobre los ejes creados.

X Grid Data

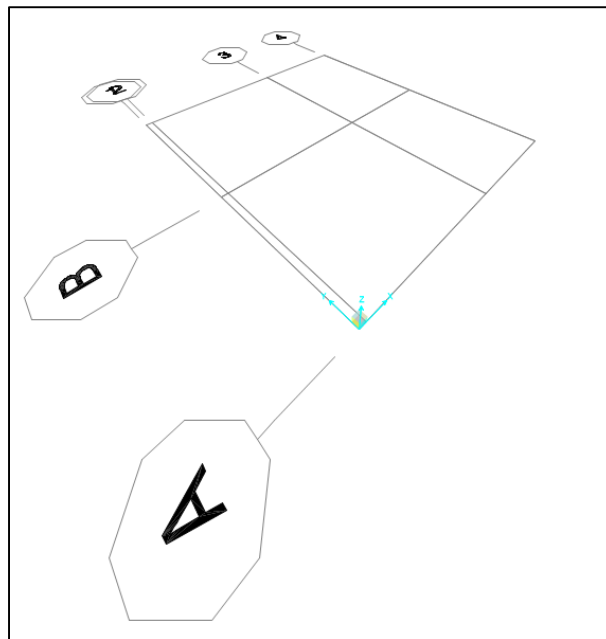
Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
1	0	Primary	Yes	End	
2	0.25	Primary	Yes	End	
3	6.25	Primary	Yes	End	
4	10.35	Primary	Yes	End	

Add
Delete

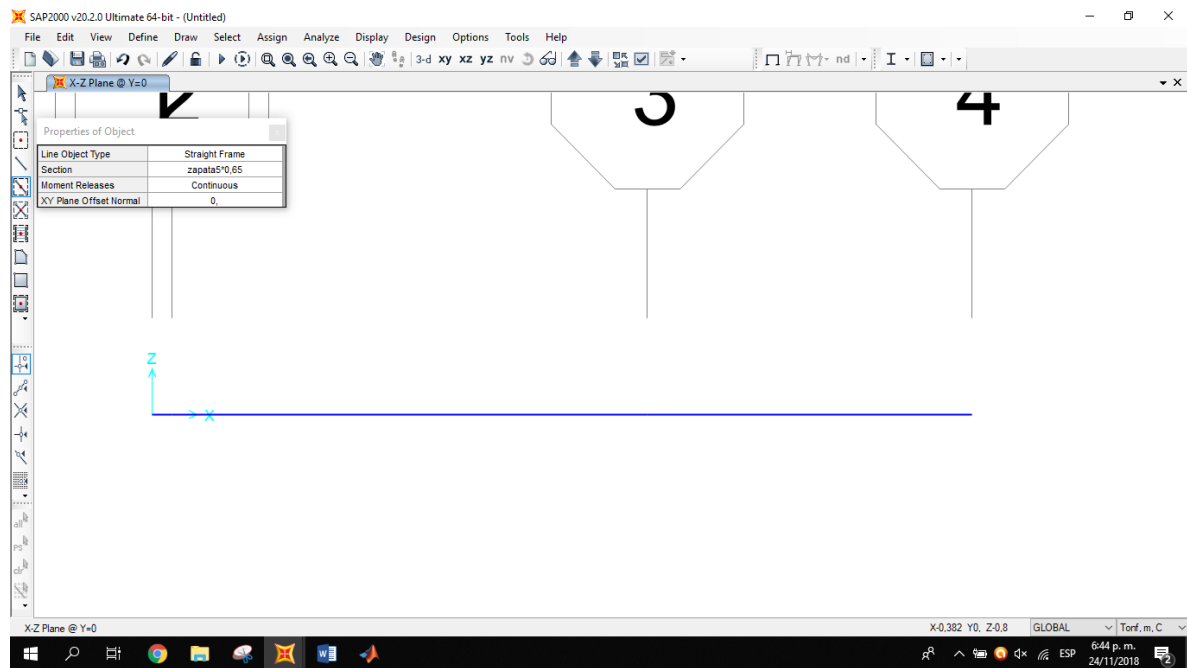
Y Grid Data

Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
A	0	Primary	Yes	Start	
B	6	Primary	Yes	Start	
C	12	Primary	Yes	Start	

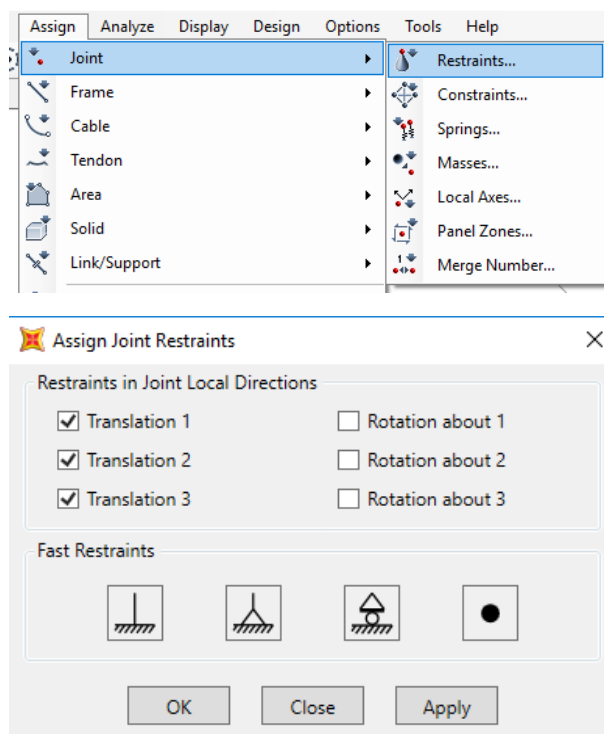
Add
Delete



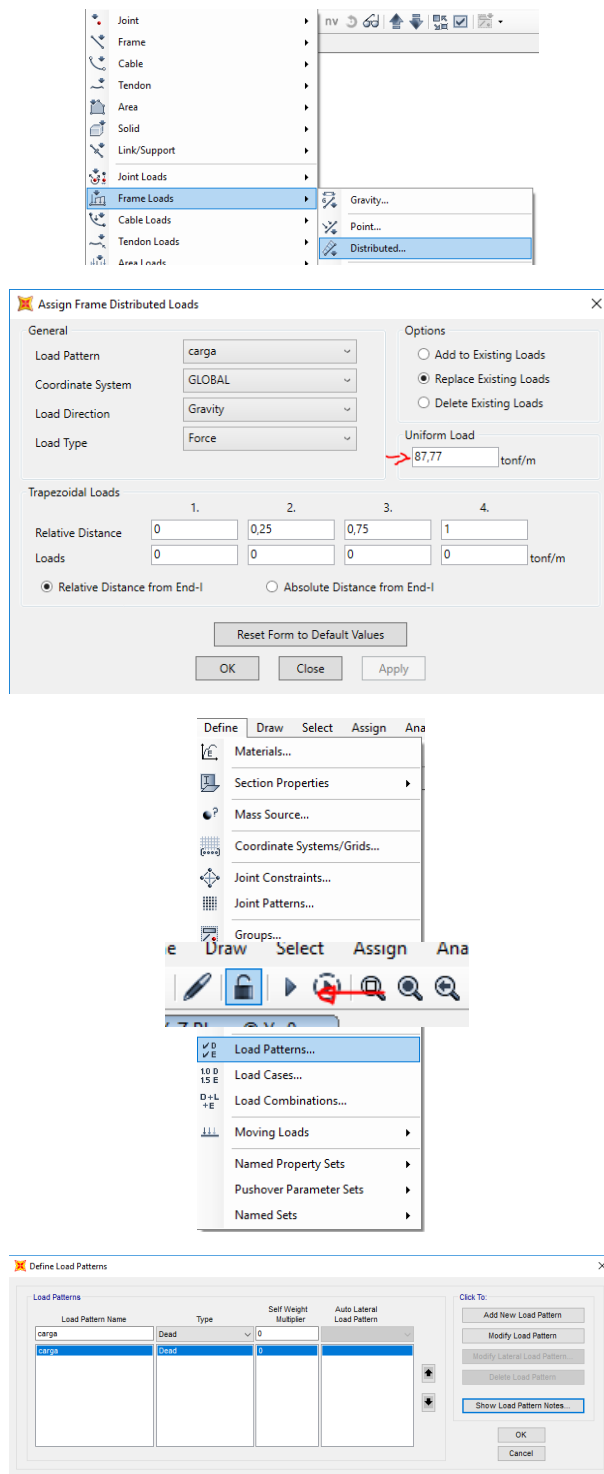
Se trabajará en el plano XZ para los 3 primeros modelos en los cuales la zapata estará compuesta por elementos frame, estos 3 planos estarán a una distancia de 6m paralelos entre ellos para una mejor visualización.



Usando la función “Quick draw frame” dentro del apartado “Draw”, y ubicándonos en el plano $Y=0$ enmarcamos la cuadrícula, después de haber seleccionado la sección creada para la zapata.

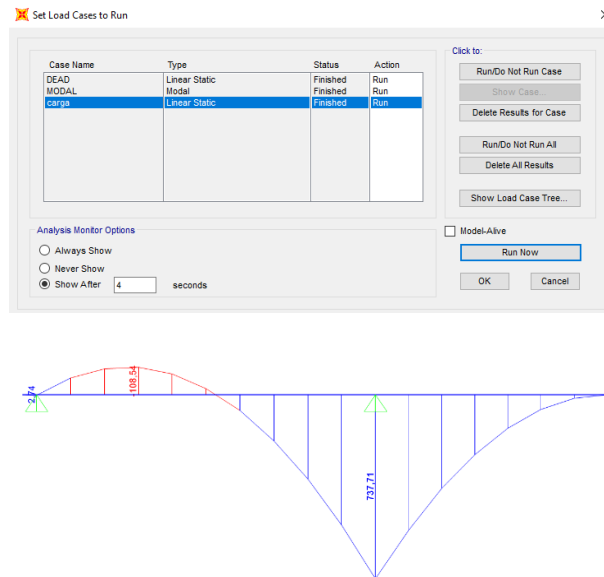


Seleccionando el área donde se encuentran los apoyos, asignamos las restricciones a los nodos. Definimos un estado de carga para nuestro propósito con un multiplicador de peso propio de 0.



En este caso asumiremos que la presión actúa uniformemente a lo largo de toda la longitud de la zapata, colocaremos entonces los $87,77 \text{ t/m}$ calculados anteriormente :

Ejecutamos el programa con el fin de conocer los momentos a los que estará sometido el elemento:

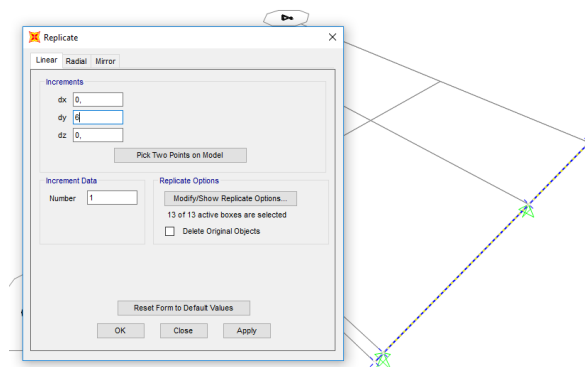


Al asumir que los únicos soportes de estas cargas se encuentran en las columnas, hacemos que el hormigón de la zapata exclusivamente absorba la flexión, la zona a la derecha de la segunda columna tiene un flector de 737,71 tm . debido a la necesidad de equilibrar las cargas este “volado” de 4,1m en esta “viga”. En este modelo ni el suelo ni las cargas se encuentran bien

6.2. Segundo modelo

Antes de comenzar con la modelación del suelo necesitamos asumir un coeficiente de Balasto de la capa en contacto con la cimentación de $\beta = 2000 \text{ t/m}^3$. En el modelo de Winkler, el coeficiente de Balasto es un parámetro que define la relación entre la presión de contacto y los asentamientos, su cálculo se da a partir de una prueba de placa, pero también es correlacionable a partir del ensayo SPT o triaxiales.

Dentro del programa, utilizaremos el modelo creado anteriormente y lo replicaremos en otro plano a 6m de XZ:

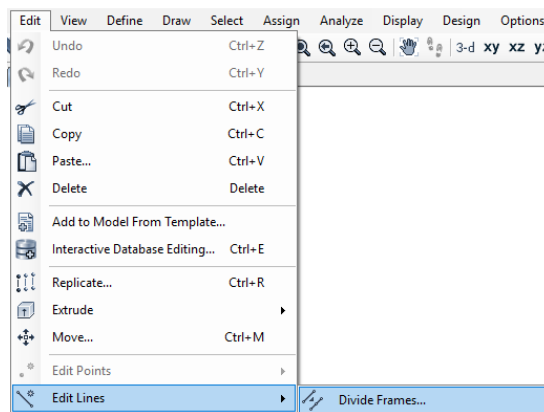
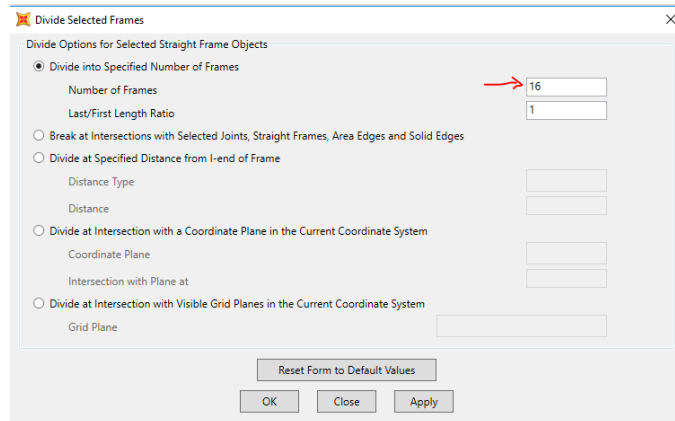


Con el propósito de simular el comportamiento elástico del suelo colocaremos resortes en nodos a lo largo de la zapata, para la creación de estos nodos dividimos a los elementos frame en partes iguales de alrededor de 25cm:

Volado izquierdo: no necesita división

$$\text{Tramo entre columnas: } \frac{6m}{25cm} = 24 \text{ partes}$$

$$\text{Volado derecho: } \frac{4,1m}{25cm} = 16,4 \sim 16 \text{ partes}$$



Como ha sido explicado, el coeficiente de Balasto viene definido por:

$$\beta = \frac{q_q(\text{esfuerzo de trabajo})}{\Delta(\text{deformación absoluta})}$$

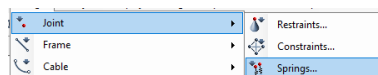
La rigidez de los resortes $k = F/\Delta$, dado que $q_q = F/A$ será igual a

$$k(\text{de cada resorte}) = \frac{\beta * A_{\text{contacto}}}{\# \text{ de resortes}}$$

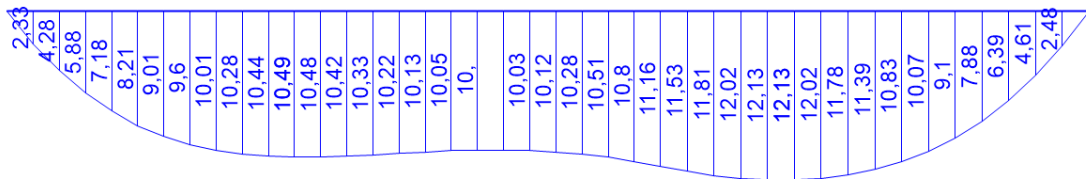
En nuestro caso, el número de resortes sobre los que deberán estar apoyados los 41 elementos consecutivos será 42

$$k = \frac{2000 * (51,75)}{(42)} = 2464,29 \text{ t/m}$$

Asignamos cada nodo con este valor:



La carga distribuida sobre la viga seguirá siendo la misma que la del anterior modelo:



Al correr el caso de carga creado, podemos ver como el momento flector es uniforme en toda la longitud de la zapata. Este modelo no tiene bien modeladas las cargas debido a que tenemos un momento concentrado y cargas puntuales verticales provenientes de las columnas.

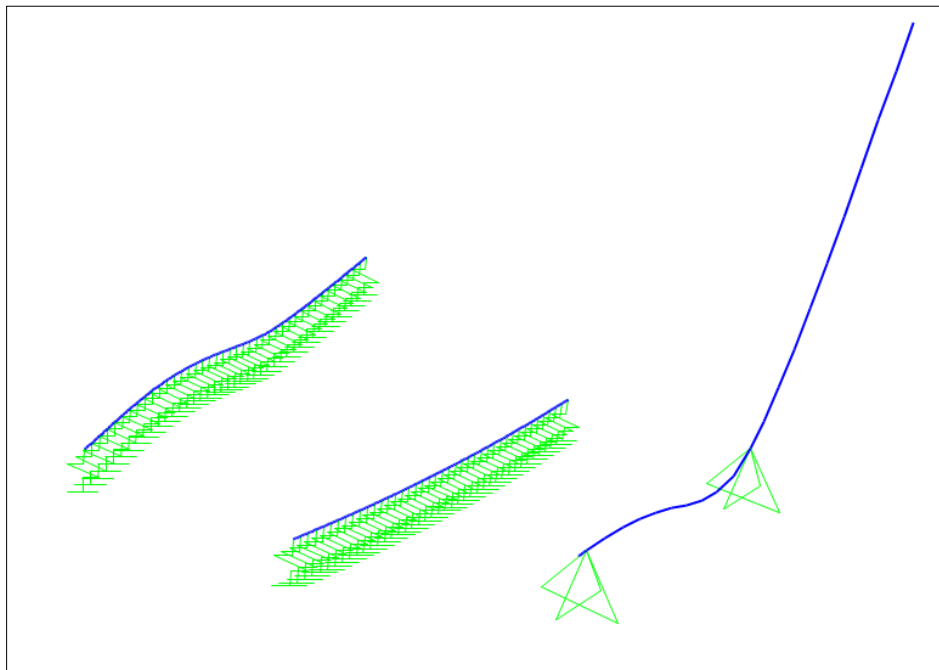
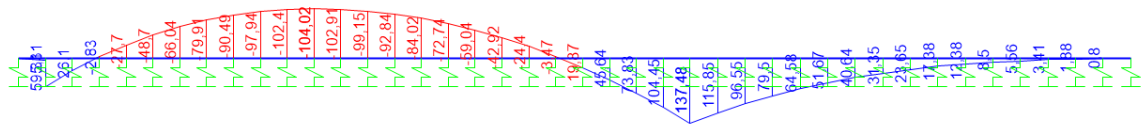
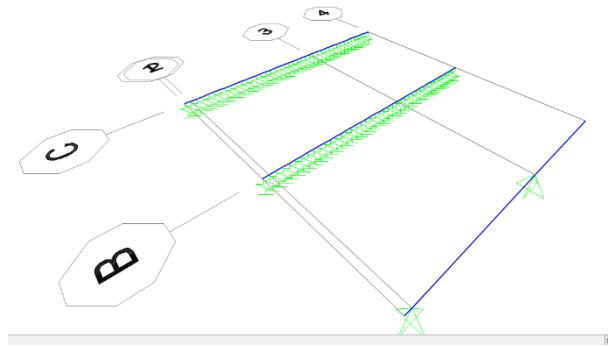
6.3. Tercer Modelo

Asumiremos para este caso que la carga debido al peso propio del suelo y la del relleno tienen su resultante en el centro de gravedad de la cimentación y por lo tanto se puede asumir esta es equivalente a una carga distribuida linealmente:

$$\omega_t = \omega_{plinto} + \omega_{relleno} = 7,96 + 12,66 = 20,62 \text{ t/m}$$

Además de esta carga aplicada, tendremos en los ejes creados anteriormente los efectos provenientes de las columnas en condiciones ultimas 172t. y 54 tm. como axial y flector de la primera columna y 226t. de axial proveniente de la segunda.

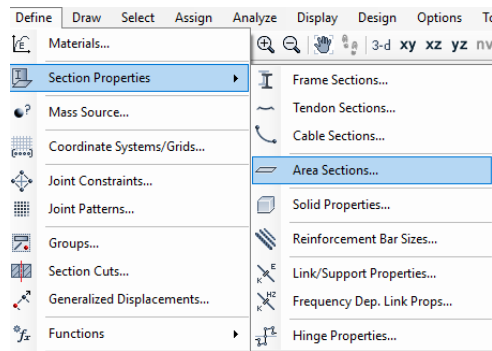
Replicamos el anterior modelo, debido a que conservaremos la condición de apoyos y los resortes ubicados sobre estos (que representan el suelo y son acordes al modelo de Winkler). Pero reemplazaremos la carga distribuida por la mencionada en el anterior párrafo con el fin de acercarnos más a la condición de cargas real.



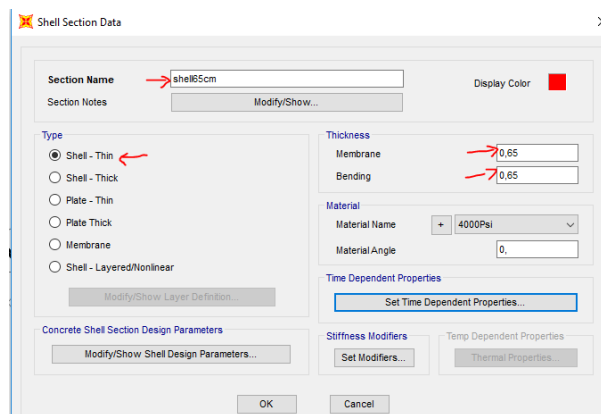
Bajo el criterio estudiado, con un elemento frame, este modelo es el más coherente, el problema reside en que solo una dimensión de la zapata recibe todo el esfuerzo y por lo tanto el flector y las deformaciones será mayor que si las recibieran ambos sentidos.

6.4. Cuarto Modelo

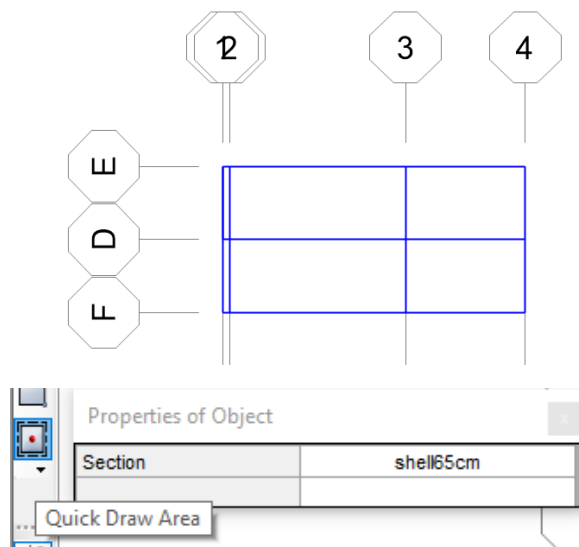
Comenzaremos modelando la zapata como un elemento tipo Shell o área.



Empezaremos definiendo una sección equivalente a la zapata:

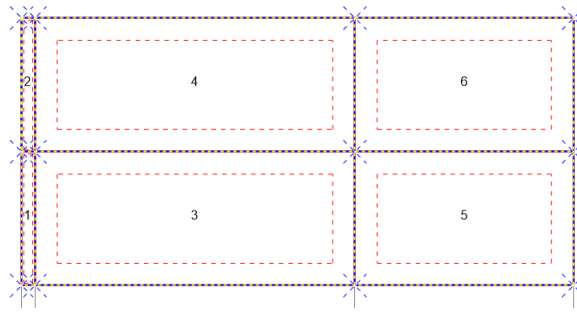


Con el fin de ubicar diferentes elementos shell a lo largo de la cuadrícula que ocupara la zapata dibujaremos elemento frame cualquiera en dichos bordes



Intentaremos dividir a los elementos área en elementos finitos, estos deberán cumplir ciertas condiciones para un análisis correcto:

- Deber compartir nodos en sus esquinas, ninguno puede estar desacoplado
- Tienen que estar ligados a 3 o 4 nodos
- No podrán tener una relación entre sus lados mayor a 2:1, preferentemente tendrán una relación 1:1.



Los frame creados para delimitar estas áreas deberán ser eliminados una vez creados los Shell

Matemáticamente, para la resolución de la estructura, no importará en qué orden sean dibujados los elementos Shell, sin embargo, para la interpretación de los resultados deberán dibujarse en sentido anti horario, si se utiliza la función Draw Poly Area de modo que cargas verticales con dirección a la gravedad generen tracción en la cara inferior del elemento

Los paneles 1 y 2 tienen como dimensiones $2,5 * 0,25 \text{ m}$, para aumentar la precisión de los resultados, los dividiremos verticalmente en 8 áreas más pequeñas cada uno, los paneles 3 y 4 de dimensiones $2,5 * 6 \text{ m}$, los dividiremos en 24 partes horizontalmente y 8 verticalmente cada uno y los paneles 5 y 6 de dimensiones $4,1 \text{ m} * 6 \text{ m}$, los dividiremos en 16 partes horizontalmente y 8 verticalmente a cada uno.

$$\text{Paneles 1 y 2: } \frac{2,5}{8} * 0,25 = 0,31 * 0,25 \text{ m, 16 partes}$$

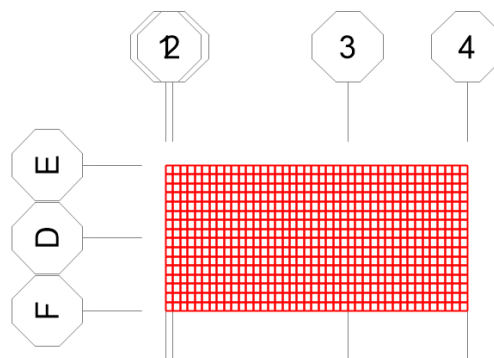
$$\text{Paneles 3 y 4: } \frac{2,5}{8} * \frac{6}{24} = 0,31 * 0,25 \text{ m, 384 partes}$$

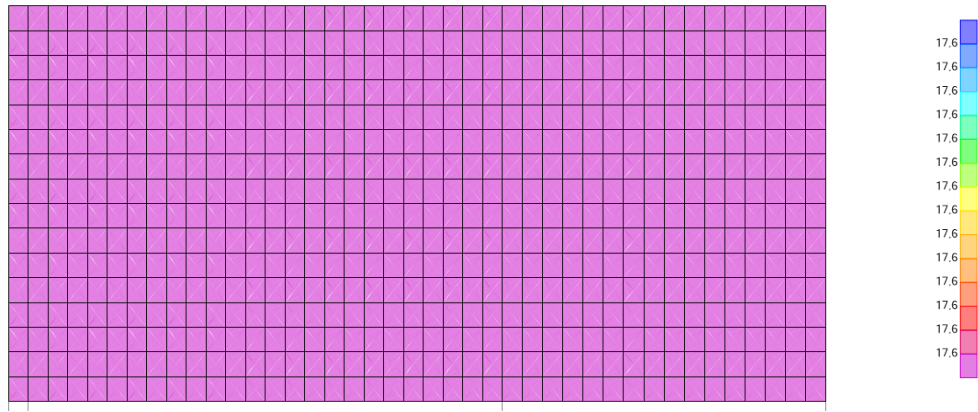
$$\text{Paneles 5 y 6: } \frac{2,5}{8} * \frac{4,1}{16} = 0,31 * 0,26 \text{ m, 256 partes}$$

Con un total de 656 elementos finitos de dimensiones similares, análogamente al primer modelo colocaremos una carga repartida en un área a partir del mismo cálculo:

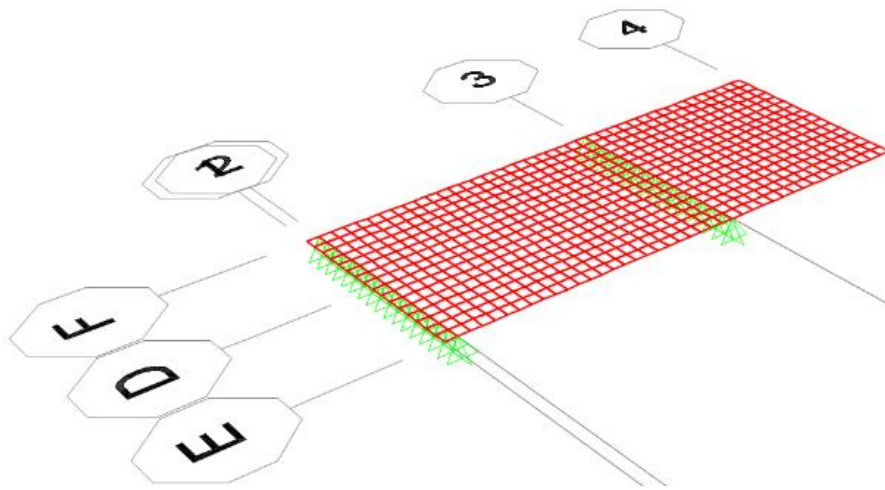
$$\omega_t = 87,77 \frac{t}{m} \rightarrow q_t = \frac{\omega_t}{B} = \frac{87,77}{5} = 17,55 \text{ t/m}^2$$

Esta carga será asignada a cada uno de estos elementos

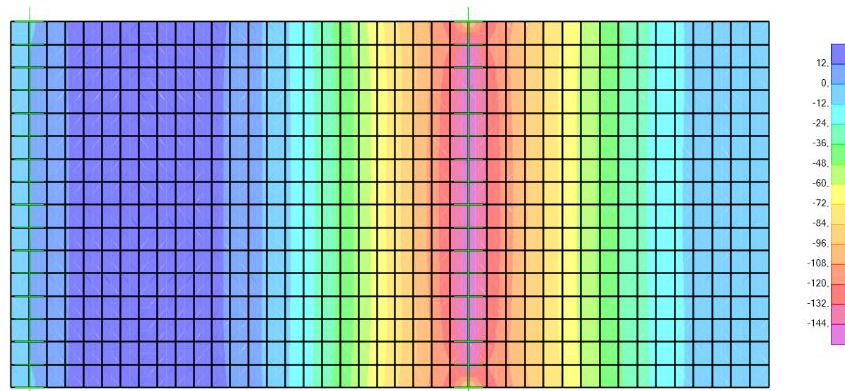




Con el fin de comparar resultados con el primer modelo realizado, colocaremos apoyos en los ejes verticales correspondientes a las columnas:



Ejecutamos el programa para conocer los momentos a los que está sujeta la sección:



Utilizamos la opción “Draw section cut” para conocer los momentos a los que está sometida la zapata a lo largo del eje vertical de la primera columna, a 1,5m de ella y en la segunda columna.

Section Cutting Line

	X	Y	Z
Start Point	0,25	26,5	0,
End Point	0,25	21,5	0,

Resultant Force Location and Angle

	X	Y	Z	Angle (X to 1)
	0,25	24,	0,	270,

☒ Frames
 ☒ Shells
 ☒ Asolids
 ☒ Planes
 ☐ Solids
 ☒ Links

Integrated Forces

	Right Side			Left Side		
	1	2	Z	1	2	Z
Force	0,	0,	3,421E-13	0,	0,	21,9375
Moment	-9,745E-14	4,993E-13	0,	-2,7422	-7,404E-13	0,

Save Cut

Save Cut

Close

Refresh

Section Cutting Line

	X	Y	Z
Start Point	0,25	26,5	0,
End Point	1,75	21,5	0,

Resultant Force Location and Angle

	X	Y	Z	Angle (X to 1)
	1,75	24,	0,	270,

☒ Frames
 ☒ Shells
 ☒ Asolids
 ☒ Planes
 ☐ Solids
 ☒ Links

Integrated Forces

	Right Side			Left Side		
	1	2	Z	1	2	Z
Force	0,	0,	31,0964	0,	0,	-9,1589
Moment	-112,4571	-1,049E-10	0,	109,7149	1,051E-10	0,

Save Cut

Save Cut

Close

Refresh

Section Cutting Line

	X	Y	Z
Start Point	0,25	26,5	0,
End Point	6,25	21,5	0,

Resultant Force Location and Angle

	X	Y	Z	Angle (X to 1)
	6,25	24,	0,	270,

☒ Frames
 ☒ Shells
 ☒ Asolids
 ☒ Planes
 ☐ Solids
 ☒ Links

Integrated Forces

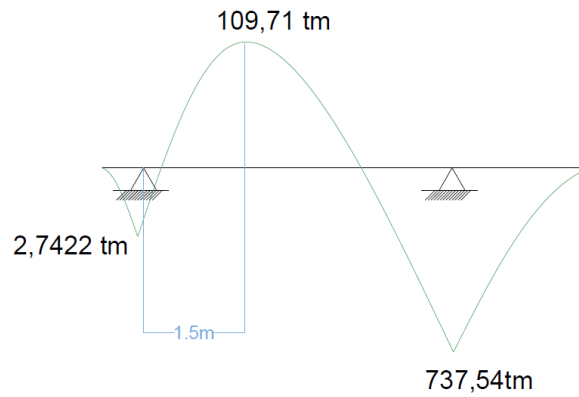
	Right Side			Left Side		
	1	2	Z	1	2	Z
Force	0,	0,	-363,7786	0,	0,	365,7161
Moment	734,7966	2,086E-11	0,	-737,5387	-2,010E-11	0,

Save Cut

Save Cut

Close

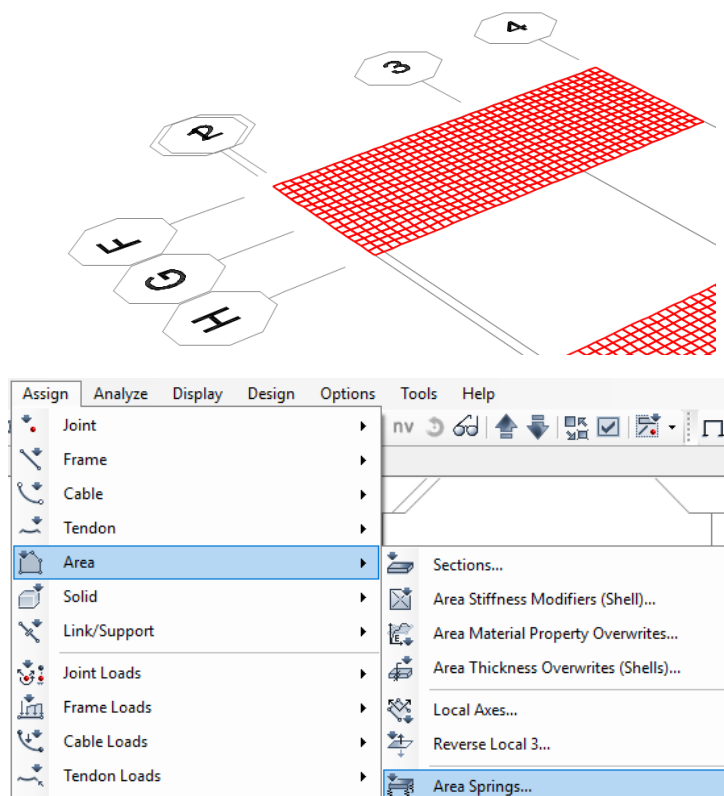
Refresh



Este modelo no asume de manera adecuada la aplicación de los efectos provenientes de las columnas ni tampoco el comportamiento del suelo

6.5. Quinto Modelo

Al igual que en el segundo modelo, procederemos a modelar el suelo como si se tratara de resortes, en este caso, aplicados en el centro de gravedad de cada uno de los elementos finitos. Para ello, en primera instancia duplicaremos el modelo anterior y eliminaremos los apoyos.



Assign Springs to Area Object Face

Spring Type

☒ Simple

Spring Stiffness per Unit Area tont/m/m²

Simple Spring Resists

☐ Link Property

Local 2 Axis Angle from Default Orientation

Spring Location (Area Object Face)

Area Object Face

Area Object Edge Number

Spring Tension Direction

☐ Parallel to Area Object Local Axis

☒ Normal to Specified Area Object Face

☐ User Specified Direction Vector

Coordinate System

Local 1 Component

Local 2 Component

Local 3 Component

Options

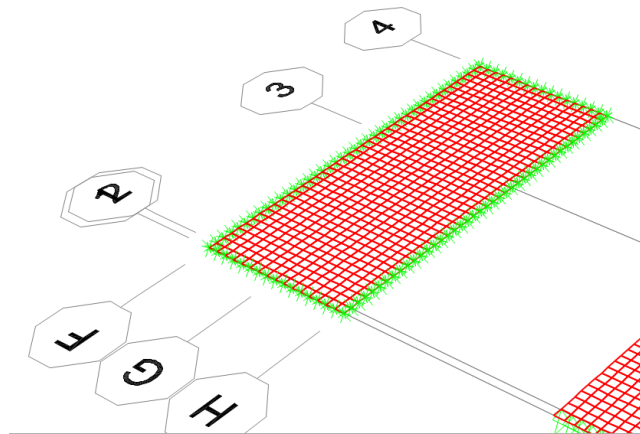
☐ Add to Existing Springs

☒ Replace Existing Springs

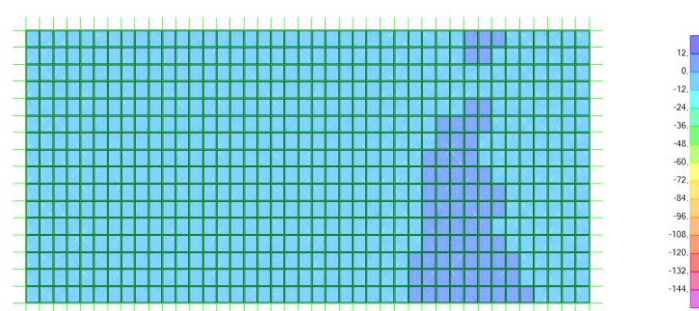
☐ Delete Existing Springs

Como rigidez del resorte colocaremos el módulo de balasto del suelo, solo aceptaremos esfuerzos de compresión, con tensión positiva en el resorte partir de la cara superior del shell (top inward)

En clase ubicamos, como precaución, condiciones de borde en los nodos exteriores para anular los desplazamientos laterales que la estructura pueda tener, en este caso no importa si estos límites hayan sido asignados porque solo tenemos cargas verticales



Ejecutamos el programa con la carga asignada también al caso anterior:



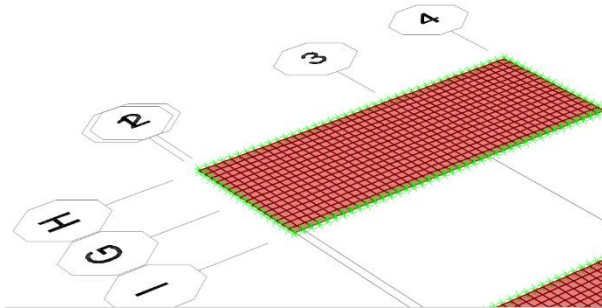
Los momentos en la zapata aparecen como muy próximos a 0, esto se debe a que cada uno de los resortes reciben la misma carga y por lo tanto se esfuerzan de igual manera, comprimiéndose lo mismo y teniendo una deformación relativa de 0 en prácticamente todos sus puntos. Este modelo supone correctamente el comportamiento del suelo de acuerdo al criterio estudiado, pero no asume que existe fuerzas y momentos puntuales provenientes de las columnas.

6.6. Sexto Modelo

De manera similar al tercer modelo, este caso aplicará las cargas de una manera mucho más cercana a la realidad en comparación a los 2 anteriores modelos, así como modelará al suelo como resortes perfectamente elásticos.

Como primer paso necesitamos convertir el peso del plinto y el peso de relleno en cargas distribuidas en un área:

$$q = \frac{P_{plinto} + P_{suelo}}{A} = \frac{82,35 + 131,08}{5 * 10,35} = 4,12 \text{ t/m}^2$$



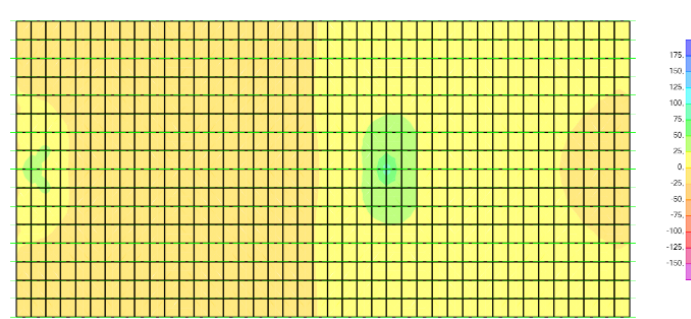
Además, deberemos aplicar en los puntos pertenecientes a los ejes de las columnas:

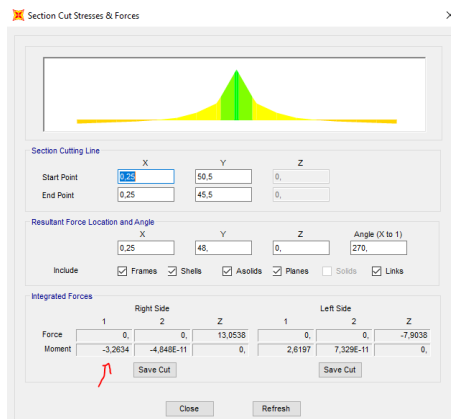
$$P_{u1} = 172t$$

$$M_{u1} = 54 \text{ tm}$$

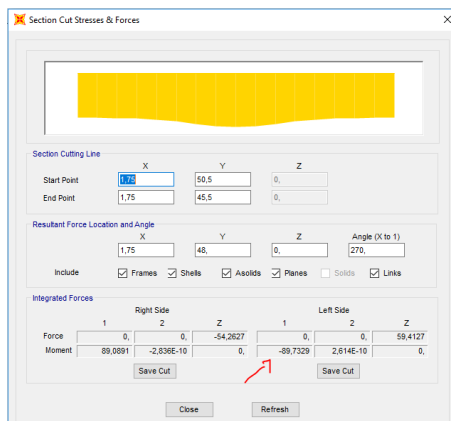
$$P_{u2} = 226t$$

Duplicamos el modelo anterior y le asignamos estas cargas. Ejecutamos el programa y comprobamos los resultados con los del tercer modelo. Utilizando un draw section cut en el eje de la primera columna, a 1,5m a su derecha y en el eje de la segunda columna tenemos:

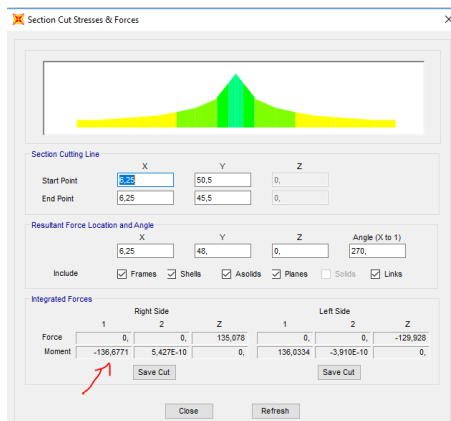




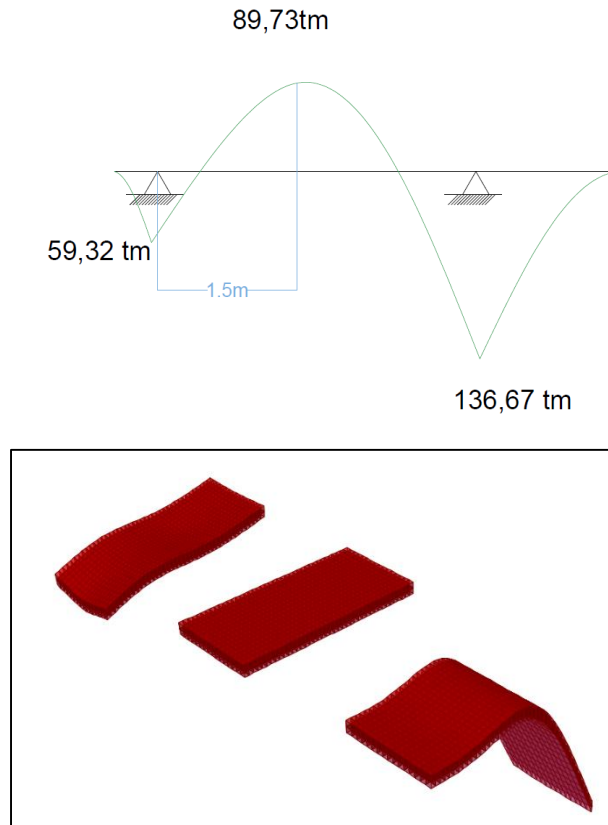
3,26tm en comparación a 59,32tm



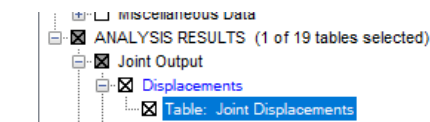
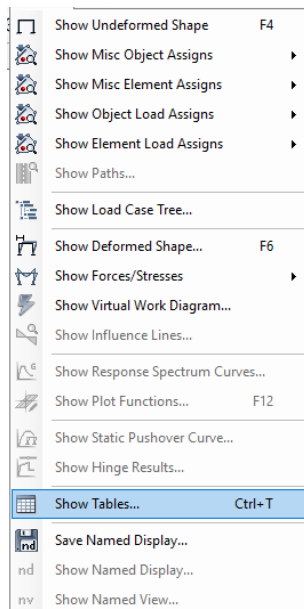
89,73tm en comparación a 104,02tm



136,68tm en comparación a 137,48tm del tercer modelo



Es posible el exportar los puntos pertenecientes a las deformaciones a Excel y consecuentemente a un archivo en Matlab con el objetivo de conocer qué porcentaje de puntos sobrepasa el esfuerzo admisible del suelo, en este caso se había supuesto $q_a = 10 \text{ t/m}^2$.



Joint Displacements

Joint Text	OutputCase	CaseType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1541	carga	LinStatic	0	0	-0.009532	0.00076	-0.001528	0
1547	carga	LinStatic	0	0	-0.002335	0.000185	-0.000856	0
1548	carga	LinStatic	0	0	-0.002335	-0.000185	-0.000856	0
1549	carga	LinStatic	0	0	-0.009532	-0.00076	-0.001528	0
1550	carga	LinStatic	0	0	-0.010887	2.409E-15	-0.001548	0
1551	carga	LinStatic	0	0	-0.002586	1.62E-15	-0.000887	0
1552	carga	LinStatic	0	0	-0.005116	0.000488	-0.000273	0
1553	carga	LinStatic	0	0	-0.005116	-0.000488	-0.000273	0
1554	carga	LinStatic	0	0	-0.009151	0.000752	-0.001518	0
1555	carga	LinStatic	0	0	-0.009151	-0.000752	-0.001518	0
1556	carga	LinStatic	0	0	-0.010887	2.6E-15	-0.001382	0
1557	carga	LinStatic	0	0	-0.008104	3.118E-15	-0.000339	0
1558	carga	LinStatic	0	0	-0.009385	-0.000753	-0.001534	0
1559	carga	LinStatic	0	0	-0.009377	-0.000758	-0.001539	0
1560	carga	LinStatic	0	0	-0.009622	-0.000758	-0.001558	0
1561	carga	LinStatic	0	0	-0.010012	-0.000782	-0.001584	0

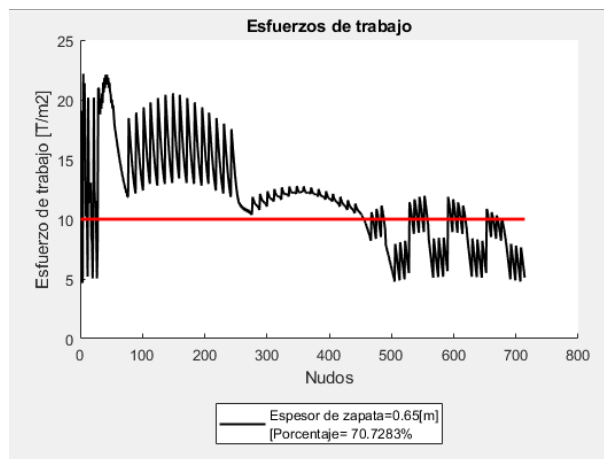
Dado que:

$$\beta = \frac{q_a(\text{esfuerzo de trabajo})}{\Delta(\text{deformación})}$$

$$q_q = \beta * \Delta$$

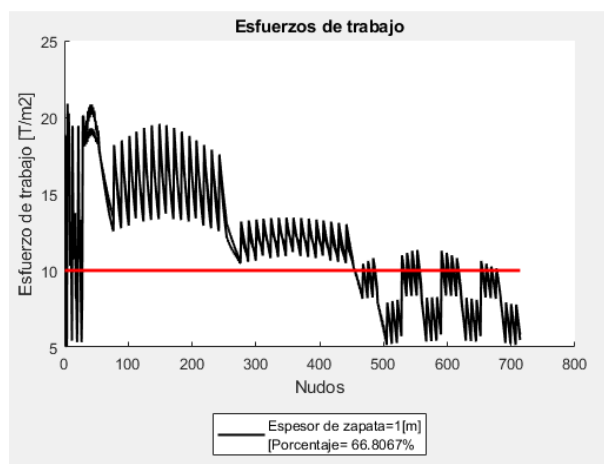
Es posible multiplicar las deformaciones obtenidas de SAP2000 para conocer el esfuerzo de trabajo ejercido por cada resorte. Armando una rutina que mantenga una función constante en el esfuerzo admisible y en otro donde los diferentes esfuerzos de los resortes para que luego sean graficados nos muestra:

Un 70,7283% de los nudos en esta zapata, para este espesor, sobrepasa el esfuerzo admisible del suelo. Un valor típico aceptable de la desviación estándar esta alrededor del 2% en bases de datos grandes, este será valor objetivo, en este caso tenemos la incertidumbre de no conocer completamente cómo se comporta el suelo, el hormigón ni tampoco si las cargas previstas sean las propuestas en un inicio.



Con el fin de reducir los esfuerzos sobre el suelo, aumentaremos el peralte de la zapata, lo que significara una mayor rigidez la cual es inversamente proporcionar a las deformaciones. Cabe mencionar que es necesario que la altura de la zapata no signifique que la deformación absoluta aumente ya que esto sería contraproducente porque haría que los “resortes” se compriman demasiado y falle el suelo. Esto puede confundir a algunas personas debido a que la deformación relativa al tener espesores muy grandes de zapata es mínima.

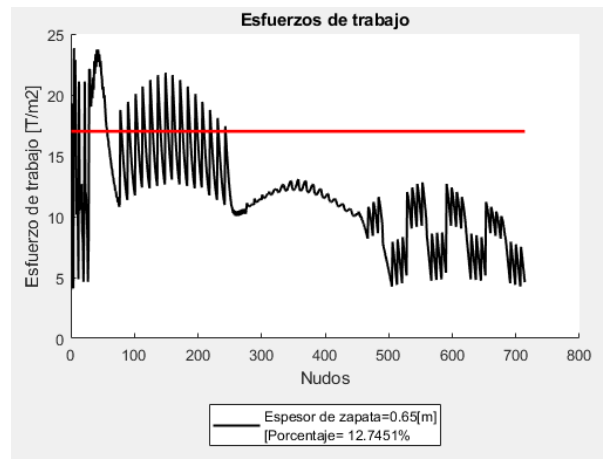
Al cambiar el espesor del elemento Shell creado y siguiendo los mismos pasos que en el caso anterior tenemos:



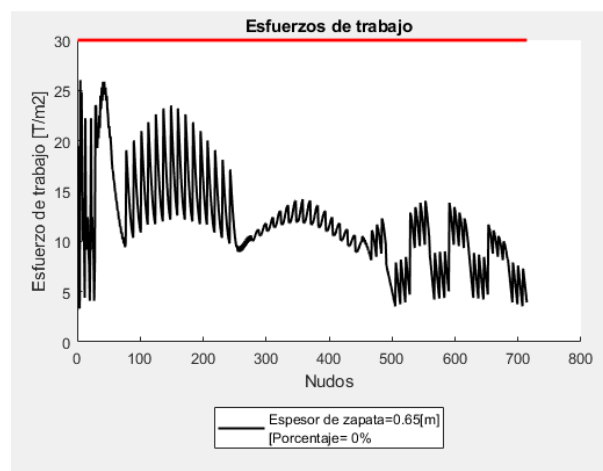
Existe una mejora no muy grande en cuanto al número de nudos que sobrepasan el esfuerzo admisible del suelo, en este momento nos damos cuenta que un reemplazo del suelo podría ser

una mejor opción debido a que técnica y económicamente no resulta muy viable tener espesores demasiado grandes.

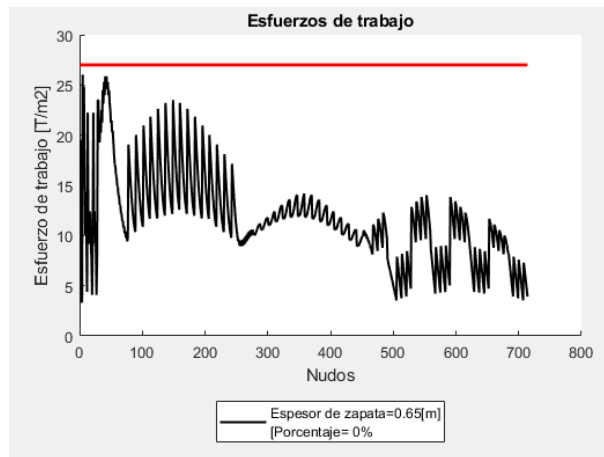
Recurrimos al reemplazo del suelo ya que notamos que el seguir aumentando el espesor de la zapata no implica que el esfuerzo de trabajo en el suelo mejore. Asumiremos que cambiamos el suelo original con un que tiene como esfuerzo admisible $q_a = 17 \text{ t/m}^2$ y balasto $\beta = 3000 \text{ t/m}^3$, volvemos a utilizar el espesor de Shell de 65cm, es necesario cambiar la rigidez de los resortes en SAP2000 antes de correr el modelo de nuevo.



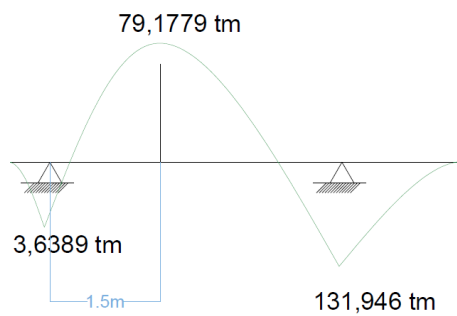
Esto implica una mejora significativa en el esfuerzo de trabajo del suelo, sin embargo, es necesario un suelo de mejores características para alcanzar el 2% objetivo. Suponemos un esfuerzo admisible $q_a = 30 \text{ t/m}^2$ y balasto $\beta = 4500 \text{ t/m}^3$.



Estas condiciones satisfacen la necesidad de que el suelo no esfuerza su capacidad de carga, sin embargo, podríamos suponer que queremos un diseño más económico y menos conservador y colocamos un suelo con el mismo balasto, pero con $q_a = 27 \text{ t/m}^2$



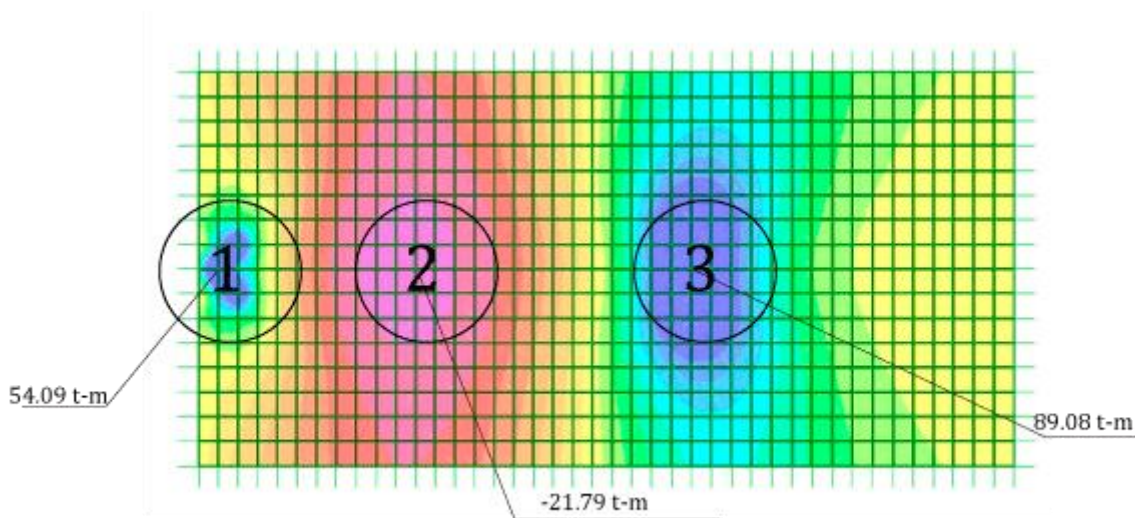
Obteniendo el flector en sentido de “L” podemos observar,



El suelo más rígido que ha sido colocado, hará que la flexión sea menor en todos los puntos ya que proporciona una deformación relativa menor

7. Armado de la Cimentación

En las zonas de máxima flexión de la zapata se tienen los siguientes momentos:



De acuerdo con la demanda se arma la zapata de la siguiente manera:

El área de acero mínima es la siguiente:

$$A_{s \min} = 0.0018 b_w d = 0.0018 \cdot 100 \cdot 55 = 9.9 \text{ cm}^2$$

Para el área mínima de acero de refuerzo el momento es despejado de la siguiente expresión:

$$As = 0,85 \frac{f'c}{fy} \cdot b_w d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2,36 \cdot M_u}{0,9 \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f'c}} \right]$$

Y se tiene que:

$$M_{u \min} = 20.09 \text{ t} - \text{m}$$

Dichos 9.9 cm^2 en términos de varillas $\phi 16$ representan un área de 10.05 cm^2 realmente, con lo cual se cubre un

$$M_u = 20.38 \text{ t} - \text{m}$$

Para este mínimo de acero se da una separación de:

$$S = \frac{1 - 0,0016 / 2}{5} = 20 \text{ cm}$$

Sin embargo, para los momentos de 54.09 t-m, 21.79 t-m y de 89.09 t-m no cubiertos por la cuantía de acero mínima se debe colocar acero para que soporte esa diferencia de esfuerzos de flexión respecto al momento de mínima cuantía de acero.

Zona 1

Momento que cubrir:

$$54.09 - 20.38 = 33.71 \text{ t} - \text{m}$$

$$As_1 \text{ Calculado} = 16.87 \text{ cm}^2$$

Expresado como varillas $\phi 16$:

$$As_1 \text{ Asumido} \approx 9 \text{ varillas } \phi 16 = 18.1 \text{ cm}^2$$

Para el As asumido que se colocará, el momento que será capaz de absorber la zapata será de:

$$Mu_1 = 36.06 \text{ t} - \text{m}$$

Superior al momento calculado en primera instancia de 33.71 t-m.

El espaciamiento será de:

$$S = \frac{1 - 0,0016 / 2}{9} = 0.11 \text{ m} \approx 10 \text{ cm}$$

Zona 2

Momento que cubrir:

$$21.79 - 20.38 = 1.41 \text{ t} - \text{m}$$

$$As_2 \text{ Calculado} = 0.68 \text{ cm}^2$$

Expresado como varillas $\phi 16$:

$$As_2 \text{ Asumido} \approx 1 \text{ varilla } \phi 16 = 2.01 \text{ cm}^2$$

Para el As asumido que se colocará, el momento que será capaz de absorber la zapata será de:

$$Mu_2 = 4.15 \text{ t} - \text{m}$$

Superior al momento calculado en primera instancia de 1.41 t-m.

El espaciamiento será de:

No se considera espaciamiento dado que es una sola varilla, se colocará en el centro de la sección.

Zona 3

Momento que cubrir:

$$89.09 - 20.38 = 68.70 \text{ t} - m$$

$$As_3 \text{ calculado} = 35.9 \text{ cm}^2$$

Expresado como varillas $\phi 20$:

$$As_1 \text{ Asumido} \approx 12 \text{ varillas } \phi 20 = 37.7 \text{ cm}^2$$

Para el As asumido que se colocará, el momento que será capaz de absorber la zapata será de:

$$Mu_1 = 71.84 \text{ t} - m$$

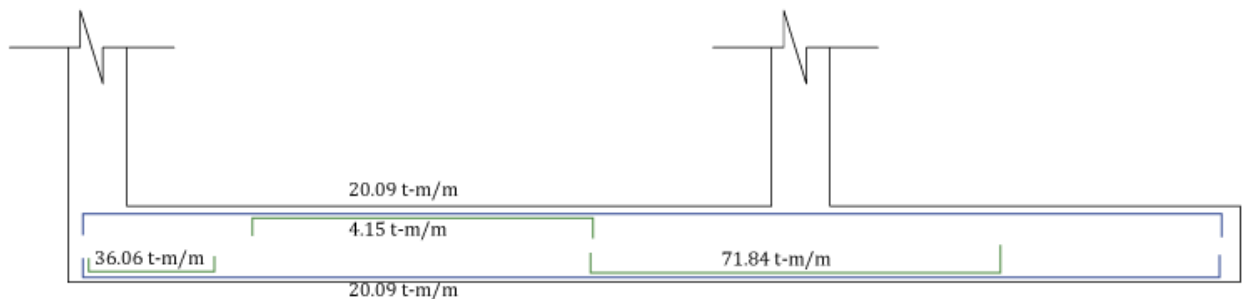
Superior al momento calculado en primera instancia de 68.70 t-m.

El espaciamiento será de:

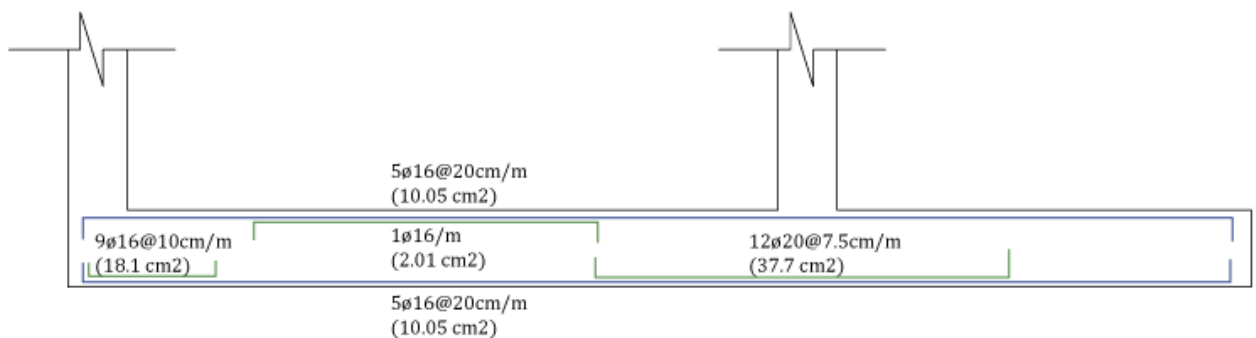
$$S = \frac{1 - 0.002 / 2}{12} = 0.0825 \text{ m} \approx 7.5 \text{ cm}$$

Esquema de armado:

En términos de momentos:



En términos de acero de refuerzo:



8. Conclusiones

- Las diferencias entre los resultados del método matricial de la rigidez y los calculados por el programa SAP2000 se deben a que este software considero 6 grados de libertad para cada nodo mientras que nosotros 3.
- Se puede apreciar como zonas bajo columnas, las cuales transfieren fuerzas axiales a la zapata, poseen un flector positivo mayor en comparación a otros puntos y de igual manera un flector negativo en las zonas en medio de columnas en sentido de la longitud de la zapata, esto tomando como referencia los modelos 3 y 6 que son los más exactos como elemento frame y shell respectivamente, esto se debe al mayor esfuerzo inducido por las columnas y la reacción del suelo respectivamente
- La deformación absoluta está relacionado con lo mucho que se desplazan los puntos de la estructura de su posición original mientras que la relativa está relacionado con el desplazamiento relativo entre puntos del mismo elemento. Es importante no confundir estos dos conceptos, una zapata muy rígida podría parecer no tener una deformación relativa significativa pero esto puede significar que el suelo es representado como resortes ya ha fallado debido a lo mucho que se comprimió y por lo tanto esforzó.