

---

# **ANÁLISIS Y DISEÑO DE ALCANTARILLAS TIPO CAJÓN DE CONCRETO ARMADO CON AASHTO 2014**

---

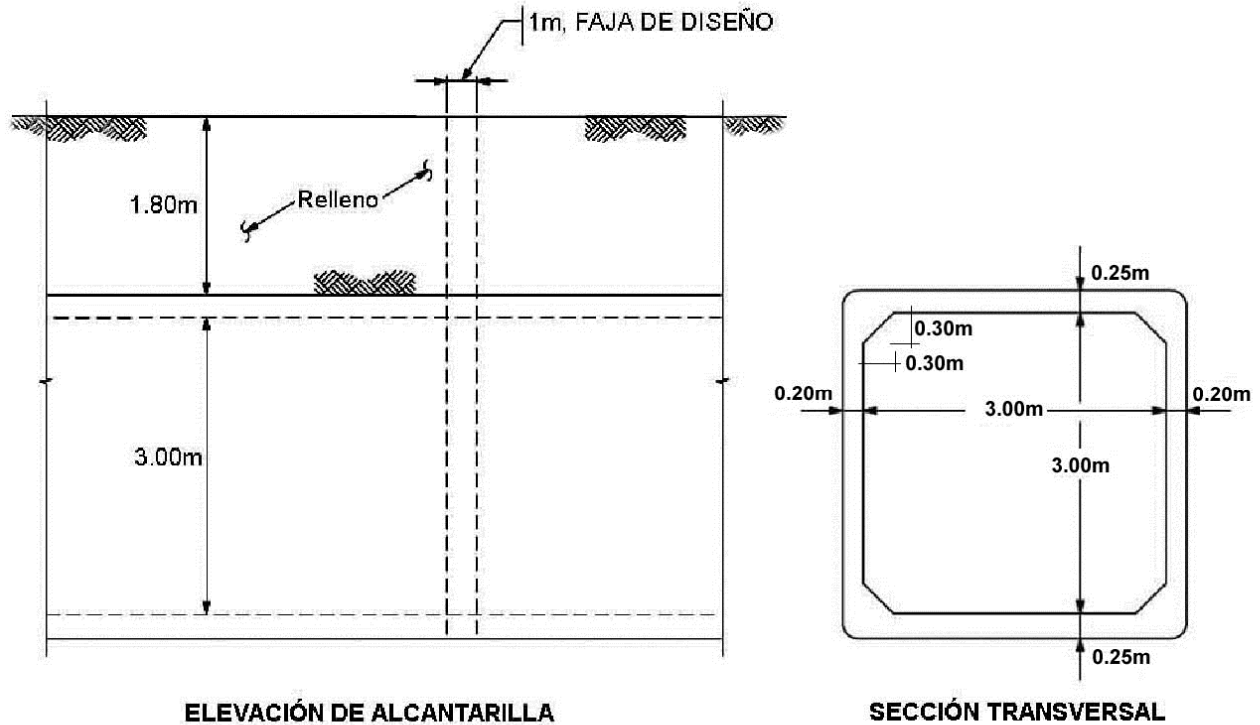
**Por: MSc. ING. ARTURO RODRÍGUEZ SERQUÉN**

[ing\\_ars@hotmail.com](mailto:ing_ars@hotmail.com)

(Página en blanco)

## ALCANTARILLAS

Efectuar el diseño de la alcantarilla mostrada. El peso del material de relleno sobre la alcantarilla es  $2000\text{kg/m}^3$ , ángulo de fricción interna  $\phi = 21.5^\circ$ .



### CARGAS EN LA ALCANTARILLA (en fajas de 1 m. de ancho)

#### 1) Carga muerta (DC)

Peso propio de losa superior:

$$w = 0.25\text{m} \times 1.00\text{m} \times 2,400\text{kg/m}^3 = 600 \text{ kg/m}$$

$$P_{\text{losa sup}} = 600\text{kg/m} \times 3.20\text{m} = 1,920 \text{ kg}$$

Peso propio de cada pared lateral:

$$P_{\text{pared lat}} = 0.20\text{m} \times 3.25\text{m} \times 1.0\text{m} \times 2,400\text{kg/m}^3 = 1,560 \text{ kg}$$

Peso propio de una cartela:

$$P_{\text{cartela}} = \frac{1}{2} \times 0.30\text{m} \times 0.30\text{m} \times 1.0\text{m} \times 2,400\text{kg/m}^3 = 108 \text{ kg}$$

Peso propio de losa de fondo: No se aplica en razón de ser directamente soportada por el terreno.

Carga distribuida sobre el terreno por el peso propio de la alcantarilla:

$$DC_{\text{fondo}} = (1,920 + 2 \times 1,560 + 4 \times 108)\text{kg} / 3.20\text{m} = 1,710 \text{ kg/m}$$

## 2) Presión Vertical del Terreno (EV)

Se calcula previamente el factor  $F_e$  para tener en cuenta la interacción suelo-estructura:

$$F_e = 1 + 0.20 \left[ \frac{H}{B_c} \right] \leq 1.15 \quad (12.11.2.2.1-2, \text{AASHTO LRFD y } 12.11.2.2.1, \text{AASHTO LRFD})$$

$$F_e = 1 + 0.20 \left[ \frac{1.80\text{m}}{3.40\text{m}} \right] = 1.106 < 1.15$$

donde:

$F_e$  = factor de interacción suelo-estructura para elementos enterrados

$H$  = profundidad del relleno (m) = 1.80m

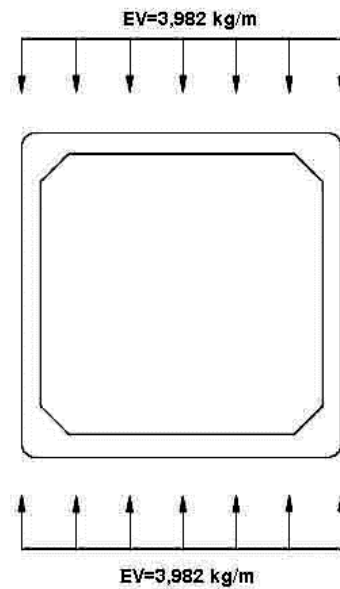
$B_c$  = ancho exterior de la alcantarilla (m) = 3.40m

Presión del terreno en la parte superior de la alcantarilla:

$$EV = F_e \cdot \gamma \cdot H \quad (12.11.2.2.1-1, \text{AASHTO LRFD})$$

$$EV = 1.106(2,000\text{kg/m}^3)(1.80\text{m}) = 3,982\text{kg/m}^2$$

Asumiendo que la losa de fondo es rígida comparada a la sub-base, las reacciones del suelo a las cargas verticales aplicadas a la alcantarilla se consideran uniformemente distribuidas en el fondo de la losa.



**PRESIÓN VERTICAL DEL RELLENO Y REACCIÓN DEL TERRENO**

## 3) Presión horizontal del terreno (EH) (3.11.5)

El coeficiente de empuje lateral activo (teoría de Rankine) para un ángulo de fricción interna del terreno  $\phi = 21.5^\circ$ , es:

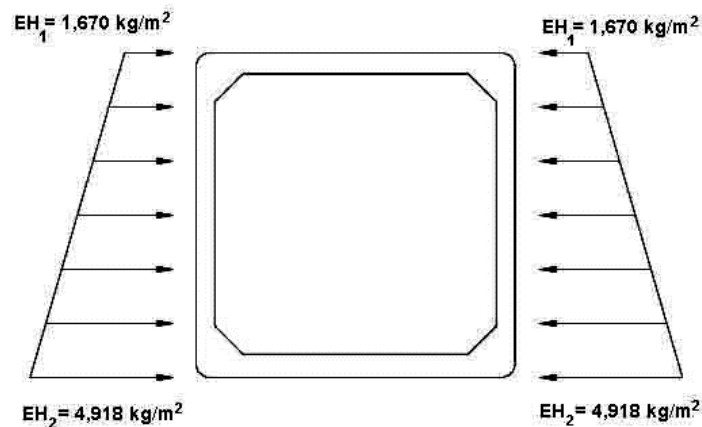
$$k_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 0.464$$

Presión lateral del terreno en la parte superior de la alcantarilla:

$$EH_1 = k_a \cdot \gamma \cdot H_1 = 0.464(2,000 \text{ kg/m}^3)(1.80 \text{ m}) = 1,670 \text{ kg/m}^2$$

Presión lateral del terreno en la parte inferior de la alcantarilla:

$$EH_2 = k_a \cdot \gamma \cdot H_2 = 0.464(2,000 \text{ kg/m}^3)(5.30 \text{ m}) = 4,918 \text{ kg/m}^2$$



#### PRESIÓN HORIZONTAL DEL TERRENO

#### 4) Sobrecarga por carga viva (LS) (3.11.6.4)

Carga lateral en la parte superior de la alcantarilla

De la Tabla 3.11.6.4-1, por interpolación, para una altura medida desde la losa superior hasta el borde superior del terreno de 1.80m, la altura equivalente de terreno es:

$$h_{eq} = 1.14 \text{ m}$$

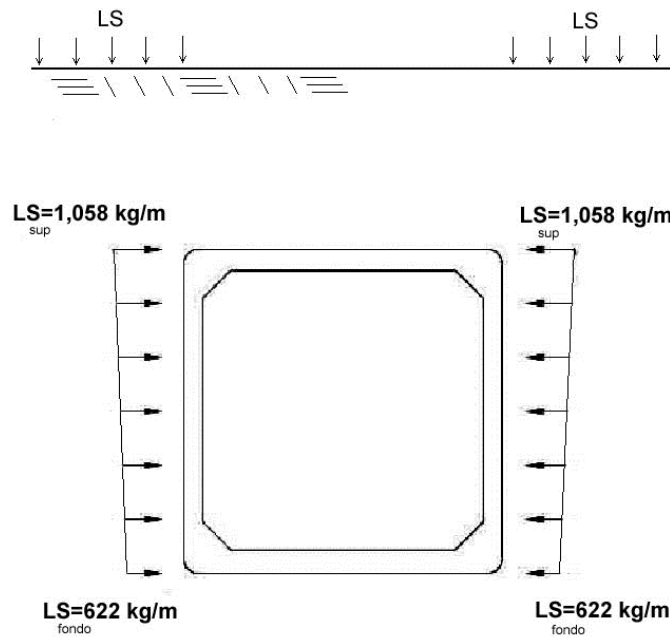
$$\begin{aligned} \text{Luego: } LS_{sup} &= k_a \cdot \gamma_t \times h_{eq} \times 1 \text{ m} \\ &= 0.464 \times 2,000 \text{ kg/m}^3 \times 1.14 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 1,058 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

Carga lateral en el fondo de la alcantarilla

Interpolando para una altura de 5.3m, la altura de terreno equivalente es:

$$h_{fondo} = 0.67 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Luego: } LS_{fondo} &= k_a \cdot \gamma_t \times h_{eq} \times 1 \text{ m} \\ &= 0.464 \times 2,000 \text{ kg/m}^3 \times 0.67 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 622 \text{ kg/m} \end{aligned}$$



PRESIÓN HORIZONTAL DEL TERRENO POR CARGA (LS)

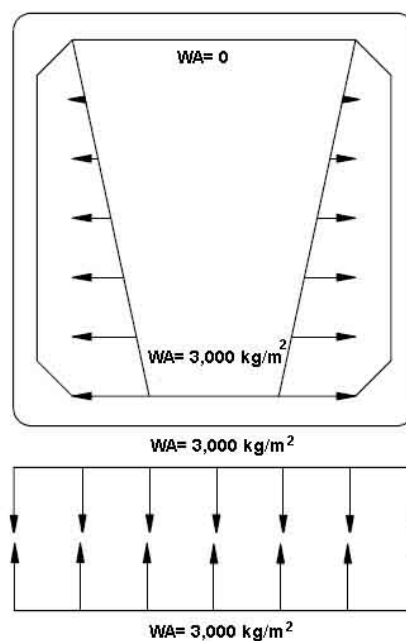
### 5) Carga de Agua (WA) (3.7.1, AASHTO LRFD)

En este caso necesitamos considerar dos casos de carga: alcantarilla colmada de agua y alcantarilla vacía.

Al interior de la alcantarilla, cuando la alcantarilla está colmada, en la parte superior la presión del agua es cero. En el fondo de la alcantarilla, la presión del agua es:

$$WA = \gamma h = (1,000 \text{ kg/m}^3)(3.0 \text{ m}) = 3,000 \text{ kg/m}^2$$

La zona del suelo en la parte inferior de la alcantarilla reacciona con una presión semejante.



CARGA DE AGUA EN ALCANTARILLA

**6) Carga Viva (LL+IM)** (3.6.1.3.3, AASHTO LRFD)

El factor de carga dinámica (IM) para el caso de elementos enterrados es:

$$IM = 33[-0.4 I(D_E)] \geq 0 \quad (3.6.2.2-1, \text{AASHTO LRFD})$$

$$IM = 33[-0.4 I(1.80)] = 8.65\%$$

Siendo  $D_E = 1.80\text{m}$ , la profundidad del relleno sobre la alcantarilla.

**6.1) Carga de camión HL-93 (una vía cargada):**

El Art. 3.6.1.2.6 AASHTO-LRFD indica que si la profundidad del relleno es menor que 0.60m, la sobrecarga se analiza con anchos de franja equivalente (4.6.2.10).

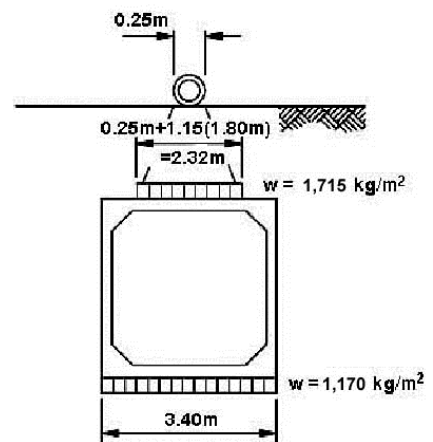
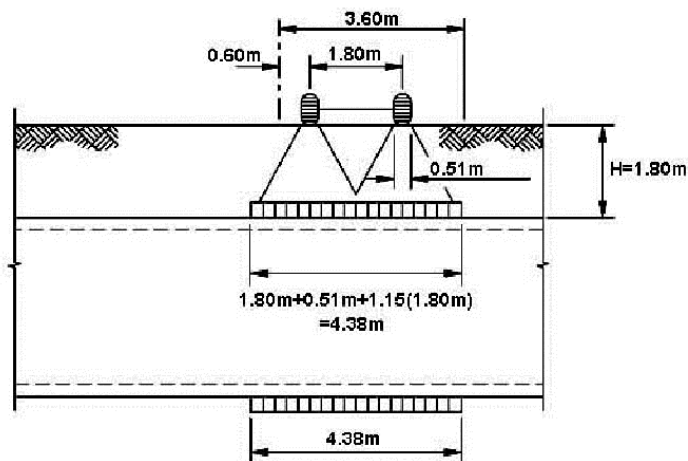
El Art. 3.6.1.2.5 AASHTO-LRFD establece que si la profundidad del relleno es mayor que 0.60m, se puede considerar que las cargas de las ruedas están uniformemente distribuidas en un área rectangular cuyos lados son iguales a la dimensión del área de contacto de los neumáticos, más 1.15 veces la profundidad del relleno en el caso de rellenos granulares seleccionados, o la profundidad del relleno en todos los demás casos. El área de contacto de una rueda se asume como un rectángulo simple de ancho 0.51m y longitud 0.25m. Si las áreas de varias ruedas se superponen, la carga total se deberá distribuir uniformemente en el área. Para las alcantarillas de un solo tramo los efectos de la sobrecarga se pueden despreciar si la profundidad del relleno es mayor que 2.4m y mayor que la longitud del tramo; para las alcantarillas de múltiples tramos estos efectos se pueden despreciar si la profundidad del relleno es mayor que la distancia entre las caras de los muros extremos.

En este caso, con la consideración del factor de presencia múltiple  $m = 1.2$  (Tabla 3.6.1.1.2-1, AASHTO LRFD), se tiene:

$$w_{LL} = \frac{P_{eje}(m)}{\text{Área de influencia}} = \frac{14.52T(1.2)}{4.38\text{m} \times 2.32\text{m}} = 1,715 \text{ kg/m}^2$$

La reacción en el terreno será:

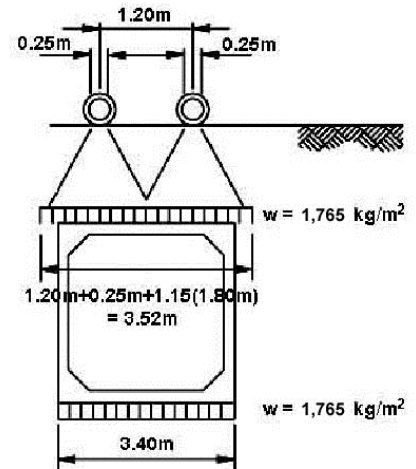
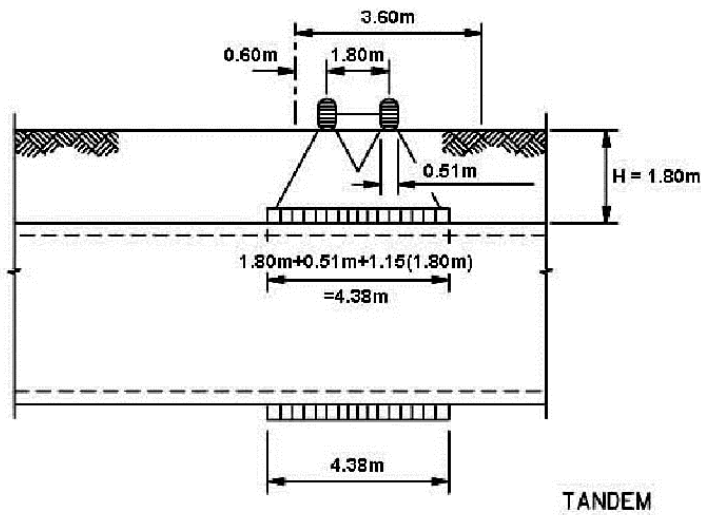
$$w = \frac{1,715 \text{ kg/m}^2 \times 2.32\text{m}}{3.40\text{m}} = 1,170 \text{ kg/m}^2$$



**CARGA DE CAMIÓN (1 vía cargada)**

### 6.2) Carga de Tandem (una vía cargada):

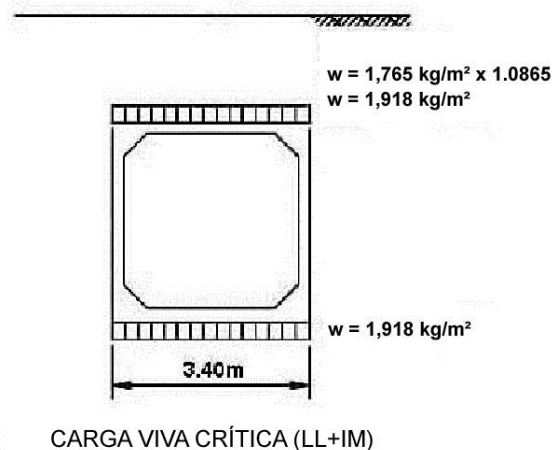
$$w_{LL} = \frac{P_{eje}(m)}{\text{Área de influencia}} = \frac{22.68T(1.2)}{4.38m \times 3.52m} = 1,765 \text{ kg/m}^2$$



### 6.3) Sobrecarga de vía

En este caso no es aplicable. Las especificaciones AASHTO señalan (3.6.1.3.3) que para losas superiores de alcantarillas incluyendo los puentes tipo losa con tramos principales en la dirección longitudinal, cuando el tramo no excede 4.5m, sólo se aplican las cargas de eje del camión o del tandem.

Como se aprecia, la carga de tandem es mayor que la del camión por lo que la usaremos afectada del factor de carga dinámica (IM) para el diseño por Resistencia y Carga de Servicio:





### COMBINACIONES DE CARGA

Para los estados límites de Resistencia y Servicio, los casos que se muestran son considerados. El caso de fatiga no necesita ser investigado en alcantarillas tipo cajón de concreto reforzado (5.5.3).

Las combinaciones de carga para el estado límite de Resistencia I que se han tomado en cuenta, son (con  $n=1$ ):

1.  $U = 1.0[1.25DC + 1.3EV + 1.35EH + 1.75(LL+IM) + 1.75LS]$  (cargas verticales y horizontales máximas)
2.  $U = 1.0[0.9DC + 0.9EV + 1.35EH + 1.75LS]$  (cargas verticales mínimas, horizontales máximas)
- 3a.  $U = 1.0[1.25DC + 1.3EV + 0.9EH + 1.75(LL+IM) + 1.0WA]$  (cargas verticales máximas, horizontales mínimas, alcantarilla con agua)
- 3b.  $U = 1.0[1.25DC + 1.3EV + 0.9EH + 1.75(LL+IM)]$  (cargas verticales máximas, horizontales mínimas, alcantarilla sin agua)

Combinaciones de carga para el estado límite de Servicio I:

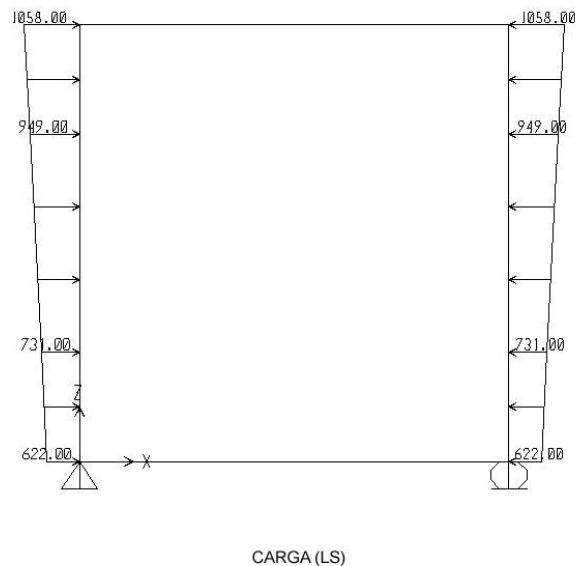
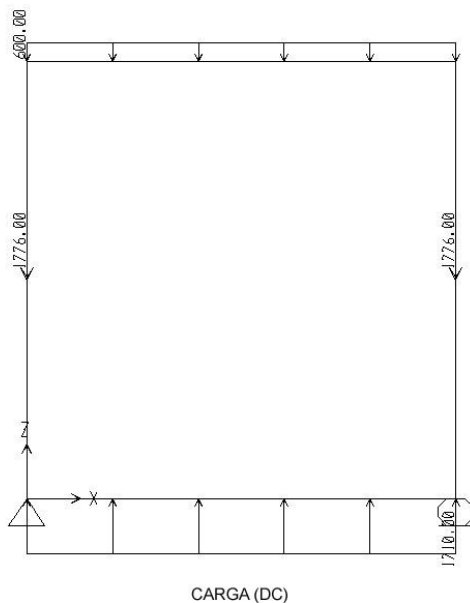
4.  $U = DC + EV + EH + (LL+IM) + LS$  (cargas verticales y horizontales máximas)
5.  $U = DC + EV + EH + LS$  (cargas verticales mínimas, horizontales máximas)
- 6a.  $U = DC + EV + EH + (LL+IM) + WA$  (cargas verticales máximas, horizontales mínimas, alcantarilla con agua)
- 6b.  $U = DC + EV + EH + (LL+IM)$  (cargas verticales máximas, horizontales mínimas, alcantarilla sin agua)

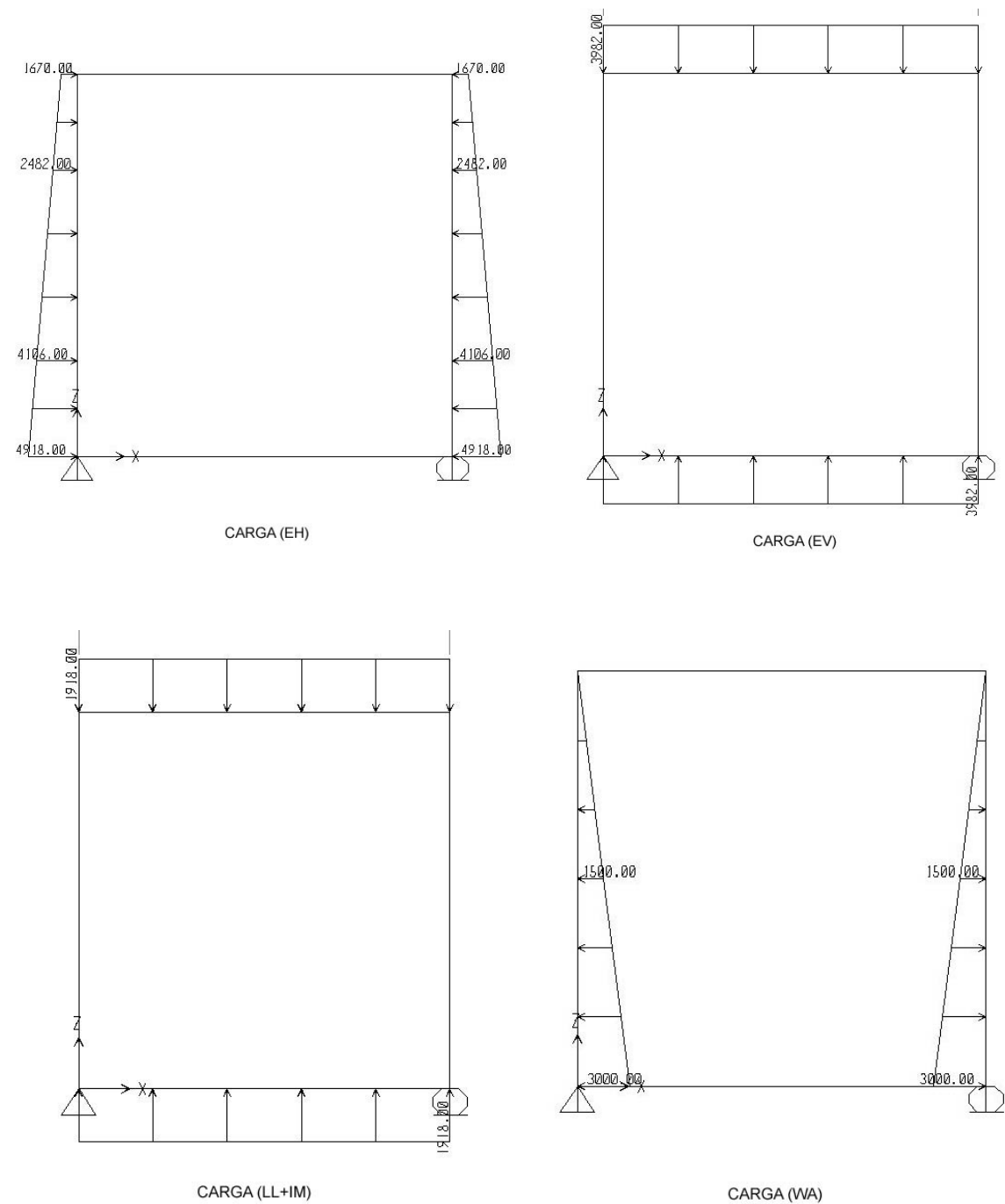
### ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ALCANTARILLA

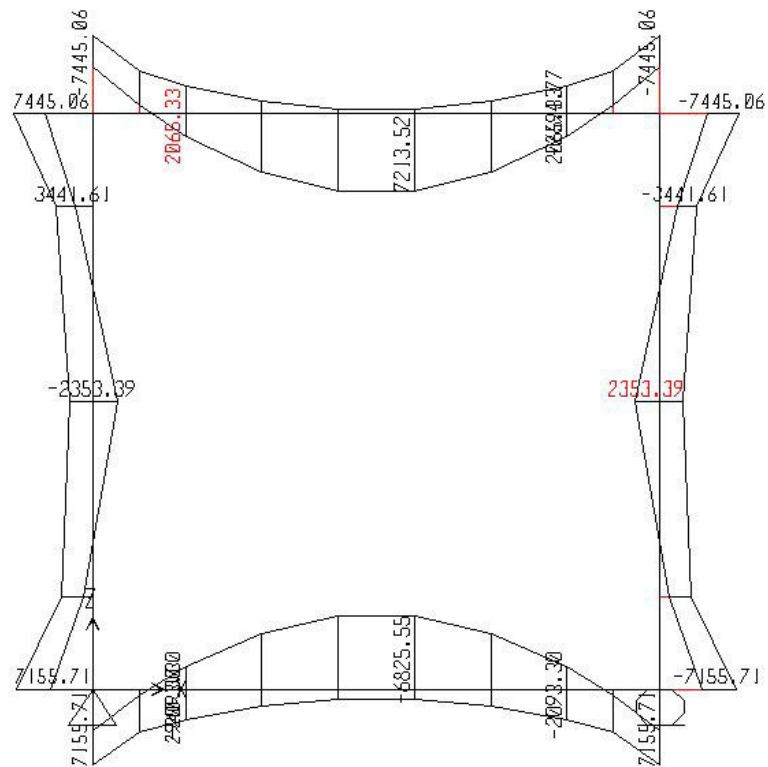
Para el análisis estructural se ha considerado que la losa de fondo de la alcantarilla es rígida con respecto al suelo. Deberá según sea el caso adoptarse esta u otra consideración al respecto.

Se ha hecho uso del programa SAP2000 y considerando los acartelamientos. Los estados de carga y los resultados expresados en envolventes, se muestran a continuación.

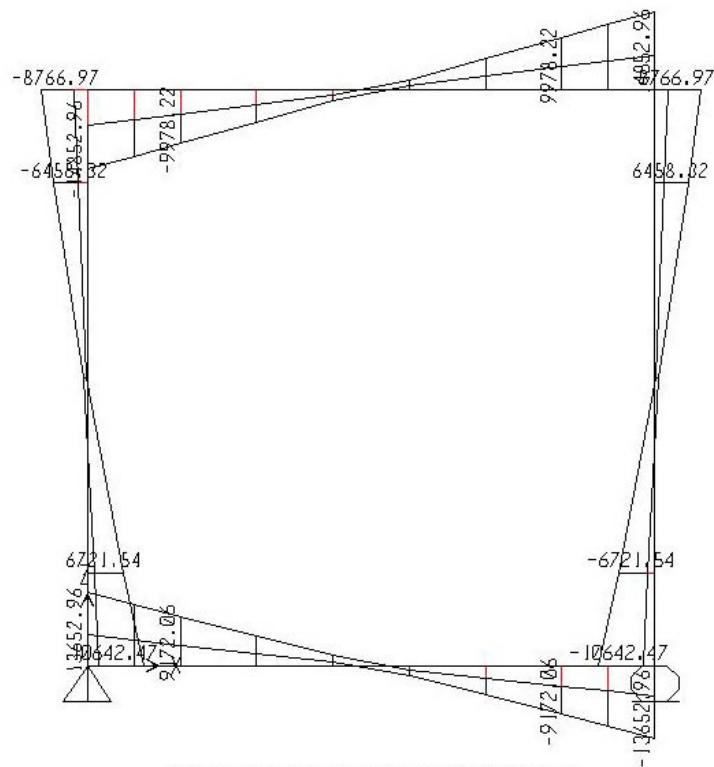
#### Estados de carga



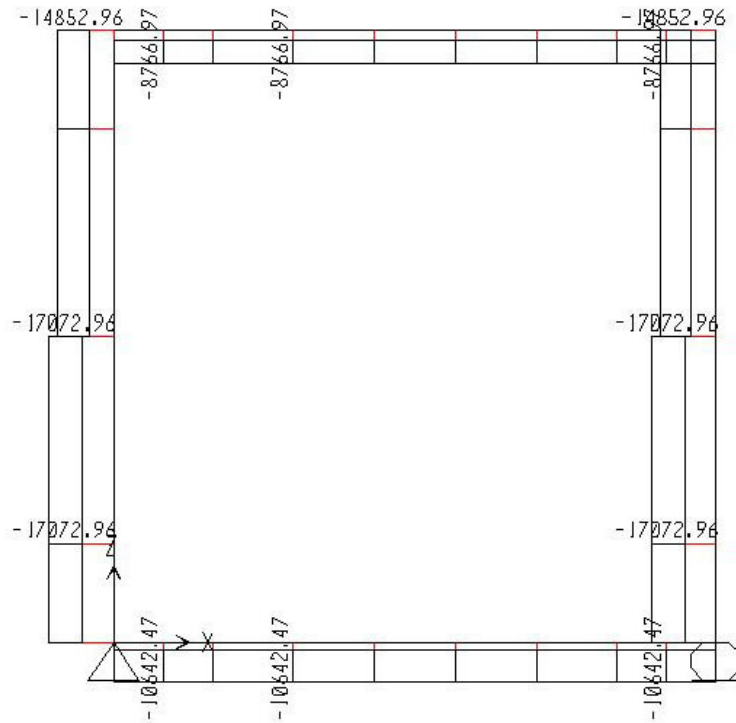


Resultados: Diagramas de Envolventes

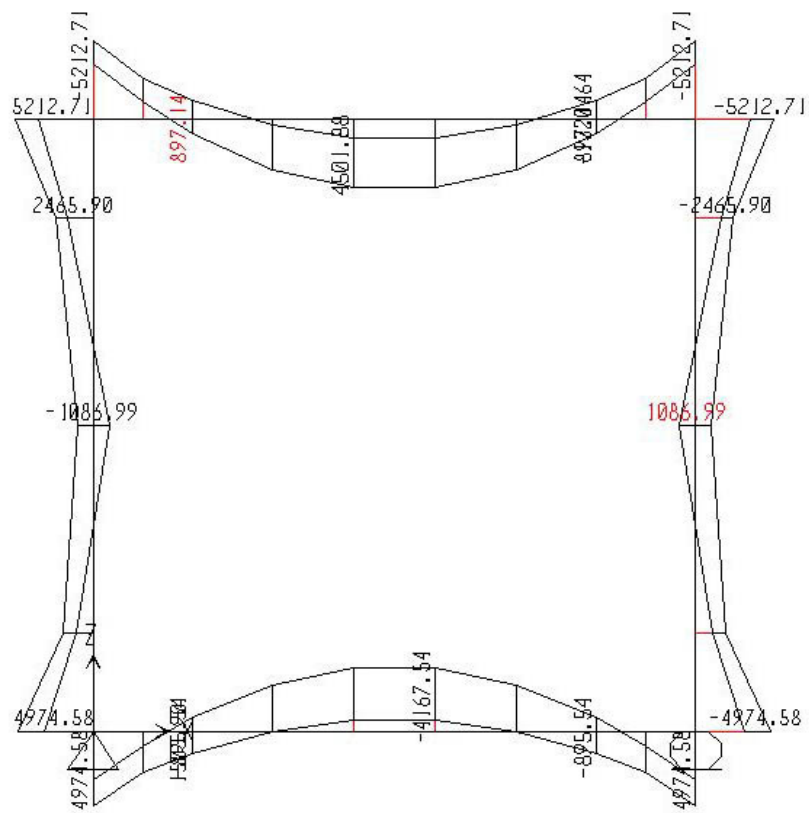
ENVOLVENTE DE MOMENTOS FLECTORES (RESISTENCIA I)



ENVOLVENTE DE CORTANTE (RESISTENCIA I)



ENVOLVENTE DE CARGA AXIAL (RESISTENCIA I)



ENVOLVENTE DE MOMENTO (SERVICIO I)

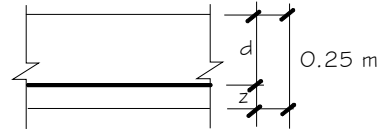
**CÁLCULO DEL ACERO****Losa superior, acero positivo**

Utilizando la envolvente de momentos para el estado límite de Resistencia I, se tiene que  $(+)M_u = 7.214 \text{ T-m}$

Con  $A_s \text{ } \varnothing 5/8''$  y recubrimiento  $r = 5 \text{ cm}$ : (Tabla 5.12.3-1)

$$z = 5 + \frac{1.587}{2} = 5.79 \text{ cm}$$

$$d = 25 \text{ cm} - 5.79 \text{ cm} = 19.21 \text{ cm}$$



$$A_s = \frac{M_u}{0.9 f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)} = \frac{7.214 \times 10^5}{0.9 \times 4200 \left(19.21 - \frac{a}{2}\right)} = 10.43 \text{ cm}^2$$

$$a = \frac{A_s \times 4200}{0.85 \times 280 \times 100} = 1.84 \text{ cm}$$

La separación sería:  $s = \frac{2}{10.43} = 0.19 \text{ m}$ , es decir  $1 \varnothing 5/8'' @ 0.19 \text{ m}$

Ahora, como  $c = a/\beta_1 = 1.84 \text{ cm}/0.85 = 2.16 \text{ cm}$

$$\phi = 0.65 + 0.15 \left( \frac{d_t}{c} - 1 \right) \leq 0.90 \quad (5.5.4.2.1-2 \text{ y Fig. C5.5.4.2.1-1})$$

$$\phi = 0.65 + 0.15 \left( \frac{19.21 \text{ cm}}{2.16 \text{ cm}} - 1 \right) = 1.83 > 0.9$$

Luego,  $\phi = 0.9$  como lo supuesto.

**As máximo**

(Art. 5.7.3.3.1)

Las actuales disposiciones AASHTO LRFD eliminan este límite.

**As mínimo**

(Art. 5.7.3.3.2)

Siendo una alcantarilla vaceada en el lugar, la cantidad de acero proporcionado debe ser capaz de resistir el menor valor de  $M_{cr}$  y  $1.33M_u$ :

$$a) M_{cr} = 1.1 f_r S = 1.1 (33.63 \text{ kg/cm}^2) (10,417 \text{ cm}^3) = 3.85 \text{ T-m}$$

Siendo:

$$f_r = 2.0 \sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 = 2.0 \sqrt{280} = 33.63 \text{ kg/cm}^2$$

$$S = bh^2/6 = 100(25)^2/6 = 10,417 \text{ cm}^3$$

$$b) 1.33 M_u = 1.33(7.214 \text{ T-m}) = 9.59 \text{ T-m}$$

El menor valor es  $3.34 \text{ T-m}$  y la cantidad de acero calculada ( $10.43 \text{ cm}^2$ ) resiste  $M_u = 7.214 \text{ T-m} > 3.85 \text{ T-m}$  OK!

Por flexión es satisfactoria la separación de  $19 \text{ cm}$ , sin embargo como se demuestra en la revisión de fisuración, esta separación no es adecuada.

**Revisión de fisuración por distribución de armadura (Art. 5.7.3.4)**

Para el acero principal positivo:

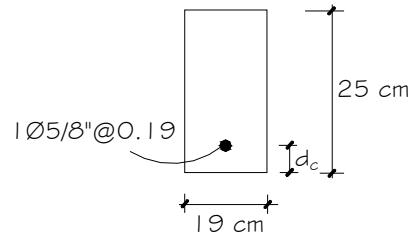
Momento actuante

Usando la sección agrietada, una franja de 0.19m de ancho, y la envolvente para el diseño por estado límite de Servicio I, siendo  $n=1$  :

$$M_s = 4,502 \text{ kg} - \text{m/m} = 4.50 \text{ T} - \text{m/m}$$

Para un ancho tributario de 0.19m:

$$M_s = (4.50 \text{ T-m/m}) (0.17 \text{ m}) = 0.765 \text{ T-m}$$

Ubicación del eje neutro:

$$E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.4.3.2)$$

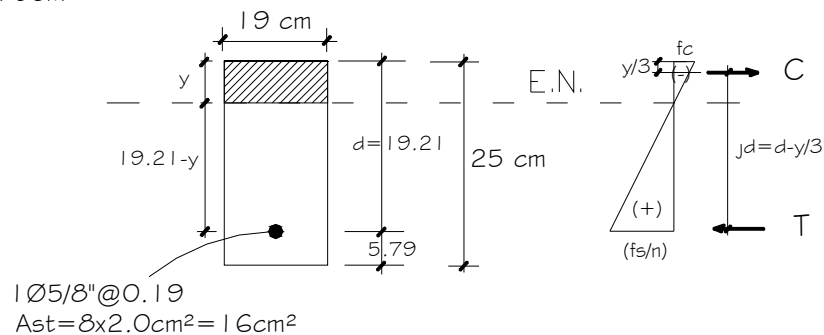
$$E_c = 15,300 \sqrt{f'_c} = 15,300 \sqrt{280} = 256,018 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.4.2.4-1)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2}{256,018 \text{ kg/cm}^2} = 8$$

$$d_c = \text{recub} + \frac{\varnothing}{2}$$

$$d_c = 5 \text{ cm} + \frac{1.587}{2} \text{ cm}$$

$$d_c = 5.79 \text{ cm}$$



Área de acero transformada:

$$A_{st} = \text{relación modular} \times \text{área de acero} = 8(2 \text{ cm}^2) = 16 \text{ cm}^2$$

Momentos respecto del eje neutro para determinar  $y$ :

$$19y (y/2) = 16(19.21 - y)$$

$$y = 4.91 \text{ cm}$$

Esfuerzo del acero bajo cargas de servicio

El brazo  $jd$  entre las cargas es:

$$jd = d - \frac{y}{3} = 19.21 \text{ cm} - \frac{4.91 \text{ cm}}{3} = 17.57 \text{ cm}$$

Luego, el esfuerzo del acero es:

$$f_{ss} = \frac{M_s}{(jd)A_s} = \frac{0.765 \times 10^5}{(17.49)(2)} = 2,434 \text{ kg/cm}^2 \leq 0.6F_y = 2,520 \text{ kg/cm}^2$$

Separación máxima de la armadura

$$s_{\max} = \frac{125,000 \gamma_e}{\beta_s f_{ss}} - 2d_c \quad (5.7.3.4-1)$$

$$\beta_s = 1 + \frac{d_c}{0.7(h - d_c)} = 1 + \frac{5.79}{0.7(25 - 5.79)} = 1.43$$

Con  $\gamma_e = 0.75$  (condición de exposición Clase 2), en tanto las alcantarillas son sub-estructuras expuestas al agua:

$$s_{\max} = \frac{125,000 \gamma_e}{\beta_s f_{ss}} - 2d_c = \frac{125,000(0.75)}{1.43(2,434)} - 2(5.79) = 15.35 \text{ cm} < 19 \text{ cm} \quad \text{N.S.}$$

Luego: **USAR 1Ø5/8" @ 0.15m**

CHEQUEO POR CORTE (Art. 5.14.5.3)En Losa superior:Cortante actuante

Cálculo del peralte efectivo por corte,  $d_v$ :

$$(+ )A_s = 1Ø5/8" \text{ a } 0.15 \text{ m} = \frac{2 \text{ cm}^2}{0.15 \text{ m}} = 13.33 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$\text{Con } a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{13.33(4200)}{0.85(280)(100)} = 3.14 \text{ cm}$$

$$d_v = \left(d - \frac{a}{2}\right) \geq 0.72h \quad (\text{Art. 5.8.2.9})$$

$$\geq 0.90d$$

$$d_v = 19.21 - \frac{3.14}{2} = 17.64 \text{ cm} \geq 0.72(25 \text{ cm}) = 18 \text{ cm}$$

$$\geq 0.90(19.21 \text{ cm}) = 17.3 \text{ cm}$$

Luego  $d_v = 18 \text{ cm}$

A una distancia  $d_v$  desde la intersección de la losa con la cartela:

( $0.10\text{m} + 0.30\text{m} + 0.18\text{m} = 0.58\text{m}$ , desde el eje del muro), el cortante crítico es (Combinación 3a):

$$V_u = 9,562\text{kg}, \text{ asociado a un momento de}$$

$$M_u = 2,424\text{kg-m}$$

Cortante resistente:

Para losas de alcantarilla tipo cajón debajo de  $0.60\text{m}$  a más de relleno, la resistencia de corte se puede calcular como:

$$V_c = \left( 0.568\sqrt{f'_c} + 326.4 \frac{A_s}{b.d_e} \frac{V_u d_e}{M_u} \right) b.d_e \leq 1.06\sqrt{f'_c} b.d_e \quad (5.14.5.3-1)$$

Para alcantarillas tipo cajón de una sola celda:

$$V_c \geq 0.80\sqrt{f'_c} b.d_e \quad (\text{Art. 5.14.5.3})$$

Donde  $\frac{V_u d_e}{M_u} \leq 1.0$

Luego, como:

$$\frac{V_u d_e}{M_u} = \frac{9,562 \times 9.21}{242400} = 0.76 < 1.0$$

$$V_c = \left( 0.568\sqrt{280} + 326.4 \times \frac{13.33}{100 \times 9.21} \times 0.76 \right) \times 100 \times 9.21 \leq 1.06\sqrt{280} \times 100 \times 9.21$$

$$V_c = 21,560\text{kg} < 34,070\text{kg} \quad (5.14.5.3-1)$$

También como:

$$V_c \geq 0.80\sqrt{280} (100)(9.21) = 25,716\text{kg}$$

$$V_c = 25,716\text{kg}$$

$$\text{Luego: } V_u = \phi V_c = 0.90(25,716\text{kg}) = \underline{23,144\text{kg}} > 9,562\text{kg} \text{ OK!}$$

Revisar también por corte la losa inferior y las paredes de la alcantarilla.



**CHEQUEO POR CARGA AXIAL** (Art. 5.7.4)

En las paredes de la alcantarilla:

Carga axial actuante

En las paredes de la alcantarilla la carga axial actuante es (envolvente de carga axial):

$$P_u = 17,073 \text{ kg}$$

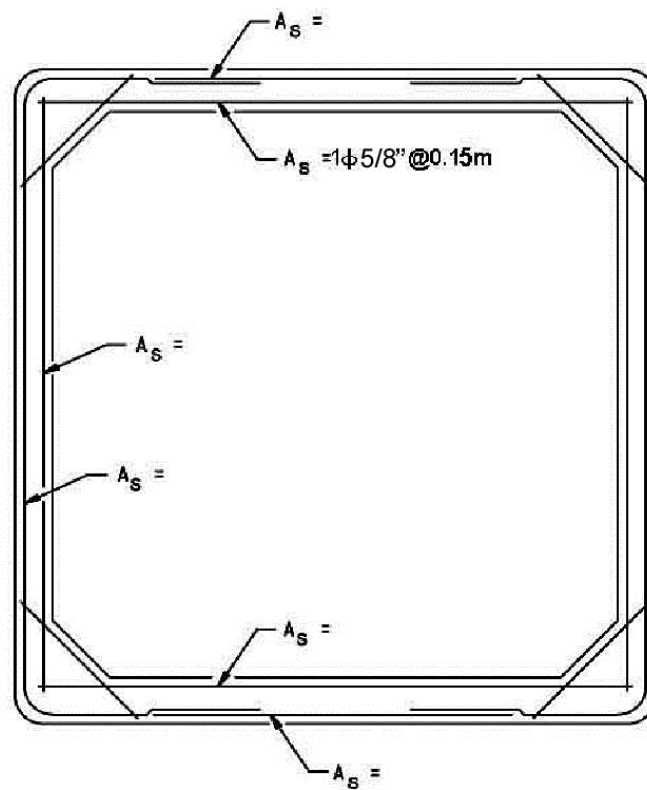
Carga axial resistente:

Cuando la carga axial mayorada es menor que el 10% de la capacidad en compresión nominal de la sección, el diseño por flexión se puede realizar ignorando los efectos de carga axial.

En nuestro caso, con un factor de resistencia por compresión de 0.70 (Art. 5.5.4.2.1 AASHTO LRFD):

$$\begin{aligned} 0.10\phi_c A_g &= 0.10(0.70)(280 \text{ kg/cm}^2)(100 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}) & (5.7.4.5) \\ &= 39,200 \text{ kg} \end{aligned}$$

Luego  $P_u = 17,073 \text{ kg} < 0.10\phi_c A_g$  y se puede ignorar los efectos de carga axial.



**ACERO POSITIVO EN LOSA SUPERIOR**