

Anexos

ANEXO 1: DATOS

Tabla a1: Factores de fricción para distintos recubrimientos externos [2]

Revestimiento	f
Concreto	1,0
Alquitrán	0,9
Acero bruto	0,8
Acero liso	0,7
Polietileno	0,6
Fusión epóxica bonificada	0,6

Tabla a2: Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo (K_0) para diferentes tipos de suelo [2]

Tipo de suelo	K_0
Tierra suelta	0,5-0,6
Tierra densa	0,3-0,5
Arcilla(drenada)	0,5-0,6
Arcilla(no drenada)	0,8-1,1
Suelo sobre consolidado	1,0-1,3

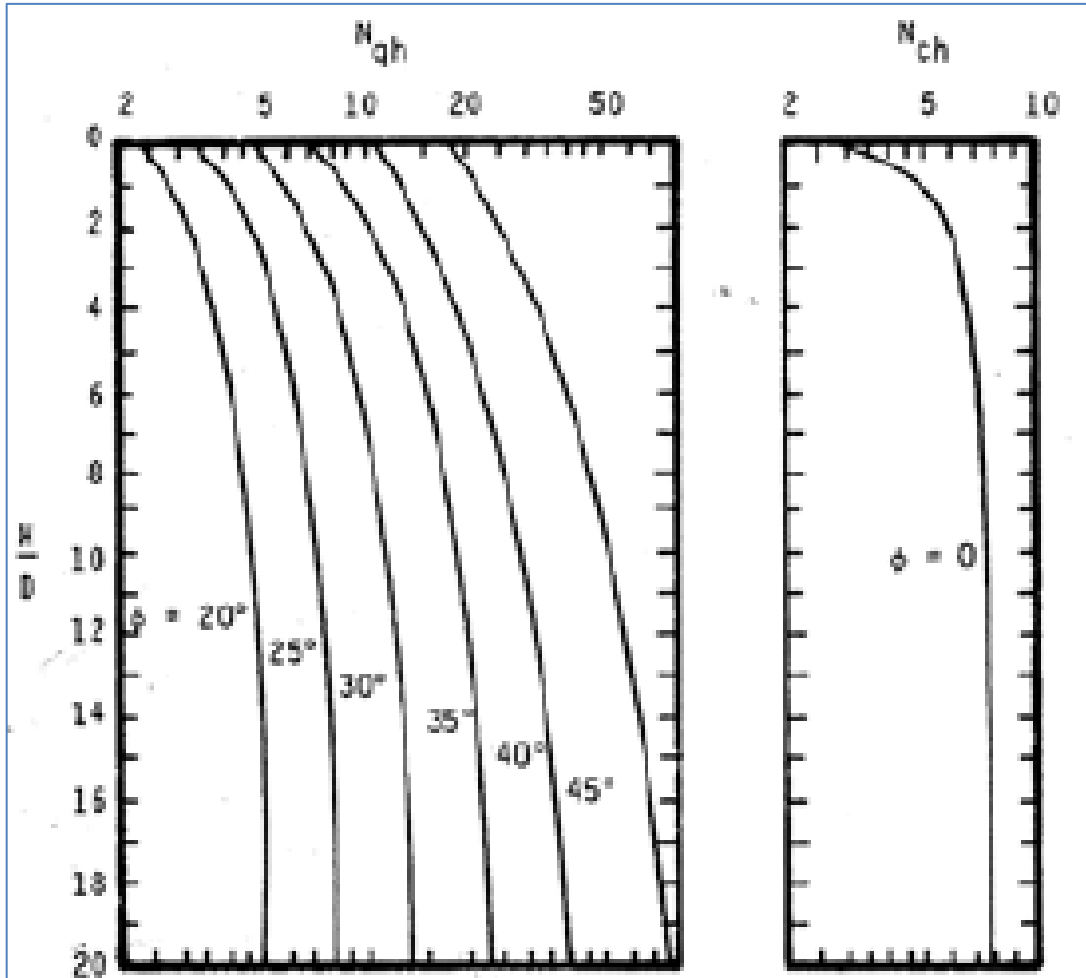


Imagen a1: Factores de capacidad lateral [2]

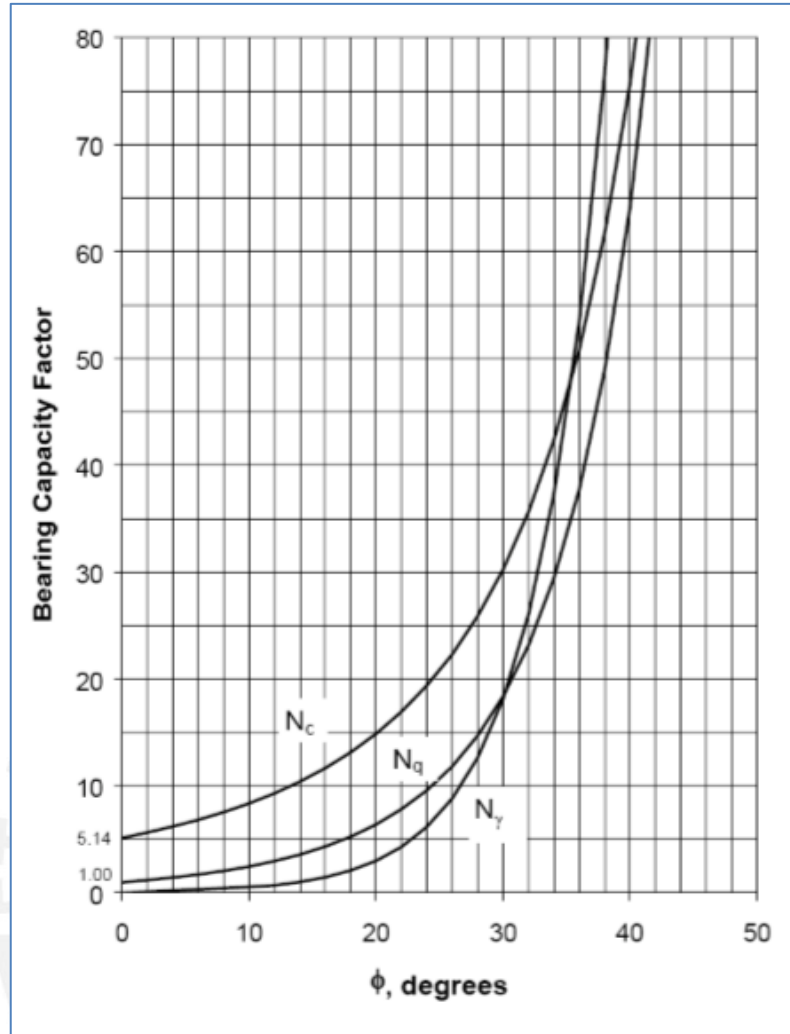


Imagen a2: Factores de capacidad de los suelos para los diferentes valores de fricción del suelo, Gráfica Factor de capacidad vs, Angulo de fricción [2] (Hansen, J, B., 1961)

Tabla a3: Coeficientes de Ramberg Osgood para distintos tipos de acero(O'Rourke y Liu, 1999)

	Grado-B	X-42	X-52	X-60	X-70
σ_y [Mpa]	227	310	358	413	517
n	10	15	9	10	5,5
r	100	32	10	12	16,6

ANEXO 2: CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS LONGITUDINALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA

El primer paso consiste en la obtención de los desplazamientos que se originan debido a la falla lateral.

Reemplazando el valor del ángulo β en 1.12 y 1.13, se obtiene:

$$dx = 0,7m$$

$$dz = 0m$$

De la tabla 2.5, se conoce la resistencia axial del suelo igual a:

$$t_u = 642 \frac{kg}{m}$$

A esta fuerza se le multiplica el factor empírico K para obtener el valor de la resistencia axial en la sección curvada, De la expresión 1.17.

$$K = 0,45 \left(\frac{H}{D} \right) + 1,725$$

$$K = 0,45 \left(\frac{1}{0,3556} \right) + 1,725$$

$$K = 3$$

Luego se calcula la resistencia de fricción axial en el sector de curvatura, la cual se obtiene con la expresión 1.18.

$$t_{uc} = t_u \times K$$

$$t_{uc} = 642 \frac{kg}{m} \times 3$$

$$t_{uc} = 1926 \frac{kg}{m}$$

$$t_{uc} = 18875 \frac{N}{m}$$

El cálculo es un proceso interactivo en el que se supone inicialmente un esfuerzo axial de 420MPa.

De la expresión 1.14 se obtiene la fuerza de tracción a la que es sometida la tubería en la falla:

$$F_{axial} = \sigma_{axial} \times A_s$$

$$F_{axial} = 412MPa \times A_s$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0,3556^2 - (0,3556 - 2 \times 0,0048)^2)$$

$$A_s = 0,00529m^2$$

$$F_{axial} = 2179480N$$

Luego se procede a encontrar las longitudes necesarias para la transmisión de la resistencia de fricción axial que se debe anular con la fuerza axial de tracción, Con la expresión 1.19.

$$L_1 = L_2 = \frac{F_{axial} - t_{uc} \times L_{cL}}{t_u} + L_{cL}$$

$$L_1 = L_2 = \frac{2179480N - 18875 \times 0}{642 \times 9,8} + 0$$

$$L_1 = L_2 = 347m$$

El valor de la longitud entre puntos de anclaje virtual se obtiene usando la expresión 1.20.

$$L_{anclaje} = L_1 + L_2$$

$$L_{anclaje} = 694m$$

El alargamiento total de la tubería calculado en función de su geometría se obtiene con la expresión 1.22.

$$\Delta L_r = \Delta x + \frac{\Delta z^2}{3L_{cl}}$$

$$\Delta L_r = 0,7m$$

Una vez obtenido el alargamiento por geometría se procede a calcular el valor del alargamiento que puede sufrir la tubería por el material, así poder compararlo y finalizar la iteración si son semejantes, caso contrario se tiene que probar con otro valor del esfuerzo axial.

Se comienza:

Expresión 1.33.

$$B_M = \frac{\sigma_a}{SMYS}$$

$$B_M = \frac{412MPa}{483 MPa}$$

$$B_M = 0,85$$

Expresión 1.29.

$$h_c = \frac{t_{uc}}{A_s \times SMYS}$$

$$h_c = \frac{18875 \frac{N}{m}}{0,00529m^2 \times 483 MPa}$$

$$h_c = 7,4 \times 10^{-3} m^{-1}$$

Expresión 1.34.

$$B_s = B_M - h_c L_{cL}$$

$$B_s = 0,85 - 7,4 \times 10^{-3} m^{-1} \times 0$$

$$B_s = 0,85$$

Expresión 1.28.

$$C = \frac{n}{r + 1}$$

$$C = \frac{5,5}{1 + 16,6}$$

$$C = 0,3125$$

Expresión 1.25.

$$\Delta L_c = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{cL} \left(\frac{B_M + B_S}{2} \right) + \frac{C}{h_c (r + 2)} [(B_M)^{r+2} - (B_S)^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = \frac{483 MPa}{203 GPa} \left\{ 0,2 \left(\frac{0,85 + 0,85}{2} \right) + \frac{0,3125}{7,4 \times 10^{-3} (16,6 + 2)} [(0,85)^{16,6+2} - (0,85)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = 0$$

Expresión 1.31.

$$L_{sL1} = L_1 - L_{cL}$$

$$L_{sL1} = 346m - 0$$

$$L_{sL1} = 346m$$

Expresión 1.30.

$$h_s = \frac{t_u}{A_s \times SMYS}$$

$$h_s = \frac{642 \times 9,81 \frac{N}{m}}{0,00529m^2 \times 483MPa}$$

$$h_s = 0,00246m^{-1}$$

Expresión 1.35.

$$B_{L1} = B_s - h_s L_{sL1}$$

$$B_{L1} = 0,85 - 0,00246m^{-1} \times 346m = 0$$

Expresión 1.26.

$$\Delta L_{s1} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL1} \left(\frac{B_s + B_{L1}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L1})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = \frac{483MPa}{203GPa} \left\{ 41,4m \left(\frac{0,1-0}{2} \right) + \frac{0,3125}{0,00246(16,6+2)} [(0,1)^{16,6+2} - (0)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = 0,35m$$

Expresión 1.32.

$$L_{sL2} = L_2 - L_{cL}$$

$$L_{sL2} = 346m - 0,$$

$$L_{sL2} = 346m$$

Expresión 1.36.

$$B_{L2} = B_s - h_s L_{sL2}$$

$$B_{L2} = 0,85 - 2,46 \times 10^{-3} m^{-1} \times 0,32m = 0$$

Expresión 1.27.

$$\Delta L_{s2} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL2} \left(\frac{B_s + B_{L2}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L2})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 346 \text{ m} \left(\frac{0,85 - 0}{2} \right) + \frac{0,3125}{2,46 \times 10^{-3}(16,6 + 2)} [(0,85)^{r+2} - 0] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = 0,35$$

Expresión 1.24.

$$\Delta L = \Delta L_{s1} + \Delta L_{s2} + 2\Delta L_c$$

$$\Delta L = 0,35 + 0,35 + 2 \times 0 = 0,7 \text{ m}$$

El alargamiento total permitido por el material es de 0,7 el cual es igual al alargamiento que se origina por la geometría, entonces el proceso iterativo termina.

En la tabla a4 se encuentran los valores de los coeficientes n y r, Respectivamente son n = 5,5 y r = 16,6 para el acero X70.

De la expresion 1.38. se obtiene:

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\sigma_a}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_Y} \right)^r \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = \frac{412 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left[1 + \frac{5,5}{1+16,6} \left(\frac{412 \text{ MPa}}{483 \text{ MPa}} \right)^{16,6} \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = 0,2\%$$

ANEXO 3: CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS LATERALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA

El primer paso consiste en la obtención de los desplazamientos que se originan debido a la falla lateral.

Reemplazando el valor del ángulo β en 1.12 y 1.13 se obtiene:

$$\Delta x = 0m$$

$$\Delta z = 0,7m$$

De la tabla 2.5. se conoce la resistencia axial del suelo igual a:

$$t_u = 642 \frac{kg}{m}$$

A esta fuerza se le multiplica el factor empírico K para obtener el valor de la resistencia axial en la sección curvada, De la expresión 1.17.

$$K = 0,45 \left(\frac{H}{D} \right) + 1,725$$

$$K = 0,45 \left(\frac{1}{0,3556} \right) + 1,725$$

$$K = 3$$

Luego se calcula la resistencia de fricción axial en el sector de curvatura, la cual se obtiene con la expresión 1.18.

$$t_{uc} = t_u \times K$$

$$t_{uc} = 642 \frac{kg}{m} \times 3$$

$$t_{uc} = 1926 \frac{kg}{m}$$

$$t_{uc} = 18875 \frac{N}{m}$$

El cálculo es un proceso interactivo en el que se supone inicialmente un esfuerzo axial de 128MPa.

De la expresión 1.14 se obtiene la fuerza de tracción a la que es sometida la tubería en la falla:

$$F_{axial} = \sigma_{axial} \times A_s$$

$$F_{axial} = 128MPa \times A_s$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0,3556^2 - (0,3556 - 2 \times 0,0048)^2)$$

$$A_s = 0,00529m^2$$

$$F_{axial} = 677120N$$

Luego se procede a calcular el radio de curvatura para ello se usa la expresión 1.21 y el valor de P_u que se encuentra en la tabla 2.5.

$$R_{cL} = \frac{F_{axial}}{P_u}$$

$$R_{cL} = \frac{677120N}{6558 \frac{kg}{m} \times 9,81}$$

$$R_{cL} = 10,5m$$

Una vez calculado el radio de curvatura se calcula la longitud proyectada L_{cL} , de la sección curvada con el uso de la expresión 1.30.

$$L_{cL} = (R_{cL} \delta_h \text{sen} \beta)^{1/2}$$

$$L_{cL} = (10,5m \times 0,7m)^{\frac{1}{2}}$$

$$L_{cL} = 2,7m$$

Luego se procede a encontrar las longitudes necesarias para la transmisión de la resistencia de fricción axial que se debe anular con la fuerza axial de tracción, Con la expresión 1.19.

$$L_1 = L_2 = \frac{F_{axial} - t_{uc} \times L_{cL}}{t_u} + L_{cL}$$

$$L_1 = L_2 = \frac{677120N - 18875 \frac{N}{m} \times 2,7m}{642 \frac{kg}{m} \times 9,81} + 2,7m$$

$$L_1 = L_2 = 102m$$

El valor de la longitud del tamo de tubería mínimo para el análisis obtiene usando la expresión 1.20.

$$L_{anclaje} = L_1 + L_2$$

$$L_{anclaje} = 204m$$

El alargamiento total de la tubería calculado en función de su geometría se obtiene con la expresión 1.22.

$$\Delta L_r = \Delta x + \frac{\Delta z^2}{3L_{cL}}$$

$$\Delta L_r = 0 + \frac{0,7^2 m^2}{3 \times 2,7m}$$

$$\Delta L_r = 0,06m$$

Una vez obtenido el alargamiento por geometría se procede a calcular el valor del alargamiento permitido por el material de la tubería para así poder compararlo y finalizar la iteración si son semejantes, caso contrario se tiene que probar con otro valor del esfuerzo axial.

Se comienza:

Expresión 1.33.

$$B_M = \frac{\sigma_a}{SMYS}$$

$$B_M = \frac{128 MPa}{483 MPa}$$

$$B_M = 0,26$$

Expresión 1.29.

$$h_c = \frac{t_{uc}}{A_s \times SMYS}$$

$$h_c = \frac{18875 \frac{N}{m}}{0,00529 m^2 \times 483 MPa}$$

$$h_c = 7,37 \times 10^{-3} m^{-1}$$

Expresión 1.34.

$$B_s = B_M - h_c L_{cL}$$

$$B_s = 0,26 - 7,37 \times 10^{-3} m^{-1} \times 2,7 m$$

$$B_s = 0,245$$

Expresión 1.28.

$$C = \frac{n}{r + 1}$$

$$C = \frac{5,5}{1 + 16,6}$$

$$C = 0,3125$$

Expresión 1.25.

$$\Delta L_c = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{cl} \left(\frac{B_M + B_S}{2} \right) + \frac{C}{h_c(r + 2)} [(B_M)^{r+2} - (B_S)^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 2,7 \left(\frac{0,26 + 0,245}{2} \right) + \frac{0,3125}{7,37 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} (16,6 + 2)} [(0,26)^{16,6+2} - (0,245)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = 0,0016 \text{ m}$$

Expresión 1.31.

$$L_{sL1} = L_1 - L_{cl}$$

$$L_{sL1} = 102 \text{ m} - 2,7 \text{ m}$$

$$L_{sL1} = 99,4 \text{ m}$$

Expresión 1.30.

$$h_s = \frac{t_u}{A_s \times SMYS}$$

$$h_s = \frac{642,02 \times 9,81 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{0,00529 \text{ m}^2 \times 483 \text{ MPa}}$$

$$h_s = 0,00246 \text{ m}^{-1}$$

Expresión 1.35.

$$B_{L1} = B_s - h_s L_{sL1}$$

$$B_{L1} = 0,245 - 0,00246m^{-1} \times 99,4m = 0$$

Expresión 1.26.

$$\Delta L_{s1} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL1} \left(\frac{B_s + B_{L1}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L1})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 99,4m \left(\frac{0,245 - 0}{2} \right) + \frac{0,3125}{0,00246(16,6 + 2)} [(0,7)^{16,6+2} - (0)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = 0,029m$$

Expresión 1.32.

$$L_{sL2} = L_2 - L_{cL}$$

$$L_{sL2} = 102m - 2,7m$$

$$L_{sL2} = 99,3m$$

Expresión 1.36.

$$B_{L2} = B_s - h_s L_{sL2}$$

$$B_{L2} = 0,245 - 2,46 \times 10^{-3} m^{-1} \times 99,3m = 0$$

Expresión 1.27.

$$\Delta L_{s2} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL2} \left(\frac{B_s + B_{L2}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L2})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 99,3m \left(\frac{0,245 - 0}{2} \right) + \frac{0,3125}{2,46 \times 10^{-3} m^{-1} (16,6 + 2)} [(0,245)^{r+2} - (0)^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = 0,029$$

Expresión 1.24.

$$\Delta L = \Delta L_{s1} + \Delta L_{s2} + 2\Delta L_c$$

$$\Delta L = 0,061m$$

Debido a que la elongación dado por la geometría de la tubería es $0,06m$ es muy cercana a la elongación permitida por el material de la tubería, $0,061m$, Entonces, el cálculo iterativo se detiene y se anota el valor del esfuerzo axial supuesto,

Finalmente se calculan las deformación unitaria de flexión y axial.

De la expresión 1.37 se obtiene:

$$\varepsilon_b = \frac{D}{2R_{cL}}$$

$$\varepsilon_b = \frac{0,3556}{2 \times 10,5}$$

$$\varepsilon_b = 1,69\%$$

En la tabla a4 se encuentran los valores de los coeficientes n y r , Respectivamente son $n = 5,5$ y $r = 16,6$ para el acero X70.

De la expresión 1.38 se obtiene:

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\sigma_a}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_Y} \right)^r \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = \frac{128MPa}{203GPa} \left[1 + \frac{5,5}{1+16,6} \left(\frac{128MPa}{483MPa} \right)^{16,6} \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = 0,06\%$$

ANEXO 4: CÁLCULO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS AXIALES Y LATERALES SIN VARIACIONES DE PRESIÓN NI TEMPERATURA,

El primer paso consiste en la obtención de los desplazamientos que se originan debido a la falla lateral.

Reemplazando el valor del ángulo β en 1.12 y 1.13, se obtiene:

$$\Delta x = 0,49m$$

$$\Delta z = 0,49m$$

De la tabla 2.5, se conoce la resistencia axial del suelo igual a:

$$t_u = 642 \frac{kg}{m}$$

A esta fuerza se le multiplica el factor empírico K para obtener el valor de la resistencia axial en la sección curvada. De la expresión 1.17.

$$K = 0,45 \left(\frac{H}{D} \right) + 1,725$$

$$K = 0,45 \left(\frac{1}{0,3556} \right) + 1,725$$

$$K = 3$$

Luego se calcula la resistencia de fricción axial en el sector de curvatura, la cual se obtiene con la expresión 1.18.

$$t_{uc} = t_u \times K$$

$$t_{uc} = 642 \frac{kg}{m} \times 3$$

$$t_{uc} = 1926 \frac{kg}{m}$$

$$t_{uc} = 18875 \frac{N}{m}$$

El cálculo es un proceso interactivo en el que se supone inicialmente un esfuerzo axial de 363MPa.

De la expresión 1.14 se obtiene la fuerza de tracción a la que es sometida la tubería en la falla:

$$F_{axial} = \sigma_{axial} \times A_s$$

$$F_{axial} = 363MPa \times A_s$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0,3556^2 - (0,3556 - 2 \times 0,0048)^2)$$

$$A_s = 0,00529m^2$$

$$F_{axial} = 1920270N$$

Luego se procede a calcular el radio de curvatura para ello se usa la expresión 1.21 y el valor de P_u que se encuentra en la tabla 2.5.

$$R_{cL} = \frac{F_{axial}}{P_u}$$

$$R_{cL} = \frac{1920270N}{6558 \frac{kg}{m} \times 9,8}$$

$$R_{cL} = 30m$$

Una vez calculado el radio de curvatura se calcula la longitud proyectada L_{cL} , de la sección curvada con el uso de la expresión 1.30.

$$L_{cL} = (R_{cL} \delta_h \text{sen} \beta)^{1/2}$$

$$L_{cL} = (30m \times 0,7m)^{\frac{1}{2}}$$

$$L_{cL} = 3,8m$$

Luego se procede a encontrar las longitudes necesarias para la transmisión de la resistencia de fricción axial que se debe anular con la fuerza axial de tracción, Con la expresión 1.19.

$$L_1 = L_2 = \frac{F_{axial} - t_{uc} \times L_{cL}}{t_u} + L_{cL}$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1920270N - 18875 \frac{N}{m} \times 3,8m}{642 \frac{kg}{m} \times 9,81} + 3,8m$$

$$L_1 = L_2 = 297,2m$$

El valor de la longitud entre puntos de anclaje se obtiene usando la expresion 1.20.

$$L_{anclaje} = L_1 + L_2$$

$$L_{anclaje} = 594,4m$$

El alargamiento total de la tubería calculado en función de su geometría se obtiene con la expresión 1.22.

$$\Delta L_r = \Delta x + \frac{\Delta z^2}{3L_{cL}}$$

$$\Delta L_r = 0,495m + \frac{0,495^2 m^2}{3 \times 3,8m}$$

$$\Delta L_r = 0,516m$$

Una vez obtenido el alargamiento por geometría se procede a calcular el valor del alargamiento máximo permitido por el material de la tubería para así poder compararlo y finalizar la iteración si son semejantes, caso contrario se tiene que probar con otro valor del esfuerzo axial.

Se comienza:

Expresión 1.33.

$$B_M = \frac{\sigma_a}{SMYS}$$

$$B_M = \frac{363 \text{ MPa}}{483 \text{ MPa}}$$

$$B_M = 0,75$$

Expresión 1.37.

$$h_c = \frac{t_{uc}}{A_s \times SMYS}$$

$$h_c = \frac{18875 \frac{N}{m}}{0,00529 \text{ m}^2 \times 483 \text{ MPa}}$$

$$h_c = 7,37 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Expresión 1.34.

$$B_s = B_M - h_c L_{cL}$$

$$B_s = 0,75 - 7,37 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \times 0,2 \text{ m}$$

$$B_s = 0,72$$

Expresión 1.28.

$$C = \frac{n}{r + 1}$$

$$C = \frac{5,5}{1 + 16,6}$$

$$C = 0,3125$$

Expresión 1.25.

$$\Delta L_c = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{cL} \left(\frac{B_M + B_S}{2} \right) + \frac{C}{h_c(r+2)} [(B_M)^{r+2} - (B_S)^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 3,8 \text{ m} \left(\frac{0,75+0,72}{2} \right) + \frac{0,3125}{7,37 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}(16,6+2)} [(0,75)^{16,6+2} - (0,72)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_c = 0,0067 \text{ m}$$

Expresión 1.31.

$$L_{sL1} = L_1 - L_{cL}$$

$$L_{sL1} = 41,6 \text{ m} - 0,2 \text{ m}$$

$$L_{sL1} = 294 \text{ m}$$

Expresión 1.30.

$$h_s = \frac{t_u}{A_s \times SMYS}$$

$$h_s = \frac{642 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 9,81}{0,00529 \text{ m}^2 \times 483 \text{ MPa}}$$

$$h_s = 0,00246 \text{ m}^{-1}$$

Expresión 1.35.

$$B_{L1} = B_s - h_s L_{sL1}$$

$$B_{L1} = 0,72 - 0,00246 \text{ m}^{-1} \times 294 \text{ m} = 0$$

Expresión 1.26.

$$\Delta L_{s1} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL1} \left(\frac{B_s + B_{L1}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L1})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 41,4m \left(\frac{0,72 - 0}{2} \right) + \frac{0,3125}{0,00246m^{-1}(16,6 + 2)} [(0,72)^{16,6+2} - (0)^{16,6+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s1} = 0,25m$$

Expresión 1.32.

$$L_{sL2} = L_2 - L_{cL}$$

$$L_{sL2} = 41,6m - 0,2m$$

$$L_{sL2} = 293,4m$$

Expresión 1.36.

$$B_{L2} = B_s - h_s L_{sL2}$$

$$B_{L2} = 0,7 - 2,46 \times 10^{-3} m^{-1} \times 293,4m = 0$$

Expresión 1.27.

$$\Delta L_{s2} = \varepsilon_{fluencia} \left\{ L_{sL2} \left(\frac{B_s + B_{L2}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{L2})^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = \frac{483 \text{ MPa}}{203 \text{ GPa}} \left\{ 41,4m \left(\frac{0,7 - 0}{2} \right) + \frac{0,3125}{2,46 \times 10^{-3} m^{-1}(16,6 + 2)} [(0,7)^{r+2} - 0^{r+2}] \right\}$$

$$\Delta L_{s2} = 0,0289m$$

Expresión 1.24.

$$\Delta L = \Delta L_{s1} + \Delta L_{s2} + 2\Delta L_c$$

$$\Delta L = 0,52m$$

Debido a que la elongación total dada por la geometría, $0,516m$ es muy cercano a la elongación máxima permitida por la tubería $0,52m$ el cálculo iterativo se detiene y se anota el valor del esfuerzo axial supuesto.

Finalmente se calculan las deformación unitaria de flexión y axial.

De la expresión 1.37 se obtiene:

$$\varepsilon_b = \frac{D}{2R_{cL}}$$

$$\varepsilon_b = \frac{0,3556}{2 \times 29,8}$$

$$\varepsilon_b = 0,59\%$$

En la tabla a4 se encuentran los valores de los coeficientes n y r . Respectivamente son $n = 5,5$ y $r = 16,6$ para el acero X70.

De la expresión 1.38 se obtiene:

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\sigma_a}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_Y} \right)^r \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = \frac{363MPa}{203GPa} \left[1 + \frac{5,5}{1+16,6} \left(\frac{363MPa}{483MPa} \right)^{16,6} \right]$$

$$\varepsilon_{axial} = 0,179\%$$

ANEXO 5: RESORTE AXIAL

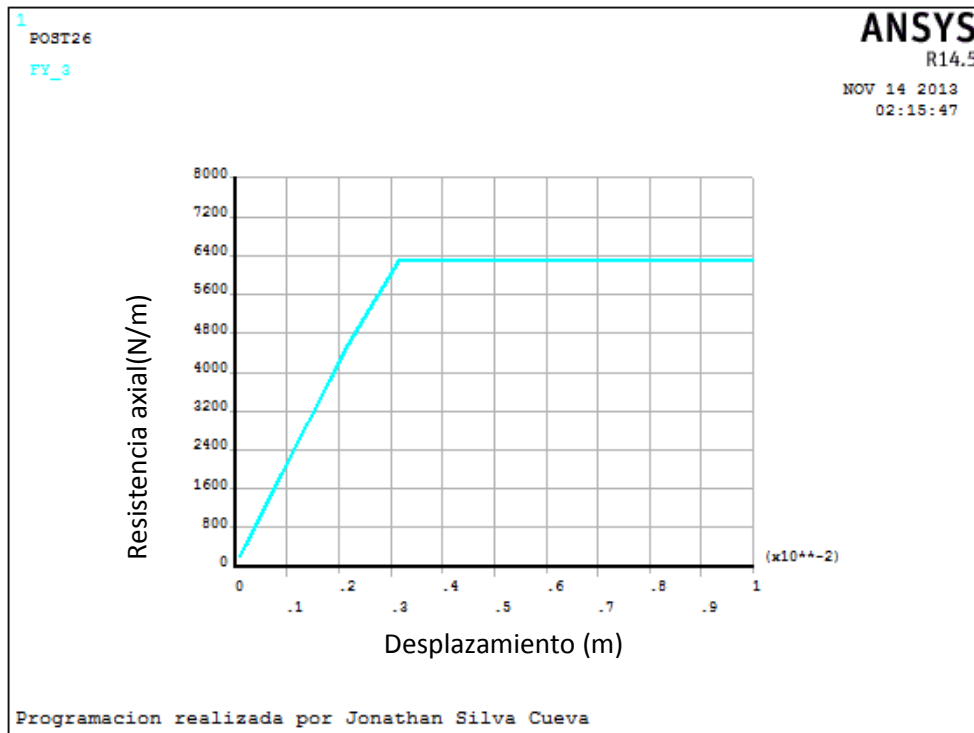


Imagen a3. Curva Resistencia axial del suelo vs Desplazamiento

ANEXO 6: RESORTE LATERAL

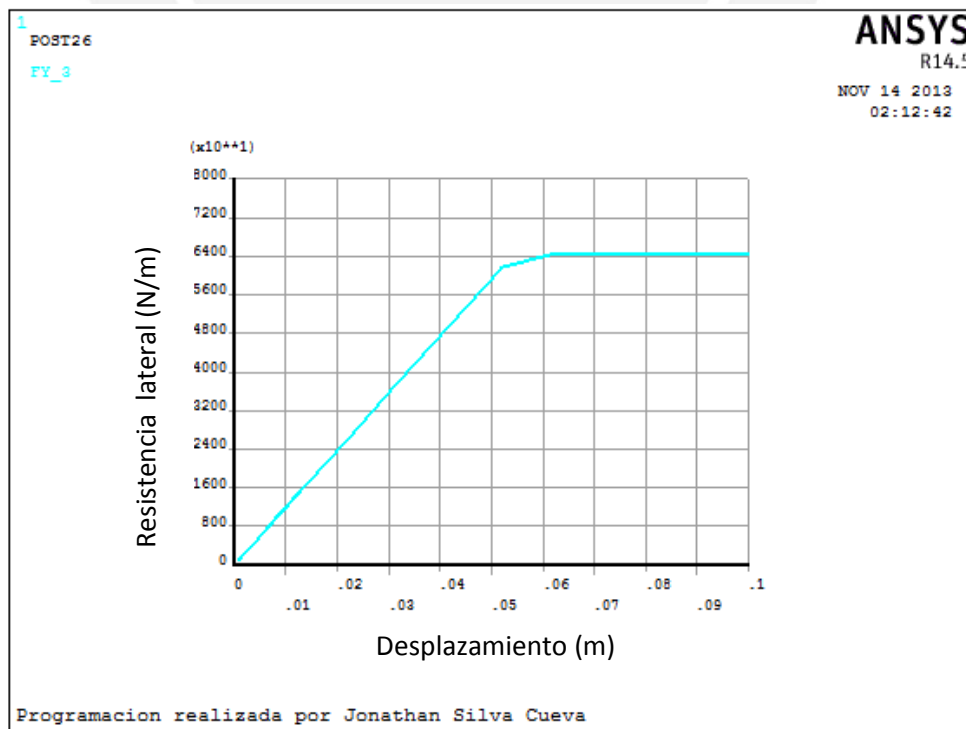


Imagen a4 Curva Resistencia lateral del suelo vs Desplazamiento

ANEXO 7: RESORTE VERTICAL SUPERIOR

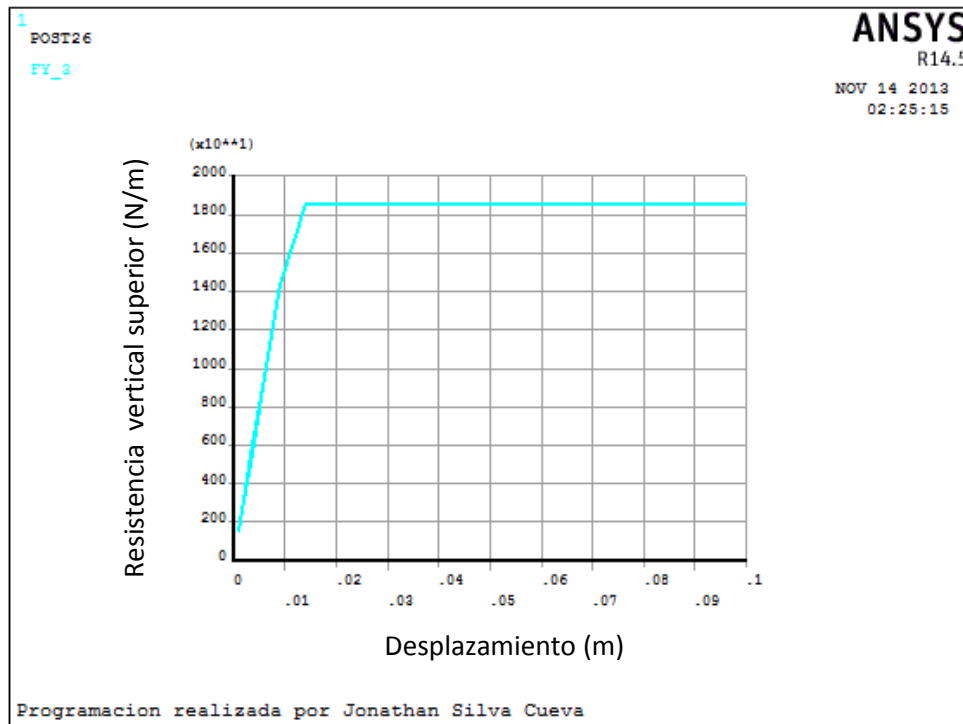


Imagen a5 Curva Resistencia vertical superior del suelo vs Desplazamiento

ANEXO 8: RESORTE VERTICAL INFERIOR

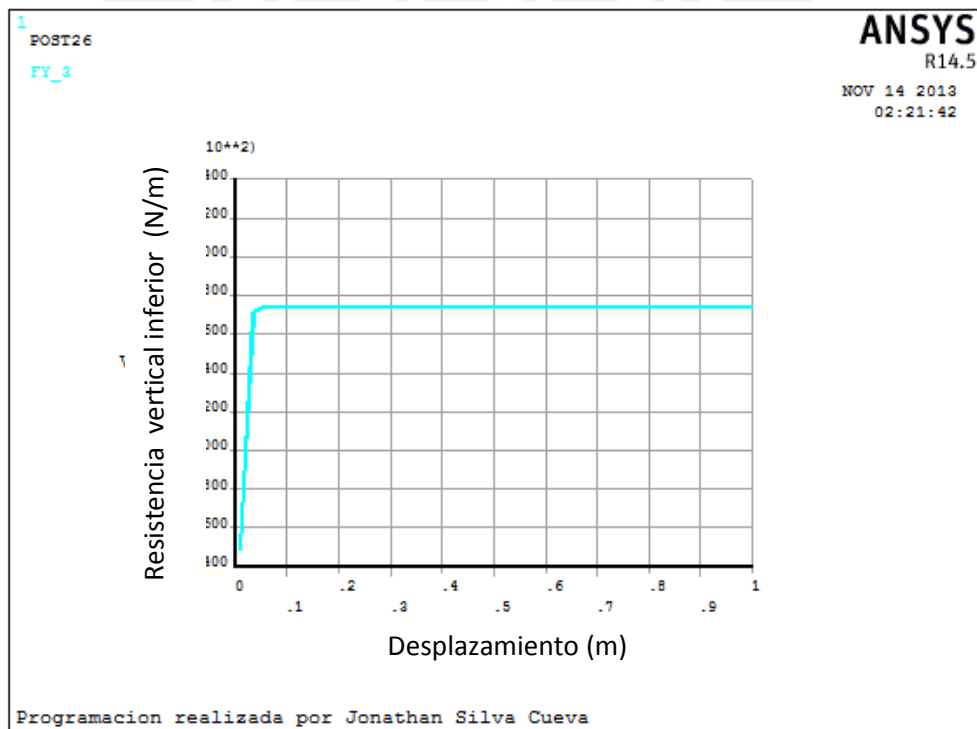


Imagen a6 Curva Resistencia vertical inferior del suelo vs Desplazamiento

ANEXO 9: CÓDIGO IMPLEMENTADO EN APDL MECHANICAL

Finish
/clear,all
/TITLE, Programación realizada por Jonathan Silva Cueva
/UNITS,MKS ! MKS system (m,kg,s,deg C)

ETAPA DEL PRE-PROCESADOR

/prep7

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

módulo_de_elasticidad = (483E6/0.0024) ! Módulo_de_elasticidad(N/m^2)
Nu = 0.3 ! Coeficiente de Poisson
densidad = 7850 ! Densidad (Kg/m^3)
espesor=0.0048 ! Espesor(m)
diámetro_exterior=0.3556 ! Diámetro_exterior(m)

CREACIÓN DE ELEMENTOS

ET, 1,PIPE288 ! Elemento 1 - PIPE288
KEYOPT,1,3,2 ! Funcion de forma cuadrática
KEYOPT,1,4,1 ! Espesor delgado

ET, 2,COMBIN39 ! Elemento 2 – combin39 vertical
KEYOPT,2,1,0 ! Descarga sobre la misma curva
KEYOPT,2,4,1 ! X,Y,Z Grado de libertad

ET, 3,COMBIN39 ! Elemento 3 – combin39 vertical
KEYOPT,3,1,0 ! Descarga sobre la misma curva
KEYOPT,3,4,1 ! X,Y,Z Grado de libertad

ET, 4,COMBIN39 ! Elemento 4 – combin39 lateral
KEYOPT,4,1,0 ! Descarga sobre la misma curva
KEYOPT,4,4,1 ! X,Y,Z Grado de libertad

ET, 5,COMBIN39 ! Elemento 5 – combin39 axiales
KEYOPT,5,1,0 ! Descarga sobre la misma curva
KEYOPT,5,4,1 ! X,Y,Z Grado de libertad

CREACIÓN DE CONSTANTES REALES

sectype,1,pipe
secdata,diametro_exterior,espesor,24

PROPIEDAD DE LOS RESORTES

r,2,0,0,0.011778,18578.178,100,18578.178,, ¡vertical superior
r,3,0,0,0.03556,173939.15,100,173939.15,, ¡vertical inferior
r,4,0,0,0.054224,64334.961,100,64334.961,, ¡lateral
r,5,0,0,0.003,6298.02,100,6298.02,, ¡axial

PROPIEDADES DE MATERIAL

MPTEMP,1,0,20 ! Define temperatura para el modulo de elasticidad
 mp,ex, 1, modulo_de_elasticidad
 mp,prxy,1, Nu
 mp,dens,1, densidad

GEOMETRÍA

CREACION DE LOS PUNTOS DE LA TUBERÍA

*DO,i,1,701,1
 k,i,i,0,0
 i=i+1
 *ENDDO

CREACIÓN DE LOS PUNTOS DEL RESORTE

RESORTE VERTICAL SUPERIOR

*DO,i,702,1402,1
 k,i,i-701,2,0
 i=i+1
 *ENDDO

RESORTE VERTICAL INFERIOR

*DO,i,1403,2103,1
 k,i,i-1402,-2,0
 i=i+1
 *ENDDO

RESORTE LATERAL

*DO,i,2104,2804,1
 k,i,i-2103,0,-2
 i=i+1
 *ENDDO

RESORTE AXIAL

*DO,i,2805,3505,1
 k,i,i-2804-2,0,0
 i=i+1
 *ENDDO

LINEAS DEL TUBO

*DO,i,1,700,1
 l,i,i+1
 i=i+1
 *ENDDO

LINEAS VERTICAL SUPERIOR

```
*DO,i,1,701,1
l,i,i+701
i=i+1
*ENDDO
```

LINEAS VERTICAL INFERIOR

```
*DO,i,1,701,1
l,i,i+1402
i=i+1
*ENDDO
```

LINEAS LATERAL

```
*DO,i,1,701,1
l,i,i+2103
i=i+1
*ENDDO
```

LINEAS AXIAL

```
*DO,i,1,701,1
l,i,i+2804
i=i+1
*ENDDO
```

MALLADO

MALLADO DE LA TUBERÍA

```
mat,1 ! Material ID 1
type,1 ! Tipo de elemento 1
secnum,1 ! Seccion 1
lsel,s,line,,1,700,1
lesize,all,,1
lmesh,all
allsel,all
```

MALLADO DE LOS RESORTES VERTICALES SUPERIORES

```
type,2
real,2
lsel,s,line,,701,1401,1
lesize,all,,1
lmesh,all
allsel,all
```

MALLADO DE LOS RESORTES VERTICALES INFERIORES

```
type,3
real,3
```

```
lsel,s,line,,1402,2102,1
lesize,all,,1
lmesh,all
allsel,all
```

MALLADO DE LOS RESORTES LATERALES

```
type,4
real,4
lsel,s,line,,2103,2803,1
lesize,all,,1
lmesh,all
allsel,all
```

MALLADO DE LOS RESORTES AXIALES

```
type,5
real,5
lsel,s,line,,2804,3504,1
lesize,all,,1
lmesh,all
allsel,all
```

```
FINISH
/ESHAPE,1
/VIEW,1,1,1,1
/REPLOT
FINISH
```

! Mostrar elementos como sólidos

SOLUCIÓN

```
/SOLU
```

SE RESTRINGEN LOS MOVIMIENTOS LATERALES, AXIALES Y VERTICALES DE LOS RESORTES QUE SE UBICAN A LA IZQUIERDA DEL NODO DE FALLA

```
ALLSEL,ALL
NSEL,S,NODE,,702,1052,1
NSEL,A,NODE,,1403,1753,1
NSEL,A,NODE,,2104,2454,1
NSEL,A,NODE,,2805,3155,1
D,All,ALL
```

SE PROVEE EL MOVIMIENTO VERTICAL DE LOS RESORTES DE LA DERECHA

```
ALLSEL,ALL
NSEL,S,NODE,,1053,1402,1
D,All,UY,0
```

```
ALLSEL,ALL
NSEL,S,NODE,,1754,2103,1
D,All,UY,0
```

SE PROVEE EL MOVIMIENTO LATERAL DE LOS RESORTES DE LA DERECHA

ALLSEL,ALL
NSEL,S,NODE,,2455,2804,1
D,All,UZ,0

SE PROVEE EL MOVIMIENTO AXIAL DE LOS RESORTES DE LA DERECHA

ALLSEL,ALL
NSEL,S,NODE,,3156,3505,1
D,All,UX,0.7

DELTIM,1,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,1

ALLSEL
SOLVE
SAVE
FINISH

