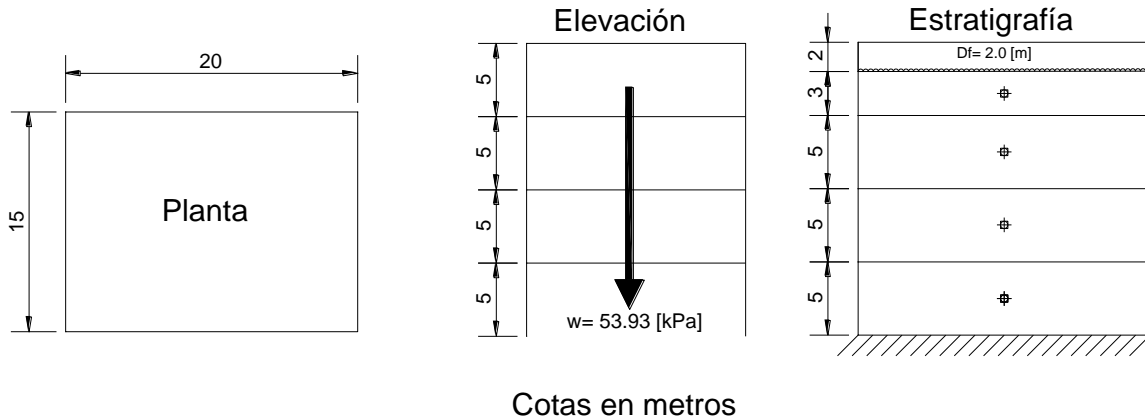


## 6. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Obtener la energía específica de compactación necesaria para que la edificación siguiente, la cual será cimentada por medio de una losa de cimentación, sea soportada por el suelo ensayado y que además dicho suelo alcance un asentamiento no mayor a 2.5 [cm]. Para los cálculos se tomará un factor de seguridad de 3 (propuesta para análisis de fuerzas permanentes).



Resolución:

Para la primera prueba Proctor, tomando como valor de  $\gamma$  el valor obtenido del PVSP y realizando un desplante de 2.0 [m].

Utilizando para la resolución del problema la teoría de Terzaghi, con la siguiente expresión.

$$q_u = \left[ 1 + 0.3 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * c * N_c + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q$$

$$q_a = \frac{\left[ 1 + 0.3 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * c * N_c + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q}{3}$$

Datos:

$$B = 15 \text{ [m]}$$

$$L = 20 \text{ [m]}$$

$$c = 51.66 \text{ [kPa]}$$

$$\phi = 26.5937 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$N_c = 27$$

$$\gamma = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} = 1.644 * 9.779 = 16.076 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$N_\gamma = 12$$

$$\gamma D_f = \sigma'v = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} * h \text{ [m]} = 1.644 * 9.779 * 2 = 32.153 \text{ [kPa]}$$

$$N_q = 15$$

Los parámetros de resistencia  $N_c$ ,  $N_\gamma$  y  $N_q$ , fueron obtenidos a través del siguiente gráfico, de acuerdo al ángulo de fricción del material en la prueba triaxial correspondiente.

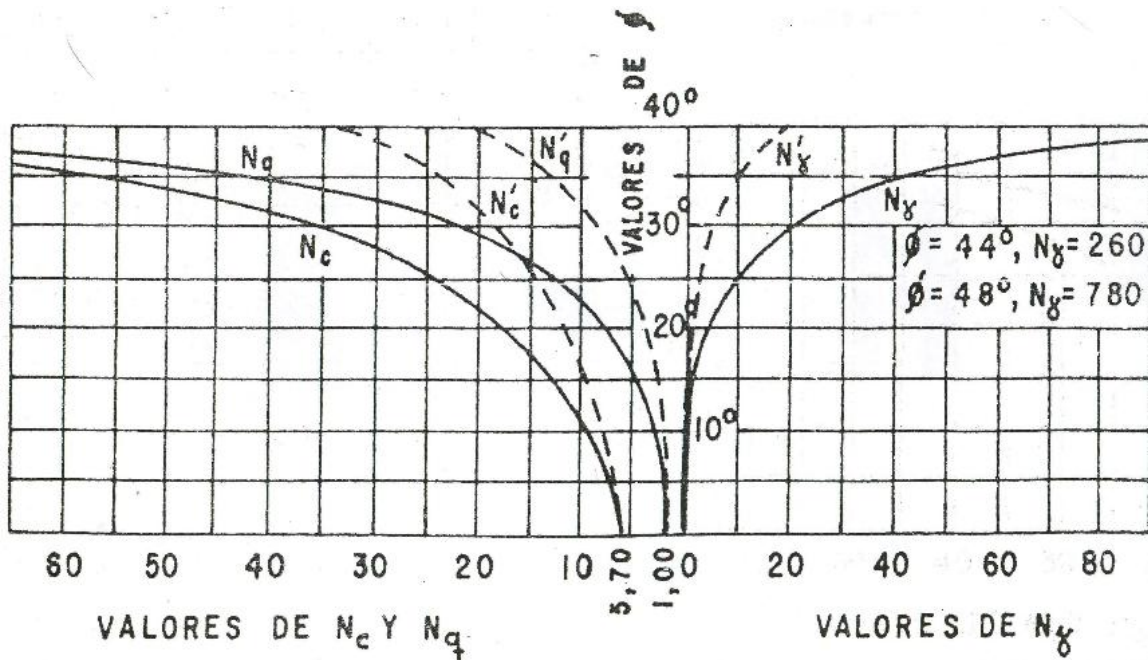


FIG. VII-8. Factores de capacidad de carga para aplicación de la teoría de Terzaghi

$$q_u = \left[ 1 + 0.3 \left( \frac{15}{20} \right) \right] * 51.66 * 27 + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{15}{20} \right) \right] * 16.076 * 15 * 12 + 32.153 * 15$$

$$q_u = 3420.763 \text{ [kPa]}$$

$$q_a = \frac{3420.763 \text{ [kPa]}}{3} = 1140.254 \text{ [kPa]}$$

La capacidad de carga obtenida es mayor a la sollicitación ejercida por la estructura por lo cual dicha edificación si es soportada por la energía Proctor Estándar.

En seguida procederemos a calcular el asentamiento producido por dichas sollicitación en el suelo ensayado.

EL análisis de asentamientos será conforme la teoría presentada en el libro “Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions” del Ing. Leonardo Zeevaert y complementada con la metodología expuesta por el Ing. Ricardo Rubén Padilla en la publicación “Ejercicios de Mecánica de Suelos en sistema internacional de unidades”

El cálculo se realizará para cuatro substratos de suelo, cada uno de ellos con un espesor de 5 [m]

Los valores de  $K_0$  y  $\nu$  fueron obtenidos de tablas en el libro de Zeevaert.

De los gráficos de resistencia obtenidos en la prueba triaxial obtenemos los siguientes módulos de Young.

$$E_{1-0.5} = \frac{150-0}{0.0114-0} = 13157.89 \text{ [kPa]}$$

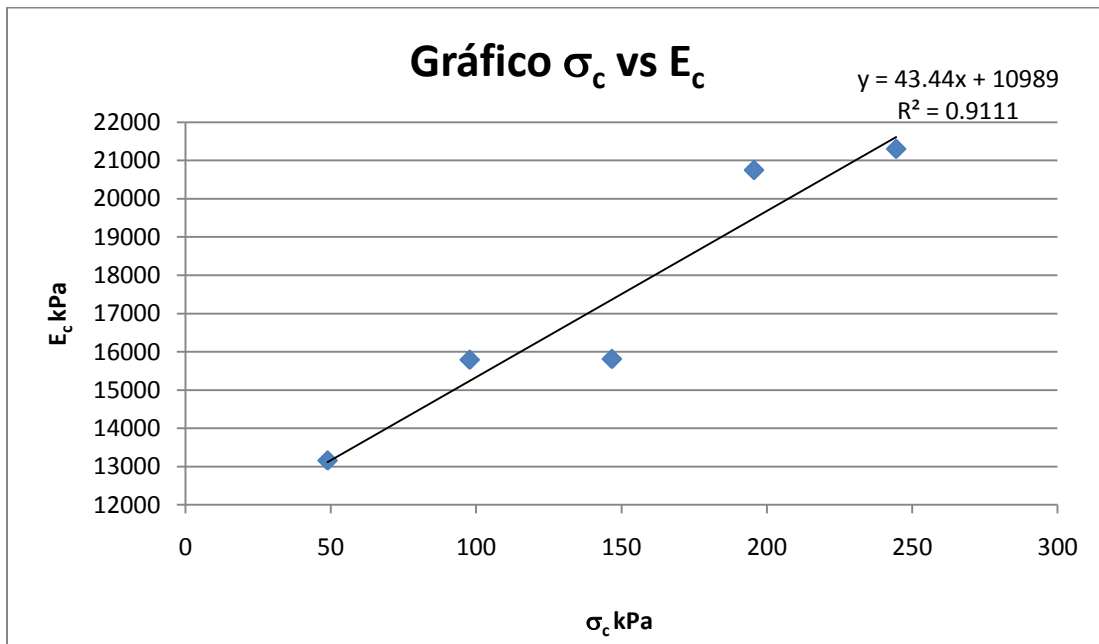
$$E_{1-1.0} = \frac{150-0}{0.0095-0} = 15789.47 \text{ [kPa]}$$

$$E_{1-1.5} = \frac{200-0}{0.01265-0} = 1580.28 \text{ [kPa]}$$

$$E_{1-2.0} = \frac{200-0}{0.00964-0} = 20746.89 \text{ [kPa]}$$

$$E_{1-2.5} = \frac{200-0}{0.00939-0} = 21299.25 \text{ [kPa]}$$

Con estos módulos generamos un gráfico en el cual comparamos esfuerzos de confinamiento con módulos de Young.



Primer Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.644 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 3.5 \text{ [m]} = 56.268 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (56.268) = 33.010 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 1 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=1.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (13.426) = 53.704 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (53.704) = 31.506 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 33.412 + \frac{1}{2} 31.506 = 48.763 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 43.44(48.763) + 10989 = 13107.265 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del subestrato

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{53.704}{13107.265} * 0.8003 * 3 = 0.00984 \text{ [m]} = 0.984 \text{ [cm]}$$

Segundo Estrato.

Calculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.644 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 7.5 [\text{m}] = 120.575 [\text{kPa}]$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (120.575) = 70.737 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 2 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x= 10 \quad y= 7.5 \quad z= 5.5 \quad q_0= 53.93 [\text{kPa}] \quad \Delta\sigma_v = 4 * (11.723) = 46.892 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (46.892) = 27.510 [\text{kPa}]$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 70.737 + \frac{1}{2} 27.510 = 84.492 [\text{kPa}]$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 43.44(84.492) + 10989 = 14659.332 [\text{kPa}]$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del subestrato

$$\Delta H = \frac{\Delta \sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{46.892}{14659.332} * 0.8003 * 5 = 0.0128 \text{ [m]} = 1.28 \text{ [cm]}$$

Tercer Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.644 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 12.5 \text{ [m]} = 200.958 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (200.958) = 117.895 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 3 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta \sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=10.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta \sigma_v = 4 * (7.996) = 31.984 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta \sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta \sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (31.984) = 18.764 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta \sigma_c = 117.895 + \frac{1}{2} 18.764 = 127.277 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 43.44(127.277) + 10989 = 16517.913 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del subestrato

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{31.984}{16517.913} * 0.8003 * 5 = 7.749 \times 10^{-3} \text{ [m]} = 0.775 \text{ [cm]}$$

Cuarto Estrato.

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.644 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 17.5 \text{ [m]} = 281.342 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial.

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (281.342) = 165.054 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 4 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=15.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (5.209) = 20.836 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (20.836) = 12.224 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 165.054 + \frac{1}{2} 12.224 = 171.116 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 43.44(171.116) + 10989 = 18424.451 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{20.836}{18424.451} * 0.8003 * 5 = 0.00452 \text{ [m]} = 0.452 \text{ [cm]}$$

Realizando la sumatoria de los estratos antes calculados vemos que

$$\Delta H_{total} = \sum_{j=1}^n \Delta H_j$$

$$\Delta H_{total} = 0.984 + 1.280 + 0.775 + 0.452 = 3.49 \text{ [cm]}$$

$$3.49 \text{ [cm]} > 2.5 \text{ [cm]}$$

Por lo tanto con esta energía de compactación no cumplimos con el asentamiento límite.

Se realiza el cálculo para la segunda energía de compactación.

Utilizando para la resolución del problema la teoría de Terzaghi, con la siguiente expresión.

$$q_u = \left[ 1 + 0.3 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * c * N_c + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q$$



$$q_a = \frac{\left[1 + 0.3 \left(\frac{B}{L}\right)\right] * c * N_c + \left[0.5 - 0.1 \left(\frac{B}{L}\right)\right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q}{3}$$

Datos:

$$B = 15 \text{ [m]}$$

$$L = 20 \text{ [m]}$$

$$c = 80.56 \text{ [kPa]}$$

$$\phi = 28.6601 \text{ [°]}$$

$$N_c = 29$$

$$\gamma = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} = 1.725 * 9.779 = 16.868 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$N_\gamma = 16$$

$$\gamma D_f = \sigma'_v = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} * h \text{ [m]} = 1.725 * 9.779 * 2 = 33.737 \text{ [kPa]}$$

$$N_q = 17$$

$$q_u = \left[1 + 0.3 \left(\frac{15}{20}\right)\right] * 80.56 * 29 + \left[0.5 - 0.1 \left(\frac{15}{20}\right)\right] * 16.868 * 16 * 15 + 33.737 * 17$$

$$q_u = 5156.047 \text{ [kPa]}$$

$$q_a = \frac{5156.047 \text{ [kPa]}}{3} = 1718.682 \text{ [kPa]}$$

Seguimos estando por arriba del valor de sollicitación de la estructura por lo tanto dicha energía de compactación puede ser utilizada en esta ocasión.

Ahora realizaremos el cálculo del asentamiento.

De los gráficos de resistencia obtenidos en la prueba triaxial obtenemos los siguientes módulos de Young.

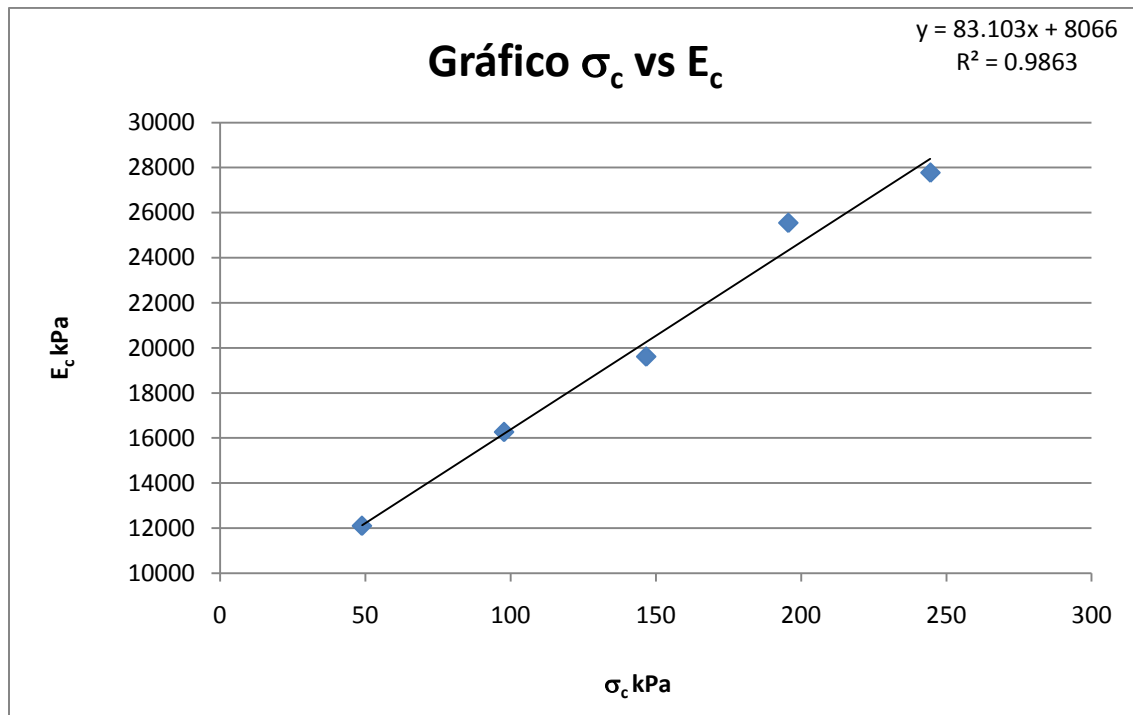
$$E_{2-0.5} = \frac{150-0}{0.0124-0} = 12096.774 \text{ [kPa]}$$

$$E_{2-1.0} = \frac{200-0}{0.0123-0} = 16260.163 \text{ [kPa]}$$

$$E_{2-1.5} = \frac{200-0}{0.0102-0} = 19607.84 \text{ [kPa]}$$

$$E_{2-2.0} = \frac{200-0}{0.00783-0} = 25542.78 \text{ [kPa]}$$

$$E_{2-2.5} = \frac{200-0}{0.00720-0} = 27772.00 \text{ [kPa]}$$



Primer Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.725 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 3.5 [\text{m}] = 59.041 [\text{kPa}]$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (59.041) = 34.637 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 1 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x= 10 \quad y= 7.5 \quad z= 1.5 \quad q_0= 53.93 [\text{kPa}] \quad \Delta\sigma_v = 4 * (13.426) = 53.704 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (53.704) = 31.506 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 34.637 + \frac{1}{2} 31.506 = 50.390 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 83.103(50.390) + 8066 = 12253.560 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{53.704}{12253.560} * 0.8003 * 3 = 0.0105 \text{ [m]} = 1.05 \text{ [cm]}$$

Segundo Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.725 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 7.5 \text{ [m]} = 126.516 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (126.516) = 74.223 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 2 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=5.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (11.723) = 46.892 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (46.892) = 27.510 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 74.223 + \frac{1}{2} 27.510 = 87.978 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 83.103 * (87.978) + 8066 = 15377.236 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del substrato

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{46.892}{15377.236} * 0.8003 * 5 = 0.0122 \text{ [m]} = 1.22 \text{ [cm]}$$

### Tercer Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.725 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 12.5 \text{ [m]} = 210.860 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial.

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (210.860) = 123.704 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 3 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x= 10 \quad y= 7.5 \quad z= 10.5 \quad q_0= 53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (7.996) = 31.984 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (31.984) = 18.764 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 123.704 + \frac{1}{2} 18.764 = 133.086 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 83.103(133.086) + 8066 = 19125.846 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{31.984}{19125.846} * 0.8003 * 5 = 0.00669 \text{ [m]} = 0.669 \text{ [cm]}$$

Cuarto Estrato.

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.725 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 17.5 \text{ [m]} = 295.203 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial.

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (295.203) = 173.186 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 4 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x= 10 \quad y= 7.5 \quad z= 15.5 \quad q_0= 53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (5.209) = 20.836 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(k_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (20.836) = 12.224 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2}\Delta\sigma_c = 173.186 + \frac{1}{2}12.224 = 179.298 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 83.103(179.298) + 8066 = 22966.202 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{20.836}{22966.202} * 0.8003 * 5 = 0.00363 \text{ [m]} = 0.363 \text{ [cm]}$$

Realizando la sumatoria de los estratos antes calculados vemos que

$$\Delta H_{total} = \sum_{j=1}^n \Delta H_j$$

$$\Delta H_{total} = 1.05 + 1.22 + 0.669 + 0.363 = 3.302 \text{ [cm]}$$

$$3.302 \text{ [cm]} > 2.5 \text{ [cm]}$$

Por lo tanto con esta energía de compactación no cumplimos con el asentamiento límite.

Se realizará el cálculo para la tercera energía de compactación.

Utilizando para la resolución del problema la teoría de Terzaghi, con la siguiente expresión.

$$q_u = \left[ 1 + 0.3 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * c * N_c + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q$$

$$q_a = \frac{\left[ 1 + 0.3 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * c * N_c + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{B}{L} \right) \right] * \gamma * B * N_\gamma + \gamma D_f * N_q}{3}$$

Datos:

$$B = 15 \text{ [m]}$$

$$L = 20 \text{ [m]}$$

$$c = 107.81 \text{ [kPa]}$$

$$\phi = 29.9597 \text{ [°]}$$

$$N_c = 34$$

$$\gamma = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} = 1.773 * 9.779 = 17.308 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$N_\gamma = 19$$

$$\gamma D_f = \sigma'v = PVH \text{ [Mg/m}^3\text{]} * g \text{ [m/s}^2\text{]} * h \text{ [m]} = 1.725 * 9.779 * 2 = 34.617 \text{ [kPa]}$$

$$N_q = 21$$

$$q_u = \left[ 1 + 0.3 \left( \frac{15}{20} \right) \right] * 107.81 * 34 + \left[ 0.5 - 0.1 \left( \frac{15}{20} \right) \right] * 17.308 * 19 * 15 + 34.617 * 21$$

$$q_u = 7313.789 \text{ [kPa]}$$

$$q_a = \frac{7313.789 \text{ [kPa]}}{3} = 2437.930 \text{ [kPa]}$$

Seguimos estando por arriba del valor de sollicitación de la estructura por lo tanto dicha energía de compactación puede ser utilizada en esta ocasión.

Ahora realizaremos el cálculo del asentamiento.

De los gráficos de resistencia obtenidos en la prueba triaxial obtenemos los siguientes módulos de Young.

$$E_{3-0.5} = \frac{200-0}{0.00921-0} = 21698.11 \text{ [kPa]}$$

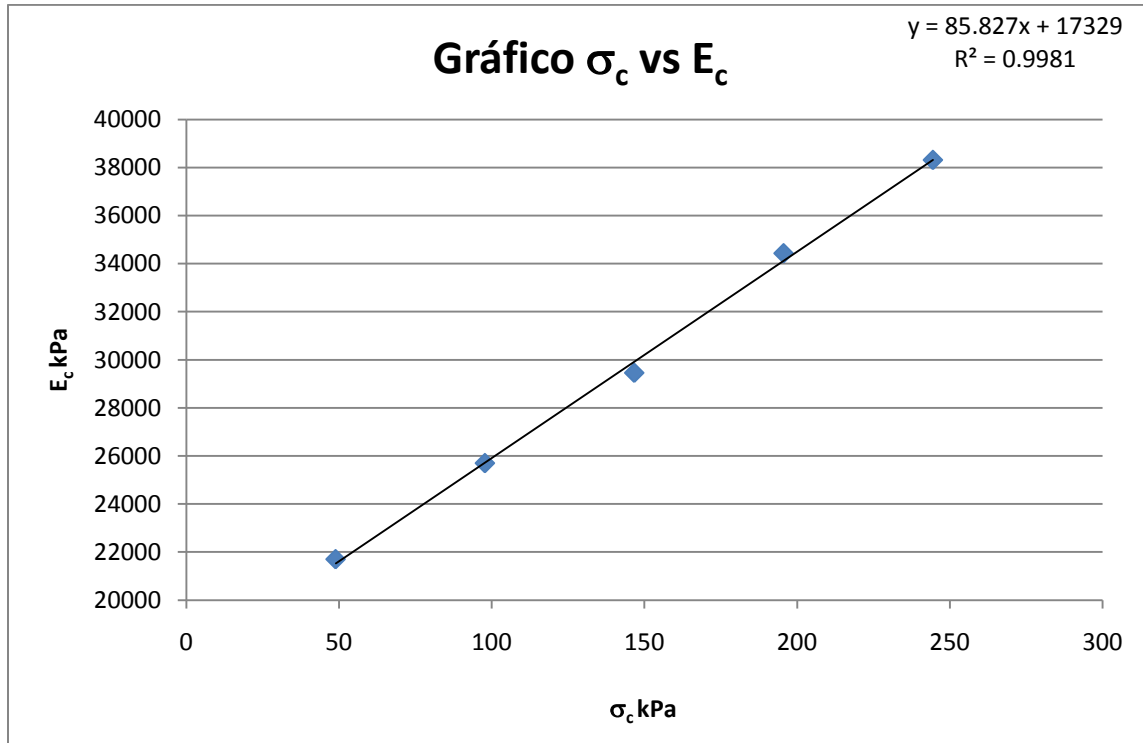
$$E_{3-1.0} = \frac{200-0}{0.00778-0} = 25696.41 \text{ [kPa]}$$

$$E_{3-1.5} = \frac{200-0}{0.009289-0.00249} = 29455.08 \text{ [kPa]}$$

$$E_{3-2.0} = \frac{200-0}{0.00581-0} = 34429.37 \text{ [kPa]}$$



$$E_{2-2.5} = \frac{200-0}{0.00522-0} = 38314.176 \text{ [kPa]}$$



Primer Estrato.

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.773 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 3.5 \text{ [m]} = 60.683 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial.

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (60.683) = 35.601 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 1 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=1.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (13.436) = 53.704 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (53.704) = 31.506 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 35.601 + \frac{1}{2} 31.506 = 51.354 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 85.827(51.354) + 17329 = 21736.560 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{53.704}{21736.560} * 0.8003 * 3 = 0.00593 \text{ [m]} = 0.593 \text{ [cm]}$$

Segundo Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.773 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 7.5 \text{ [m]} = 130.036 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (130.036) = 76.288 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 2 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=5.5 \quad q_0=53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (11.723) = 46.892 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (46.892) = 27.510 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 76.287 + \frac{1}{2} 27.510 = 90.043 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 85.827 * (90.043) + 17329 = 25057.120 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del sustrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{46.892}{25057.120} * 0.8003 * 5 = 0.007488 \text{ [m]} = 0.749 \text{ [cm]}$$

Tercer Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.773 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 12.5 [\text{m}] = 216.727 [\text{kPa}]$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial.

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (216.727) = 127.146 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 3 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x=10 \quad y=7.5 \quad z=10.5 \quad q_0=53.93 [\text{kPa}] \quad \Delta\sigma_v = 4 * (7.996) = 31.984 [\text{kPa}]$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (31.984) = 18.764 [\text{kPa}]$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_c = 127.146 + \frac{1}{2} 18.764 = 136.528 [\text{kPa}]$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 85.827 * (136.528) + 17329 = 29046.789 [\text{kPa}]$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del subestrato

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{31.984}{29046.789} * 0.8003 * 5 = 0.00441 \text{ [m]} = 0.441 \text{ [cm]}$$

Cuarto Estrato

Cálculo del esfuerzo vertical efectivo inicial.

$$\sigma'_{vi} = 1.773 \left[ \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right] * 9.779 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 17.5 \text{ [m]} = 303.418 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo de Confinamiento Inicial

$$\sigma'_{ci} = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\sigma'_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (303.418) = 178.005 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo vertical en el estrato 4 por Boussinesq. Utilizando la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_v = q_0 \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2 + z^2} + \frac{1}{y^2 + z^2} \right) \frac{xyz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right]$$

$$x= 10 \quad y= 7.5 \quad z= 15.5 \quad q_0= 53.93 \text{ [kPa]} \quad \Delta\sigma_v = 4 * (5.209) = 20.836 \text{ [kPa]}$$

Incremento de esfuerzo de confinamiento efectivo.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1 + 2(K_0)}{3} (\Delta\sigma_v) = \frac{1 + 2(0.38)}{3} (20.836) = 12.224 \text{ [kPa]}$$

Esfuerzo efectivo de confinamiento promedio.

$$\sigma'_{cm} = \sigma'_{ci} + \frac{1}{2}\Delta\sigma_c = 178.005 + \frac{1}{2}12.224 = 184.117 \text{ [kPa]}$$

Obtención del módulo de acuerdo a la regresión lineal del gráfico.

$$E[\text{kPa}] = 85.827 * (184.117) + 17329 = 33131.210 \text{ [kPa]}$$

Cálculo de  $v_c$

$$v_c = \frac{((1 + v)(1 - 2v))}{1 - v} = \frac{((1 + 0.27)(1 - 2(0.27)))}{1 - 0.27} = 0.8003$$

Cálculo del asentamiento del subestrato.

$$\Delta H = \frac{\Delta\sigma_v}{E} * v_c * H = \frac{20.836}{33131.210} * 0.8003 * 5 = 0.00251 \text{ [m]} = 0.251 \text{ [cm]}$$

Realizando la sumatoria de los estratos antes calculados vemos que

$$\Delta H_{total} = \sum_{j=1}^n \Delta H_j$$

$$\Delta H_{total} = 0.593 + 0.749 + 0.441 + 0.251 = 2.034 \text{ [cm]}$$

$$2.034 \text{ [cm]} < 2.5 \text{ [cm]}$$

Por lo tanto con esta energía de compactación cumplimos tanto la capacidad de carga del suelo y el asentamiento no rebasa el permisible.

El análisis en el cálculo del asentamiento no se lleva más profundo debido a que al espesor de 20 [m] se encontró roca sana, por lo tanto el asentamiento desde esa profundidad se considera despreciable.