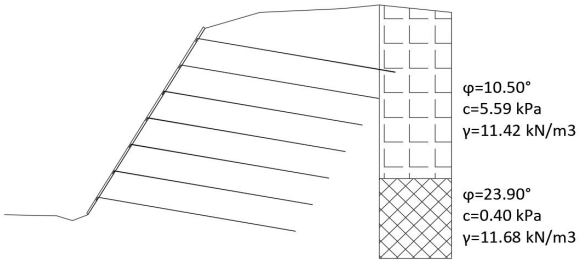
Diseño de Muro Claveteado

Diseño basado en la Publicación No. FHWA-NHI-14-007, Febrero 2015.
Basado en AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7th Edición.

Descripción del proyecto

El proyecto se trata de un talud con una inclinación con respecto a la horizontal de 57°, y de 10.57m de altura, ubicado en el Km35 de la vía Colibrí-Pifo.
Se proyecta estabilizarlo con un muro claveteado que tiene 7 anclajes pasivos tipo nail (clavo), mismos que serán de 11 metros de longitud espaciados entre ellos 1.50m en sentido vertical, con un diámetro de 200mm de perforación y una pantalla en la cara del talud cuyas dimensiones serán determinadas en el presente diseño. A continuación se muesta un esquema del proyecto.



Estabilidad externa

Estabilidad global (FS_G)

La estabilidad global es una comprobación que se raliza con un programa geotécnico. En este caso se utilizó el programa GEO5 en condiciones estáticas y pseudo-estáticas.
A continuación se realizarán los cálculos de los coeficientes de reacción sísmicos para realizar el análisis pseudo-estático y se presentarán los resultados del mismo.

$Z := 0.40$	Coeficiente de aceleración sísmica (NEC-SE-DS, zona IV)
$Am := (1.45 - Z) \cdot Z = 0.42$	
$kh := 0.6 \cdot Am = 0.252$ g	Coeficiente sísmico horizontal
$kv := 0.3 \cdot kh = 0.076$ g	Coeficiente sísmico vertical
$FSg := 1.62$	Debe ser mayor a 1.5
$FSgsismo := 1.23$	Debe ser mayor a 1.1

Deslizamiento (FS_{SL})

La comprobación de deslizamiento se la realiza con una superficie de falla recta o quebrada, para realizarla se utilizó el programa GEO5 siendo los resultados los siguientes.

$FSsl := 1.71$	Debe ser mayor a 1.5
$FSslsismo := 1.18$	Debe ser mayor a 1.1

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

Estabilidad interna

Determinación de fuerzas

Se procederá a determinar las fuerzas por dos métodos, el primero en el programa GEO5 en su módulo de muro claveteado, el segundo mediante métodos manuales. Se tomarán como verdaderos los resultados de mayor valor absoluto para la etapa de diseño.

Se analizarán condiciones de reposo, de presión activa (Rankine) y de cargas sísmicas.

Se analiza con presiones activas porque el muro claveteado funciona de manera pasiva, es decir se somete a deformaciones producidas por el empuje del suelo que mueve activamente al mismo.

De la condición en reposo y de presión activa se tomará el mayor valor para el diseño bajo cargas estáticas y se tomará el mayor valor de cargas sísmicas para la condición pseudo-estática.

Cálculo de coeficiente de reposo

$\phi i := 23.90°$ $\quad Ip := 18 \quad \%$

$\phi s := 10.50°$

$Koi := 1 - \sin(\phi i) = 0.595$ (Jaky, 1944)

$Kos := 0.44 + 0.42\left(\frac{Ip}{100}\right) = 0.516$ (Massarsch, 1979)

Cálculo de coeficiente activo (Rankine)

$$Kai := \frac{1 - \sin(\phi i)}{1 + \sin(\phi i)} = 0.423$$

$$Kas := \frac{1 - \sin(\phi s)}{1 + \sin(\phi s)} = 0.692$$

Cálculo de coeficiente sísmico (Mononobe-Okabe)

$$\psi := \operatorname{atan}\left(\frac{kh}{1 - kv}\right) = 15.249 \cdot °$$

$$\delta i := \frac{\phi i}{2} = 11.95 \cdot °$$

$$\delta s := \frac{\phi s}{2} = 5.25 \cdot °$$

$\theta := 0$

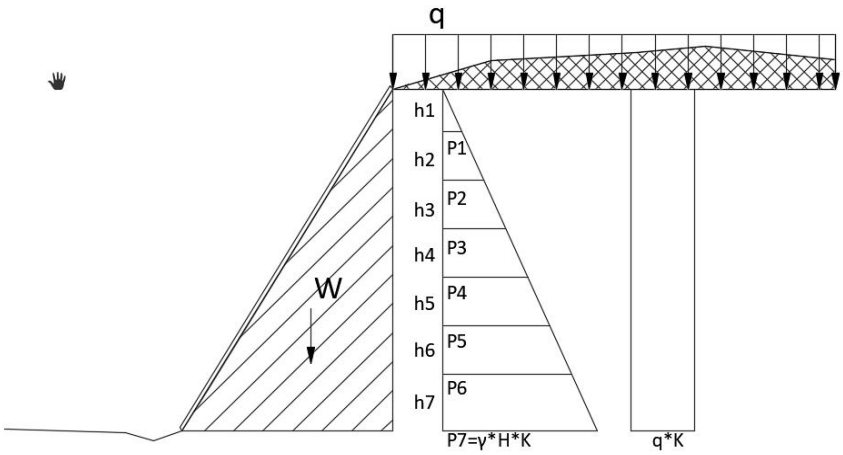
$\beta := 0$

$$Kae := \frac{\cos(\phi i - \theta - \psi)^2}{\cos(\psi)\cdot\cos(\phi i)^2\cdot\cos(\delta i + \theta + \psi)\cdot\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta i + \phi i)\cdot\sin(\phi i - \beta - \psi)}{\cos(\delta i + \phi i + \psi)\cdot\cos(\phi i - \beta)}}\right)^2} = 0.704$$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

Condición en reposo

Esta condición se da cuando la masa de suelo se encuentra en equilibrio estático, es decir no se mueve para ninguno de los lados.
En el gráfico se determina la forma en la que será cargada la estructura, se tomaron algunas consideraciones dadas por FHWA que sugiere reemplezar la masa de suelo en la parte superior por una sobrecarga que represente ese suelo, ya que así se tendrán solo las fuerzas horizontales mismas que dictan el diseño.
Además se sugiere no tomar en cuenta la masa de suelo bajo el muro ya que no tiene una componente horizontal en los casos estáticos, misma que sí tendrá relevancia a la hora de realizar el análisis Pseudo-estático.



H := 10.57

$\gamma i := 11.68 \frac{kN}{m3}$

$\gamma s := 11.42 \frac{kN}{m3}$ (Material predominante)

$P7 := \gamma s \cdot H \cdot Kos = 62.238 \frac{kN}{m2}$

h1 := 1.32 m

Asuelo := 12.7426 m2

Lestudio := 13.49

h2=h3=h4=h5=h6=h

$q := \frac{Asuelo \cdot \gamma s}{Lestudio} = 10.787 \frac{kN}{m2}$

h := 1.5 m

h7 := 1.75 m

m

$P6 := \frac{P7 \cdot (H - h7)}{H} = 51.934 \frac{kN}{m2}$

$P5 := \frac{P7 \cdot (H - h7 - h)}{H} = 43.101 \frac{kN}{m2}$

$P4 := \frac{P7 \cdot (H - h7 - h - h)}{H} = 34.269 \frac{kN}{m2}$

$P3 := \frac{P7 \cdot (H - h7 - h - h - h)}{H} = 25.437 \frac{kN}{m2}$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$$P2 := \frac{P7\cdot(H - h7 - h - h - h - h)}{H} = 16.605 \quad \frac{kN}{m2}$$

$$P1 := \frac{P7\cdot(H - h7 - h - h - h - h - h)}{H} = 7.772 \quad \frac{kN}{m2}$$

$$Psobre := q\cdot Kos = 5.562 \quad \frac{kN}{m2}$$

Cargas en los clavos

Los clavos se numeran de arriba hacia abajo y se calculará por el método de áreas cooperantes propuesto por AASHTO (LRFD).

$$Ro1 := \frac{1}{2}P1\cdot h1 + Psobre\cdot h1 = 12.471 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po1 := Ro1\cdot 1.5 = 18.707 \quad kN$$

$$Ro2 := Psobre\cdot h + \frac{(P1 + P2)\cdot h}{2} = 26.626 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po2 := Ro2\cdot 1.5 = 39.938 \quad kN$$

$$Ro3 := Psobre\cdot h + \frac{(P2 + P3)\cdot h}{2} = 39.874 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po3 := Ro3\cdot 1.5 = 59.811 \quad kN$$

$$Ro4 := Psobre\cdot h + \frac{(P3 + P4)\cdot h}{2} = 53.122 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po4 := Ro4\cdot 1.5 = 79.683 \quad kN$$

$$Ro5 := Psobre\cdot h + \frac{(P4 + P5)\cdot h}{2} = 66.371 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po5 := Ro5\cdot 1.5 = 99.556 \quad kN$$

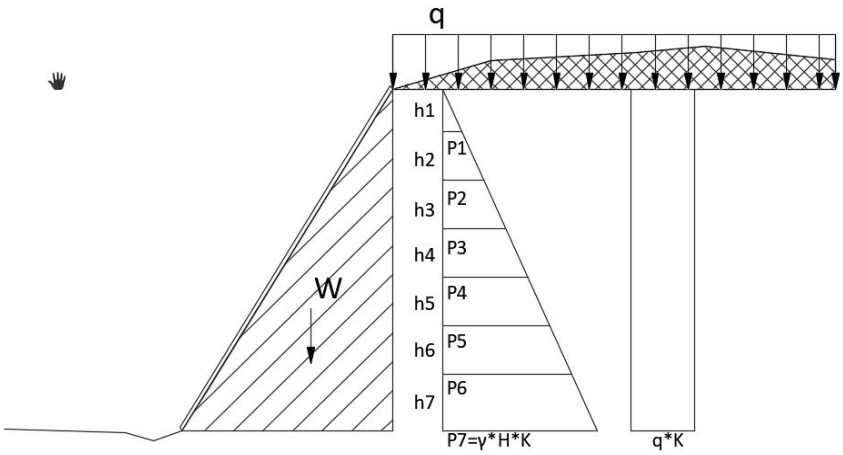
$$Ro6 := Psobre\cdot h + \frac{(P5 + P6)\cdot h}{2} = 79.619 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po6 := Ro6\cdot 1.5 = 119.428 \quad kN$$

$$Ro7 := Psobre\cdot h7 + \frac{(P6 + P7)\cdot h7}{2} = 109.633 \quad \frac{kN}{m} \qquad Po7 := Ro7\cdot 1.5 = 164.45 \quad kN$$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

Condición activa (Rankine)

Se tiene una condición activa del suelo cuando el sistema de estabilización es pasivo como en el caso de los muros claveteados.
En el gráfico se determina la forma en la que será cargada la estructura, se tomaron algunas consideraciones dadas por FHWA que sugiere reemplezar la masa de suelo en la parte superior por una sobrecarga que represente ese suelo, ya que así se tendrán solo las fuerzas horizontales mismas que dictan el diseño.
Además se sugiere no tomar en cuenta la masa de suelo bajo el muro ya que no tiene una componente vertical en los casos estáticos, misma que sí tendrá relevancia a la hora de realizar el análisis Pseudo-estático.



H = 10.57

$\gamma i = 11.68 \ \frac{kN}{m3}$

$\gamma s = 11.42 \ \frac{kN}{m3}$ (Material predominante)

$Pr7 := \gamma s \cdot H \cdot Kas = 83.496 \ \frac{kN}{m2}$

h1 = 1.32 m

Asuelo = 12.743 m2

Lestudio = 13.49 m

h2=h3=h4=h5=h6=h

$q = 10.787 \ \frac{kN}{m2}$

h = 1.5 m

h7 = 1.75 m

$Pr6 := \frac{Pr7 \cdot (H - h7)}{H} = 69.67 \ \frac{kN}{m2}$

$Pr5 := \frac{Pr7 \cdot (H - h7 - h)}{H} = 57.823 \ \frac{kN}{m2}$

$Pr4 := \frac{Pr7 \cdot (H - h7 - h - h)}{H} = 45.974 \ \frac{kN}{m2}$

$Pr3 := \frac{Pr7 \cdot (H - h7 - h - h - h)}{H} = 34.125 \ \frac{kN}{m2}$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$$Pr2 := \frac{Pr7\cdot(H - h7 - h - h - h - h)}{H} = 22.276 \quad \frac{kN}{m2}$$

$$Pr1 := \frac{Pr7\cdot(H - h7 - h - h - h - h - h)}{H} = 10.427 \quad \frac{kN}{m2}$$

$$Prsobre := q\cdot Kas = 7.462 \quad \frac{kN}{m2}$$

Cargas en los clavos

Los clavos se numeran de arriba hacia abajo y se calculará por el método de áreas cooperantes propuesto por AASHTO (LRFD).

$$Ra1 := \frac{1}{2}P1\cdot h1 + Prsobre\cdot h1 = 14.979 \quad \frac{kN}{m} \qquad Pa1 := Ra1\cdot 1.5 = 22.469 \quad kN$$

$$Ra2 := Prsobre\cdot h + \frac{(Pr1 + Pr2)\cdot h}{2} = 35.72 \frac{kN}{m} \qquad Pa2 := Ra2\cdot 1.5 = 53.58 \quad kN$$

$$Ra3 := Prsobre\cdot h + \frac{(Pr2 + Pr3)\cdot h}{2} = 53.49 \frac{kN}{m} \qquad Pa3 := Ra3\cdot 1.5 = 80.24 \quad kN$$

$$Ra4 := Prsobre\cdot h + \frac{(Pr3 + Pr4)\cdot h}{2} = 71.26 \frac{kN}{m} \qquad Pa4 := Ra4\cdot 1.5 = 106.9 \quad kN$$

$$Ra5 := Prsobre\cdot h + \frac{(Pr4 + Pr5)\cdot h}{2} = 89.04 \frac{kN}{m} \qquad Pa5 := Ra5\cdot 1.5 = 133.561 \quad kN$$

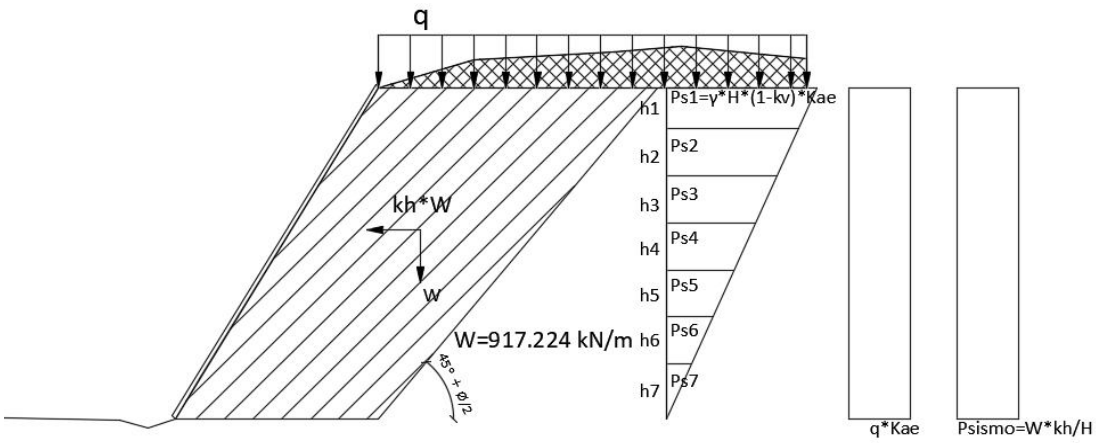
$$Ra6 := Prsobre\cdot h + \frac{(Pr5 + Pr6)\cdot h}{2} = 106.8 \frac{kN}{m} \qquad Pa6 := Ra6\cdot 1.5 = 160.221 \quad kN$$

$$Ra7 := Prsobre\cdot h7 + \frac{(Pr6 + Pr7)\cdot h7}{2} = 147.0 \frac{kN}{m} \qquad Pa7 := Ra7\cdot 1.5 = 220.62 \quad kN$$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

Condición Pseudo-estática (Mononobe-Okabe)

Al estar situados en una zona sísmica se tiene que realizar la comprobación para estas solicitaciones. Para esto se utiliza la teoría de Mononobe-Okabe que utiliza los coeficientes sísmicos obtenidos anteriormente así como el coeficiente activo por sismo.
En el gráfico se determina la forma en la que será cargada la estructura, se tomaron algunas consideraciones dadas por FHWA que sugiere reemplezar la masa de suelo en la parte superior por una sobrecarga que represente ese suelo, ya que así se tendrán solo las fuerzas horizontales mismas que dictan el diseño.
Para este caso se tiene que considerar el empuje realizado por la masa de suelo bajo el muro, misma que no fue tomada en consideración anteriormente.



H = 10.57

$W := 917.224 \ \frac{kN}{m}$

$\gamma i = 11.68 \ \frac{kN}{m3}$

$Psismo := W \cdot \frac{kh}{H} = 21.868 \ \frac{kN}{m2}$

$\gamma s = 11.42 \ \frac{kN}{m3}$ (Material predominante)

Empuje de masa detrás del muro

Psismo = 21.868 $\frac{kN}{m2}$ Asuelo = 12.743 m2 Lestudio = 13.49 m

$Pesobre := q \cdot Kae = 7.589 \ \frac{kN}{m2}$ q = 10.787 $\frac{kN}{m2}$

Empuje activo por sismo

$Ps1 := \gamma s \cdot H \cdot (1 - kv) \cdot Kae = 78.503 \ \frac{kN}{m2}$

h1 = 1.32 m Asuelo = 12.743 m2 Lestudio = 13.49 m

h2=h3=h4=h5=h6=h q = 10.787 $\frac{kN}{m2}$

h = 1.5 m

h7 = 1.75 m

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$$Ps2 := \frac{Ps1\cdot(H - h1)}{H} = 68.69\ \frac{kN}{m2}$$

$$Ps3 := \frac{Ps1\cdot(H - h1 - h)}{H} = 57.559\ \frac{kN}{m2}$$

$$Ps4 := \frac{Ps1\cdot(H - h1 - h - h)}{H} = 46.418\ \frac{kN}{m2}$$

$$Ps5 := \frac{Ps1\cdot(H - h1 - h - h - h)}{H} = 35.278\ \frac{kN}{m2}$$

$$Ps6 := \frac{Ps1\cdot(H - h1 - h - h - h - h)}{H} = 24.138\ \frac{kN}{m2}$$

$$Ps7 := \frac{Ps1\cdot(H - h1 - h - h - h - h - h)}{H} = 12.997\ \frac{kN}{m2}$$

Cargas en los clavos

Los clavos se numeran de arriba hacia abajo y se calculará por el método de áreas cooperantes propuesto por AASHTO (LRFD).

$$Rae1 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps3 + Ps4}{2}\right)\cdot h1 = 107.508\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae2 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps2 + Ps3}{2}\right)\cdot h = 138.879\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae3 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps3 + Ps4}{2}\right)\cdot h = 122.168\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae4 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps4 + Ps5}{2}\right)\cdot h = 105.457\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae5 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps5 + Ps6}{2}\right)\cdot h = 88.747\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae6 := \left(Psismo + Pesobre + \frac{Ps6 + Ps7}{2}\right)\cdot h = 72.036\ \frac{kN}{m}$$

$$Rae7 := \left(\frac{1}{2}Ps7 + Pesobre + Psismo\right)\cdot h7 = 62.922\ \frac{kN}{m}$$

$$Pae1 := Rae1\cdot 1.5 = 161.262\ kN$$

$$Pae2 := Rae2\cdot 1.5 = 208.318\ kN$$

$$Pae3 := Rae3\cdot 1.5 = 183.252\ kN$$

$$Pae4 := Rae4\cdot 1.5 = 158.186\ kN$$

$$Pae5 := Rae5\cdot 1.5 = 133.12\ kN$$

$$Pae6 := Rae6\cdot 1.5 = 108.054\ kN$$

$$Pae7 := Rae7\cdot 1.5 = 94.383\ kN$$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

Resistencia al arrancamiento (FSp)

$qu := 700 \ \frac{kN}{m2}$ Dato obtenido de Figura 28

Tipo de anclaje	q_{ult} promedio	
	Mpa	kN/m2
Anclajes inyectados a gravedad (en dirección al eje)	0.7 - 0.14	700 - 1400
Anclajes inyectados a presión (en dirección al eje)		
Arena fina a media, medianamente densa a densa.	0.08 - 0.38	80 - 380
Arena medianamente gruesa (con grava), medianamente densa	0.11 - 0.66	110 - 660
Arena medianamente gruesa (con grava), densa a muy densa	0.25 - 0.97	250 - 970
Arenas limosas	0.17 - 0.41	170 - 410
Morrena glacial densa	0.30 - 0.52	300 - 520
Grava arenosa, medianamente densa a densa	0.21 - 1.38	210 - 380
Grava arenosa, densa a muy densa	0.28 - 1.38	280 - 380

$d := 0.2 \ m$ Diámetro de la perforación

$Lr := 1 \ m$ Lungitud del clavo por detrás de la superficie de falla, se escoge el menor.

$Q := qu \cdot \pi \cdot d \cdot Lr = 439.823 \ kN$

Se procede a calcular la tensión máxima en un clavo de manera empírica. Esto nos sirve para realizar el análisis de la resistencia al arrancamiento y para validar la información obtenida de programas y de cálculos manuales ya que las tensiones máximas en los clavos deben estar cerca a este valor y de ser posible sobrepasarlo ya que no todos los clavos están cargados de igual manera.

$\lambda 1 := 1.1$ Factor adimensional varía entre 0.4 a 1.1

$Sh := 1.5 \ m$

$Sv := 1.5 \ m$

$Tmax := \lambda 1 \cdot Kas \cdot \gamma s \cdot H \cdot Sh \cdot Sv = 206.652 \ kN$

$Tmaxsismo := \lambda 1 \cdot Kae \cdot \gamma s \cdot H \cdot Sh \cdot Sv = 210.184 \ kN$

$FSp := \frac{Q}{Tmax} = 2.128$ Debe ser mayor a 2

$FSpsismo := \frac{Q}{Tmaxsismo} = 2.093$ Debe ser mayor a 1.5

Resistencia a la tensión de la barra de anclaje (FS_T)

Esta falla tiene lugar cuando la resistencia a la tracción es insuficiente.

$\phi := 32 \ mm$

$fy := 500 \ MPa$ (Varillas de alta resistencia)

$Rt := \frac{\phi^2 \cdot \pi \cdot fy}{4 \cdot 1000} = 402.124 \ kN$

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$Po := \max(Pa1, Pa2, Pa3, Pa4, Pa5, Pa6, Pa7, Po1, Po2, Po3, Po4, Po5, Po6, Po7) = 220.62\ kN$

$Posismo := \max(Pae1, Pae2, Pae3, Pae4, Pae5, Pae6, Pae7) = 208.318\ kN$

$FSt := \frac{Rt}{Po} = 1.823$ Debe ser mayor a 1.8

$FStsismo := \frac{Rt}{Posismo} = 1.93$ Debe ser mayor a 1.35

Resistencia del revestimiento

Flexión del revestimiento (FS_{FF})

$s := 1.5\ m$ Espaciamiento entre anclajes

$Mmax := \frac{1}{12}(Rae2)\cdot s^2 = 26.04\ kN - m$

$Mu := 0.101972\cdot Mmax = 2.655\ Tn - m$

$fc := 280\ \frac{kg}{cm2}$

$fy1 := 5000\ \frac{kg}{cm2}$

$b := 250\ cm$

$d := 5\ cm$

$h := 10\ cm$

$\phi flexion := 0.9$

$Mn := \frac{Mu}{\phi flexion} = 2.95\ Tn - m$

$\beta 1 := 1.05 - \frac{fc}{1400} = 0.85$

$\rho b := 0.85\cdot\frac{fc\cdot\beta 1\cdot 6120}{fy1\cdot(6120 + fy1)} = 0.022$

$\rho := 0.5\cdot\rho b = 0.011$

$kn := Mn\cdot\frac{10^5}{b\cdot d^2} = 47.206$

$\rho u := 0.85\cdot\frac{fc}{fy1}\cdot\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.36\cdot kn}{fc}}\right) = 0.011$

$As := \frac{\rho u\cdot b\cdot d\cdot 10000}{b} = 533.201\ \frac{mm2}{m}$ Acero requerido

$\phi ad := 12\ mm$

$fym := 500\ MPa$

$e := 10\ cm$

$asf := \frac{6\cdot\pi\cdot(\phi ad)^2}{4} = 678.584\ mm2$ Refuerzo adicional (Bastones)

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

asm := 636 mm2 Refuerzo por malla electrosoldada (Catálogos)

Cf := 1 Coeficiente de distribución de presiones (Muro permanente 1)

$$Rff := \frac{Cf}{265}\cdot(asm + asf)\cdot\left(\frac{Sh\cdot e}{Sv\cdot 100}\right)\cdot fym = 248.035 \quad kN$$

To := 0.7·Po = 154.434 kN

Tosismo := 0.7Posismo = 145.822 kN

$$FSff := \frac{Rff}{To} = 1.606$$ Debe ser mayor a 1.5

$$FSffsismo := \frac{Rff}{Tosismo} = 1.701$$ Debe ser mayor a 1.1

Corte por punzonamiento (FS_{FP})

fc := 28 MPa Resistencia del hormigón

Lbp := 0.30 m Longitud de la placa de apoyo

$$Dc := Lbp + \frac{e}{100} = 0.4$$ Diámetro efectivo de la superficie de falla cónica

$$Vf := 330\cdot\sqrt{fc}\cdot\pi\cdot Dc\cdot\frac{e}{100} = 219.433 \quad kN$$

Cp := 1.15 Contribución de la capacidad portante del suelo

Rfp := Cp·Vf = 252.348 kN

$$FSfp := \frac{Rfp}{To} = 1.634$$ Debe ser mayor a 1.5

$$FSfpsismo := \frac{Rfp}{Tosismo} = 1.731$$ Debe ser mayor a 1.1

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (http://www.novapdf.com)