

APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE ECUACIÓN EMPUJE DE TIERRAS (PÉREZ GONZALO) CONSIDERANDO EFECTO SÍSMICO EN EXCEL

APPLICATION AND ANALYSIS OF THRUST SOILS EQUATION (PEREZ GONZALO) CONSIDERED SEISMIC EFFECT IN EXCEL

Rommel J. Miranda C., Guillermo Alonso S., Leopoldo Hernández V., Gonzalo Pérez G.

RESUMEN

En empuje de tierras lo importante es determinar presiones que la tierra ejerce sobre elementos de retención encargados de soportarla, tomando en cuenta las fuerzas que puedan actuar sobre el mismo, desde sismos hasta el agua. En Ingeniería se usan elementos de retención para empuje de tierras y se presentan métodos para cálculo del empuje de tierras y se realizaban de manera empírica (experiencia), sin tomar en cuenta que para cada obra se presentan diferentes condiciones de trabajo, razón por la cual se presenta propuesta razonable considerando las fuerzas que intervienen con la presión de tierras, a partir del análisis y programación en hoja de cálculo Excel para dicha ecuación (Pérez Gonzalo), La acción propuesta abarca todos los efectos que la estructura pudiera sufrir en cualquier instante. Su comprobación con teorías de Rankine, Coulomb y Mononobe – Okabe, resultado que corrobora el resultado.

Palabras Claves: análisis, empuje, retención, fuerzas, cuña deslizante

ABSTRACT

The important thing is earth pressure is determine pressures that the earth exerts on retention elements in charge of supporting it, taking into account the forces that may

act on it, from earthquakes to due to water. In engineering, retention elements are used for earth pressure and methods are presented for calculating the earth pressure and they were carried out empirically (experience), without taking into account that for each work different working conditions are presented, which is why a reasonable proposal is presented considering the forces that intervene with the earth pressure, from an analysis and programming in excel spreadsheet for said equation, the proposed action covers in all the effects that the structure could suffer at any moment. Its verification with theories of Rankine, Coulomb and Mononobe- Okabe turned out to which corroborates the result.

Keywords: analysis, pressure, retention, forces, cone, sliding.

INTRODUCCIÓN

Es indudable que, desde que el hombre ha venido realizando obras de ingeniería se ha visto en la necesidad de resolver diferentes problemas, tales como: asentamientos, deslizamientos, filtraciones, expansiones, etc., todos estos problemas encontrados directamente en el suelo, el cual tiene como función principal soportar todas y cada una de las fuerzas o cargas transmitidas por cualquier estructura que se encuentre sobre su superficie. (Maza, Marzo de 1999)

Haciendo un retroceso en el tiempo puede constatar-se que desde nuestros antepasados se construían obras a base de piedras tales como: pirámides, conventos, etc., cuyas paredes prácticamente constituyen muros de grandes dimensiones, dichas obras pueden ser admiradas hasta nuestros días y con un comportamiento estructural sorprendente. La diferencia que puede marcarse entre estos muros y los muros de contención, es que los segundos se encuentran sujetos a la presión que la tierra ejerce sobre su respaldo y no requieren de una estética tan notoria como los primeros. (Maza, Marzo de 1999)

El primer intento para calcular la presión de tierras sobre elementos de soporte con metodología científica fue

¹ Académico de Geotecnia, Facultad de Ingeniería, UNACH, Socio 306 Del. Analisec Chiapas

² Académico de Geotecnia, Facultad de Ingeniería, UNACH.

³ Coautor, estudiante Tesista.

realizado por Ch. A. Coulomb, sobre la hipótesis de que la tierra es incompresible, que su deformación antes de la falla es despreciable y que la falla ocurre a lo largo de superficies planas de deslizamiento; la resistencia al esfuerzo cortante del suelo fue, naturalmente, interpretada por Coulomb. (Badillo & Rodríguez, 2014)

Las teorías y métodos de cálculo expuestos por Coulomb atrajeron gran atención de parte de todos los ingenieros cuyas prácticas, hasta entonces ciegamente empíricas, frecuentemente culminaban en fracasos, y desde entonces su influencia ha sido notoria en el campo teórico inclusive hasta nuestros días. De hecho puede decirse que desde la época en que las ideas de Coulomb fueron publicadas las concepciones de los ingenieros sobre los fenómenos de presión de tierra no sufrieron variación apreciable, hasta hace algunos años, en que los avances generales de la Mecánica de Suelos introdujeron ideas nuevas en este campo específico. Sin embargo es un hecho histórico aleccionador el que las ideas de Coulomb, atractivas teóricamente, no condujesen en la práctica ingenieril a técnicas que aventajasen a sus predecesoras, pues entre teoría y realidad se marco un claro divorcio. El problema estribo en una cuestión de interpretación de las teorías a la luz de la práctica; en efecto, durante años se aplicaron las ideas de Coulomb sobre la base de que el valor del ángulo ϕ era, en cualquier caso y material, el ángulo de reposo del suelo. (Badillo & Rodríguez, 2014)

Posiblemente el más importante responsable de la larga carrera del concepto de ángulo de reposo en estas cuestiones de Mecánica de Suelos lo fue W. J. Rankine y, aunque Collin Y Darwin demostraron experimentalmente que, por lo menos en algunos casos, el ángulo de fricción interna de un suelo podía diferir tremendamente del de reposo, el uso de este último en la ecuación de resistencia continuo por largo tiempo, debido a la autoridad del citado Rankine. (Badillo & Rodríguez, 2014)

Como resultado de investigaciones más recientes se puso de manifiesto la falacia inherente al concepto ángulo de reposo. Así en arenas colocadas al volteo, el ángulo de reposo pudiera coincidir más u menos con el ϕ correspondiente al estado suelto, pero diferirá seriamente del ϕ de una arena compacta. En arcillas, un criterio ciego pudiera llevar a decir, a la vista de un pequeño corte casi vertical en equilibrio, que ϕ , interpretado como ángulo de reposo, tuviese valores cercanos a los 90° , lo cual, a todas luces, conducirá a resultados absolutamente erróneos en cualquier aplicación práctica en que la resistencia de la arcilla se interprete a partir de tal dato. (Badillo & Rodríguez, 2014)

Con la interpretación actual en lo referente a los parámetros de resistencia, muchas de las teorías de presión de tierra clásicas permanecen hoy en la aplicación de la Mecánica de Suelos a los problemas prácticos. Así es frecuen-

te en la actualidad ver estructuras de soporte que han sido diseñadas a partir de las teorías expuestas por Rankine y Coulomb. Tales teorías, según tendrá ocasión de discutirse, distan de ser óptimas y están afectadas por hipótesis que están lejos de representar un ideal de perfección, en lo que se refiere al acercamiento con la realidad; pero, en muchos casos, son las demás fácil aplicación y su manejo, en principio, resulta animador para los ingenieros, en el sentido de que parecen no exigir un criterio de especialista muy desarrollado. Esta sensación, común por otra parte a todas las teorías ingenieriles cuyo desarrollo matemático sea más u menos completo, es en muchos casos engañosa y representa un peligro práctico. Todo indica que no está lejano el día en el que el crecimiento de la Mecánica de Suelos permita el abandono de las Teorías de Rankine o de Coulomb y su substitución por otras teóricamente más satisfactorias; sin embargo, tal día probablemente aun no ha llegado y la investigación copiosa que hoy se realiza sobre el tema aún no ha producido una teoría o teorías de uso universal y de desarrollo académicamente adecuado para el nivel de la enseñanza. Por ello, en lo que sigue se encontraran con una propuesta bastante razonable considerando todas las fuerzas que intervienen directamente con la presión de tierras, a partir de un análisis y programación en una hoja de Excel para dicha ecuación (Pérez Gonzalo), aunque se procurara dar alguna orientación respecto a la dirección de los avances del momento.

ELEMENTOS DE RETENCION Y EMPUJE DE TIERRAS

La solución más viable para contrarrestar los empujes de tierra ha sido construir muros de contención, los cuales han resuelto el problema en gran medida y permitido el buen funcionamiento de obras como carreteras, puentes, canales, sótanos, etc.

La función principal de los muros de contención es soportar empujes horizontales y verticales y al mismo tiempo proporcionar un soporte lateral a una masa de suelo, agua, o cualquier material que pueda retener; deben su estabilidad principalmente al peso del material que retienen y a los empujes activos y pasivos que este ocasiona. Existen diferentes tipos de muros de contención, y cada uno de ellos posee diferentes características en cuanto a su funcionalidad, a continuación se describen los tipos más comunes. (Cruz & Hernández, Noviembre 2012)

Muros de gravedad; Los muros de gravedad se construyen normalmente de mampostería de piedra o de concreto simple (con refuerzo por temperatura), están sometidos únicamente a esfuerzos de compresión

sión ya que su peso propio se utiliza para contrarrestar las fuerzas horizontales producidas por el empuje del relleno. Si el muro tiene el paramento inferior inclinado, el peso propio aumenta y con esto disminuyen los efectos producidos por el empuje y ayuda a evitar el volteo. Para asegurarse que en cualquier punto, los esfuerzos sean de compresión, la resultante de las fuerzas en una sección del muro debe pasar por el tercio de la misma. Estos muros resultan económicos cuando tienen una altura máxima de 5 metros. (Maza, Marzo de 1999)

Uno de los inconvenientes de los muros de gravedad es el hecho de que su peso está limitado por la resistencia del cimiento, situación muy importante si el material del mismo es arcilloso. Por contrapartida, la principal ventaja que presentan estos muros es su facilidad para ser construidos y el reducido coste que presentan al ser empleados en estructuras de pequeña altura. Dentro de esta categoría también encuentran los muros criba, los muros de gaviones y los de escollera, que suelen diseñarse como muros de gravedad. (Cruz & Hernández, Noviembre 2012)

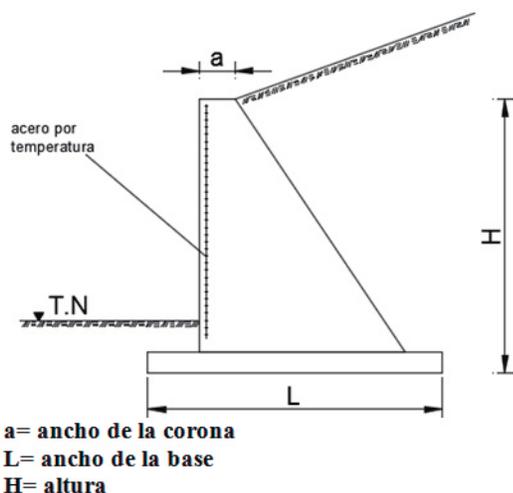


Figura 1. Muro de gravedad.
 (Cruz & Hernández, Noviembre 2012)

Muros de mampostería

Este tipo de muros se construyen generalmente con un espesor constante o con un cierto parámetro de espesor, tienen contacto directo con el terraplén a contener de manera vertical y presentan un desplome del otro lado. Para la construcción de este tipo de muro es de suma importancia utilizar piedra braza (roca), para obtener una mejor adherencia entre la

piedra y el mortero, además de poder darle forma a la cara del muro con mayor facilidad. Por esta razón no es recomendable utilizar piedras de canto rodado. (Cruz & Hernández, Noviembre 2012)

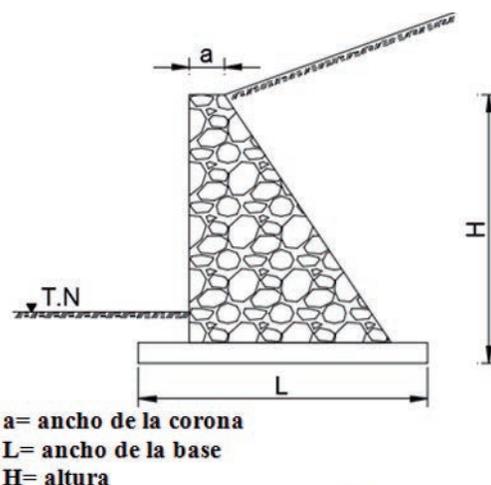


Figura 2. Muro de mampostería
 (Cruz & Hernández, Noviembre 2012)

Muros de gaviones

Los muros de gaviones están formados por elementos metálicos confeccionados con redes de malla hexagonal de doble torsión, que son rellenos posteriormente con piedras. Estos muros suelen ser de altura moderada (del orden de 5 m), aunque se han construido muros de 25 m de altura con resultados satisfactorios. Las unidades de gaviones son firmemente unidas entre sí con redondos que los conectan, fijados a través de costuras con alambres de iguales características a los que forman las mallas, de modo de formar una estructura continua.

La elección del material a ser empleado en la construcción de este tipo de estructuras, referido esto a las características de la malla o el material de relleno, es fundamental para la obtención de una estructura realmente eficaz. La malla, en particular, debe poseer una elevada resistencia mecánica, elevada resistencia contra la corrosión, buena flexibilidad y no ser fácil de desmallar. (Cruz & Hernández, Noviembre 2012).



Figura 3. Muro de gavión
(Cruz & Hernández, Noviembre 2012).

Muros de concreto armado

En cuanto a las formas de construir un muro de concreto armado, solamente pueden darse unos cuantos modelos a título informativo, ya que es decisión del proyectista adoptar la forma de muro que considere oportuna. En la práctica existen siempre imposiciones de espacio y de características del terreno, y esto es lo que obliga al proyectista a adoptar la solución que considere necesaria. En relación a la consideración geométrica de los muros podemos destacar los siguientes:

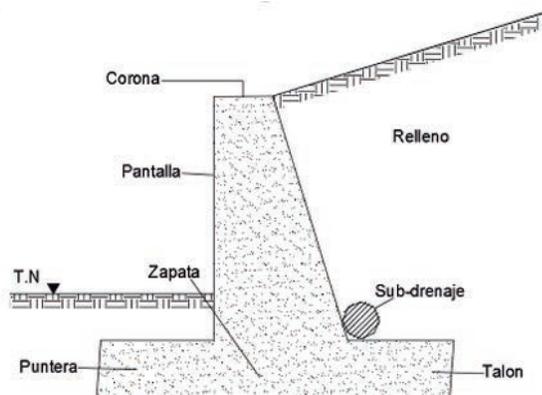


Figura 4. Muro en voladizo o ménsula
(Cruz & Hernández, Noviembre 2012).

FUERZAS ACTUANTES SOBRE ELEMENTOS DE RETENCIÓN

Para realizar el análisis de estabilidad de un muro de contención, es necesario considerar todas las fuerzas o cargas que intervienen. En general, las fuerzas actuantes contra un muro de retención en el cual la sección estructural se mantenga constante a lo largo de un trecho considerable, pueden calcularse para un segmento unitario de muro en la dirección normal al plano del papel, generalmente un metro. Todas las fuerzas posibles que intervienen se mencionan a continuación: Peso propio; Es la presión que el peso del muro (W) transmite al suelo y que además se encarga de contrarrestar el empuje producido por el relleno. Esta fuerza es perpendicular a la superficie de la base. Esta fuerza, que actúa en el centro de gravedad de la sección, puede calcularse cómodamente subdividiendo dicha sección en áreas parciales de cálculo sencillo.

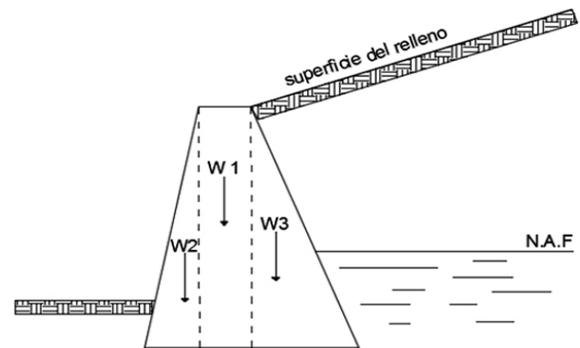


Figura 5. Peso propio del muro en áreas parciales.
(Badillo, J., & Rodríguez, R. (2014).

Presión del relleno contra el respaldo del muro; Es el empuje principal (E_a) producido por el relleno sobre el respaldo del muro y que trata de producir la falla del mismo, con su correspondiente intensidad y distribución. Esta fuerza se presenta regularmente a un tercio de la altura del muro respecto a la base y con un ángulo de inclinación δ respecto a la normal del respaldo del muro.

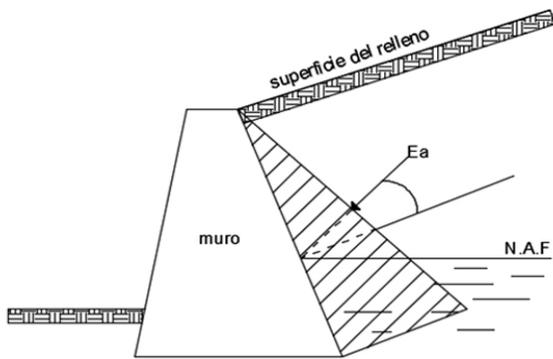


Figura 6. Presión del relleno contra el respaldo del muro. (Badillo, J., & Rodríguez, R. (2014).

Componente vertical de las presiones en la cimentación, Usualmente se considera a la presión en la cimentación (base) como linealmente distribuida a lo largo de la línea AC, dando lugar a un diagrama trapezoidal. La resultante vertical de estas presiones (ΣV) actúa en el centro de gravedad de tal diagrama.

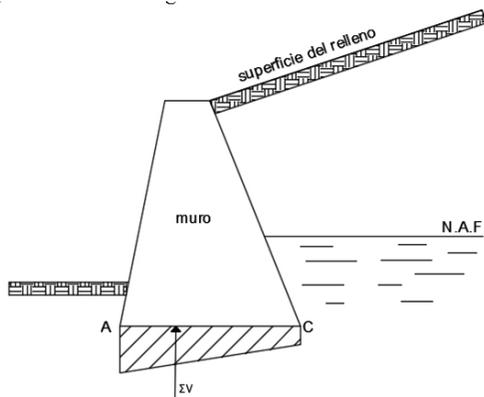


Figura 7. Componente vertical de las presiones en la cimentación. (Badillo, J., & Rodríguez, R. (2014).

ANÁLISIS Y PROGRAMACIÓN DE LA ECUACIÓN DE EMPUJE DE TIERRAS (PÉREZ GONZALO)

FUNDAMENTO TEORICO

El número considerable de daños parciales y totales sufridos por estribos de puentes y muros de contención durante eventos sísmicos pone de manifiesto la necesidad de diseñar estas obras aplicando procedimientos y criterios que permitan establecer un adecuado nivel de seguridad.

Debida a esta necesidad, se propone el uso práctico de la Ecuación Pérez Gonzalo, utilizando criterios simplificadoros y razonamientos fundamentados en otros autores. Como, el tratar con material de relleno friccionante y cohesivo – friccionante saturado (se considera nivel freático) o no saturados (nivel de agua muy abajo de la cimentación), se toma en cuenta que la cuña de deslizamiento (área de estudio) es un cuerpo rígido (indeformable), y suelo de cimentación estable.

Considerando estas limitaciones, la Ecuación Pérez Gonzalo, propone una extensión práctica de la teoría de Coulomb sobre el comportamiento de una cuña que se desliza sobre un plano de falla actuando sobre un muro de contención. La idea se fundamenta en introducir fuerzas de inercia generadas en la cuña deslizante, las hipótesis en que se basa la ecuación Pérez Gonzalo, se destacan a continuación:

- 1) El estado plástico activo se desarrolla por completo en toda la masa del suelo, en la cual se considera homogéneo, isótropo, linealmente elástico y semi-infinito (no es aplicable para el estado plástico pasivo).
- 2) Los desplazamientos del muro de retención es nulo.
- 3) Cuando la superficie del relleno se tome inclinado, debe considerarse un muro rugoso, en caso contrario será liso. Además, si el respaldo del muro es inclinado respecto a la vertical, las presiones resultantes sobre el respaldo del muro, tendrá la misma inclinación mas el ángulo de la rugosidad del muro si es el caso.
- 4) La sobrecarga considerada será uniformemente distribuida en toda la longitud superficial de la cuña.
- 5) El tipo de suelo a considerar como material de relleno, será friccionante o cohesivo – friccionante, saturado o no saturado, con niveles freáticos por debajo de la base o arriba como sea el caso.
- 6) El comportamiento de la cuña de suelo se considera rígido, y la superficie de falla plana, pasando por el pie del muro.
- 7) La aceleración inducida por un sismo, será uniforme en toda la cuña deslizante. Dicha fuerza de aceleración se obtendrá, multiplicando los coeficientes sísmicos horizontal o vertical por el peso de la cuña (mas la sobrecarga uniforme).

Todas estas hipótesis mencionadas, fueron recopiladas de varios autores, con la idea de ampliar la aplicación de sus ecuaciones y tener una situación muy desfavorable ante cualquier evento de la naturaleza, así mismo se pretende el uso de la misma volviéndola muy práctica (programación de la ecuación) y confiable.

DESARROLLO DE LA TEORIA

Este método consiste en determinar el empuje activo planteando el problema como se muestra en la Figura 8.

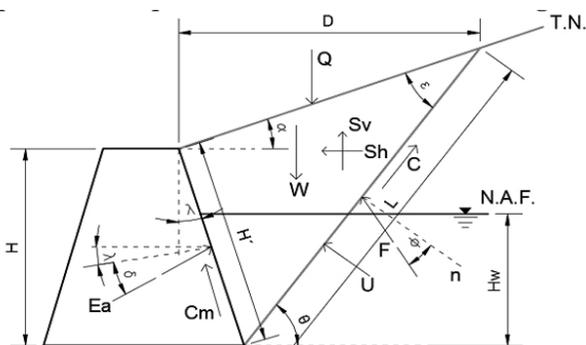


Figura 8. Análisis de la ecuación Pérez Gonzalo, (Pérez G. G., 2018).

Para el análisis se realiza una sumatoria de fuerzas horizontales (x) y verticales (y), para el despeje del empuje activo (Ea).

Sumatoria de fuerzas en dirección vertical del plano (y):

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ -W - Q + C m * \cos \lambda + S v + E a * \sin (\delta + \lambda) + F * \cos (\theta - \varphi) + C * \sin \theta + U * \cos \theta &= 0 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en dirección horizontal del plano (x):

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ E a * \cos (\delta + \lambda) - S h + C * \cos \theta - F * \sin (\theta - \varphi) - U * \sin \theta - C m * \sin \lambda &= 0 \end{aligned}$$

2
Despeje de F de la ecuación 1:

$$F * \cos (\theta - \varphi) = W + Q - C m * \cos \lambda - S v - E a * \sin (\delta + \lambda) - C * \sin \theta - U * \cos \theta$$

$$\begin{aligned} \mathbf{3} \\ F &= \frac{W + Q - C m * \cos \lambda - S v - E a * \sin (\delta + \lambda) - C * \sin \theta - U * \cos \theta}{\cos (\theta - \varphi)} \end{aligned}$$

Sustitución de F en la ecuación 2 y despeje del empuje activo (Ea):

$$E a * \cos (\delta + \lambda) - S h + C * \cos \theta - [W + Q - C m * \cos \lambda - S v - E a * \sin (\delta + \lambda) - C * \sin \theta - U * \cos \theta] * \tan (\theta - \varphi) - U * \sin \theta - C m * \sin \lambda = 0$$

$$E a * \cos (\delta + \lambda) - S h + C * \cos \theta - [W + Q - C m * \cos \lambda - S v - E a * \sin (\delta + \lambda) - C * \sin \theta - U * \cos \theta] * \tan (\theta - \varphi) - U * \sin \theta - C m * \sin \lambda = 0$$

$$E a * \cos (\delta + \lambda) + E a * \sin (\delta + \lambda) * \tan (\theta - \varphi) = S h - C \cos \theta + [W + Q - C m \cos \lambda - S v - C \sin \theta - U \cos \theta] * \tan (\theta - \varphi) + U \sin \theta + C m \sin \lambda$$

$$\mathbf{4} \\ E a = \frac{S h - C \cos \theta + [W + Q - C m \cos \lambda - S v - C \sin \theta - U \cos \theta] * \tan (\theta - \varphi) + U \sin \theta + C m \sin \lambda \cos (\delta + \lambda) + \sin (\delta + \lambda) * \tan (\theta - \varphi)}{\cos (\delta + \lambda) + \sin (\delta + \lambda) * \tan (\theta - \varphi)}$$

Donde:

Ea= fuerza debido al empuje activo

F= fuerza resistente debido a la fricción del suelo

Sh= fuerza sísmica horizontal

C= fuerza resistente debida a la cohesión del suelo

W= peso de la cuña

Q= sobre carga repartida sobre la cuña

Cm= fuerza resistente debida a la adherencia entre muro y suelo

Sv= fuerza sísmica vertical

U= fuerza de Subpresión hidráulica

θ = ángulo de inclinación de la cuña

λ = ángulo de inclinación del respaldo del muro

Φ = ángulo de fricción interna del suelo

δ = ángulo de fricción interna entre muro y suelo

α = ángulo de inclinación del terreno

Todas las fuerzas involucradas se determinan por separado, para su demostración y validez de la ecuación.

APLICACIÓN Y ANALISIS DE LA ECUACION DE EMPUJE DE TIERRAS (PEREZ GONZALO) CONSIDERANDO EFECTO SISMICO A TRAVES DE UNA HOJA DE CALCULO EXCEL"

El número considerable de daños parciales y totales sufridos por estribos de puentes y muros de contención durante eventos sísmicos pone de manifiesto la necesidad de diseñar estas obras aplicando procedimientos y criterios que permitan establecer un adecuado nivel de seguridad.

Debida a esta necesidad, se propone el uso práctico de la Ecuación Pérez Gonzalo, utilizando criterios simplificadorios y razonamientos fundamentados en otros autores. Como, el tratar con material de re-

lleno friccionante y cohesivo – friccionante saturado (se considera nivel freático) o no saturados (nivel de agua muy abajo de la cimentación), se toma en cuenta que la cuña de deslizamiento (área de estudio) es un cuerpo rígido (indeformable), y suelo de cimentación estable.

Considerando estas limitaciones, la Ecuación Pérez Gonzalo, propone una extensión práctica de la teoría de Coulomb sobre el comportamiento de una cuña que se desliza sobre un plano de falla actuando sobre un muro de contención. La idea se fundamenta en introducir fuerzas de inercia generadas en la cuña deslizante, las hipótesis en que se basa la ecuación Pérez Gonzalo, se destacan a continuación:

- 1) El estado plástico activo se desarrolla por completo en toda la masa del suelo, en la cual se considera homogéneo, isotrópico, linealmente elástico y semi-infinito (no es aplicable para el estado plástico pasivo).
- 2) Los desplazamientos del muro de retención es nulo.
- 3) Cuando la superficie del relleno se tome inclinado, debe considerarse un muro rugoso, en caso contrario será liso. Además, si el respaldo del muro es inclinado respecto a la vertical, las presiones resultantes sobre el respaldo del muro, tendrá la misma inclinación mas el ángulo de la rugosidad del muro si es el caso.
- 4) La sobrecarga considerada será uniformemente distribuida en toda la longitud superficial de la cuña.
- 5) El tipo de suelo a considerar como material de relleno, será friccionante o cohesivo – friccionante, saturado o no saturado, con niveles freáticos por debajo de la base o arriba como sea el caso.
- 6) El comportamiento de la cuña de suelo se considera rígido, y la superficie de falla plana, pasando por el pie del muro.
- 7) La aceleración inducida por un sismo, será uniforme en toda la cuña deslizante. Dicha fuerza de aceleración se obtendrá, multiplicando los coeficientes sísmicos horizontal o vertical por el peso de la cuña (mas la sobrecarga uniforme).

Todas estas hipótesis mencionadas, fueron recopiladas de varios autores, con la idea de ampliar la aplicación de sus ecuaciones y tener una situación muy desfavorable ante cualquier evento de la naturaleza, así mismo se pretende el uso de la misma volviéndola muy practica (programación de la ecuación) y confiable.

DESARROLLO DE LA TEORIA

Este método consiste en determinar el empuje activo planteando el problema como se muestra en la Figura 9.

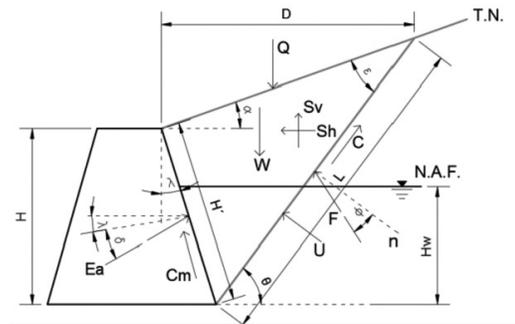


Figura 9. Análisis de la ecuación Pérez Gonzalo. , (Pérez G. G. ,2018).

Para el análisis se realiza una sumatoria de fuerzas horizontales (x) y verticales (y), para el despeje del empuje activo (Ea).

- Sumatoria de fuerzas en dirección vertical del plano (y):

$$\begin{aligned} \Sigma Fy=0 \\ -W-Q+Cm*\cos\lambda+Sv+Ea*\sin(\delta+\lambda)+F*\cos(\theta-\varphi)+C*\sin \\ \theta+U*\cos\theta=0 \end{aligned}$$

1

Y

X

„

72

- Sumatoria de fuerzas en dirección horizontal del plano (x):

$$\begin{aligned} \Sigma Fx=0 \\ Ea*\cos(\delta+\lambda)-Sh+C*\cos\theta-F*\sin(\theta-\varphi)-U*\sin\theta-Cm*\sin \\ \lambda=0 \end{aligned}$$

- Despeje de F de la ecuación 1:

$$F*\cos(\theta-\varphi)=W+Q-Cm*\cos\lambda-Sv-Ea*\sin(\delta+\lambda)-C*\sin\theta-U*\cos\theta$$

- Sustitución de F en la ecuación 2 y despeje del empuje activo (Ea):

$$Ea*\cos(\delta+\lambda)-Sh+C*\cos\theta-[W+Q-Cm*\cos\lambda-Sv-Ea*\sin(\delta+\lambda)-C*\sin\theta-U*\cos\theta*\cos(\theta-\varphi)]*\sin(\theta-\varphi)-U*\sin\theta-Cm*\sin\lambda=0$$

$$\begin{aligned} Ea*\cos(\delta+\lambda)-Sh+C*\cos\theta-[W+Q-Cm*\cos\lambda-Sv-Ea*\sin(\delta+\lambda)-C*\sin\theta-U*\cos\theta] * \tan(\theta-\varphi)-U*\sin\theta-Cm*\sin\lambda=0 \\ Ea*\cos(\delta+\lambda)+Ea*\sin(\delta+\lambda)*\tan(\theta-\varphi)=Sh-C*\cos\theta+[W+Q-Cm*\cos\lambda-Sv-C*\sin\theta-U*\cos\theta]*\tan(\theta-\varphi)+U*\sin\theta+Cm*\sin\lambda \end{aligned}$$

Donde:

- Ea= fuerza debido al empuje activo
- F= fuerza resistente debido a la fricción del suelo
- Sh= fuerza sísmica horizontal
- C= fuerza resistente debida a la cohesión del suelo
- W= peso de la cuña
- Q= sobre carga repartida sobre la cuña
- 2
- 3
- 4

$$Ea = Sh - C \cos \theta + [W + Q - Cm \cos \lambda - Sv - C \sin \theta - U \cos \theta] \cdot \tan(\theta - \varphi) + U \sin \theta + Cm \sin \lambda \cos(\delta + \lambda) + \sin(\delta + \lambda) \cdot \tan(\theta - \varphi)$$

$$F = W + Q - Cm \cdot \cos \lambda - Sv - Ea \cdot \sin(\delta + \lambda) - C \cdot \sin \theta - U \cdot \cos \theta \cdot \cos(\theta - \varphi)$$

Cm= fuerza resistente debida a la adherencia entre muro y suelo

- Sv= fuerza sísmica vertical
- U= fuerza de Subpresión hidráulica
- θ = ángulo de inclinación de la cuña
- λ = ángulo de inclinación del respaldo del muro
- Φ = ángulo de fricción interna del suelo
- δ = ángulo de fricción interna entre muro y suelo
- α = ángulo de inclinación del terreno

Todas las fuerzas involucradas se determinan por separado, para su demostración y validez de la ecuación.

• Deducción de las fuerzas involucradas en la ecuación 4:

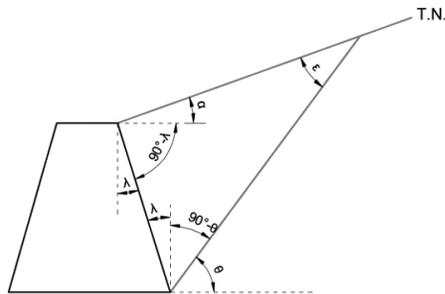


Figura 10. Ángulos internos de la cuña de deslizamiento. (Pérez G. G., 2018). $180^\circ = (90^\circ - \theta + \lambda) + (90^\circ - \lambda + \alpha) + \epsilon$ $180^\circ = 180^\circ - \theta + \alpha + \epsilon$

5
 $\epsilon = \theta - \alpha$

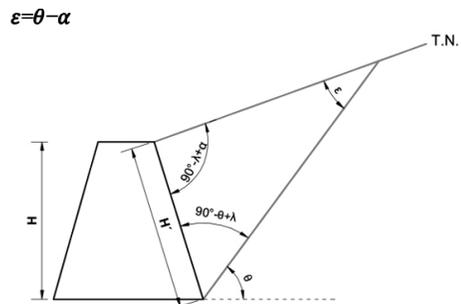


Figura 11. Longitud del respaldo del muro. , (Pérez G. G., 2018). $\cos \lambda = H / H'$

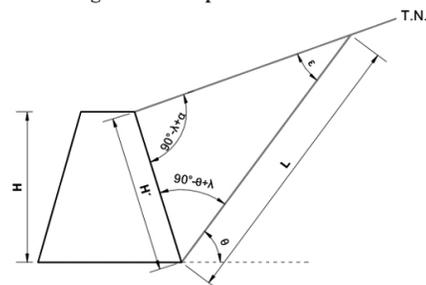


Figura 12. Longitud de la línea de falla en la cuña. , (Pérez G. G., 2018)..

$H' = H \cos \lambda = H \cdot \sec \lambda$
 6

Aplicando la ley de senos se obtiene:
 $H' \sin \epsilon = L \sin(90^\circ - \lambda + \alpha)$

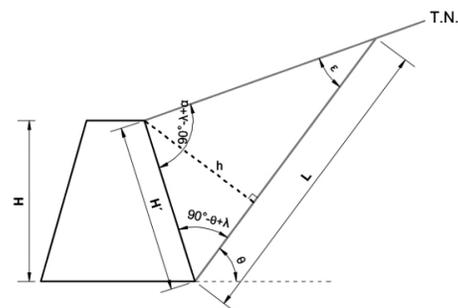


Figura 13. Altura perpendicular a la línea de falla de la cuña. , (Pérez G. G., 2018).

$\sin(90^\circ - \theta + \lambda) = h / H'$
 $h = (H \cdot \sec \lambda) \cdot \sin(90^\circ - \theta + \lambda)$

7
 8
 $L = (H \cdot \sec \lambda \cdot \sin(90^\circ - \lambda + \alpha) \sin \epsilon)$

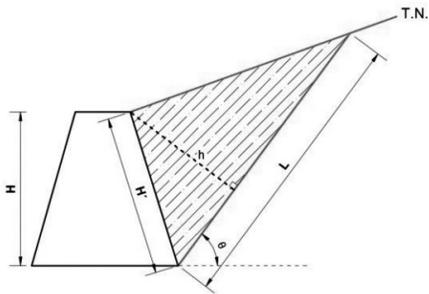


Figura 14. Área de la cuña. , (Pérez G. G. ,2018). $A=L*h2= [(H*\sec\lambda)*\sin(90^\circ-\lambda+\alpha) \sin\epsilon]*[(H*\sec\lambda)*\sin(90^\circ-\theta+\lambda)]2$

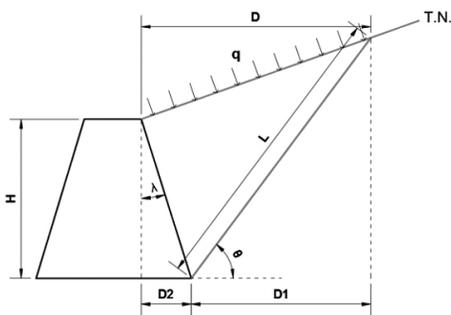


Figura 15. Sobrecarga distribuida uniformemente, (Pérez G. G. ,2018).

$$A=(H*\sec\lambda)2*\sin(90^\circ-\lambda+\alpha)*\sin(90^\circ-\theta+\lambda)2*\sin\epsilon$$

$$9$$

$$w=ym*A$$

$$10$$

$$\cos\theta=D1L \therefore D1=L*\cos\theta \quad \tan\lambda=D2H \therefore$$

$$D2=H*\tan\lambda$$

$$D=D1+D2$$

$$Q= Q*D$$

$$C=c*L$$

$$Cm=cm*H'$$

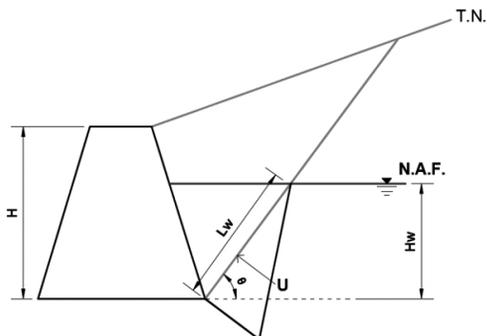


Figura 16. Consideración de Nivel de Agua Freática. , (Pérez G. G. ,2018).

$$\sin\theta=HwLw$$

$$U=(hw*csc\theta)*(Hw*\gamma_w)2$$

$$Lw=Hw*csc\theta$$

$$U=Hw2*ym*csc\theta2$$

$$Sh=csh*(W+Q)$$

$$Sv=csv*(W+Q)$$

PROGRAMACION DE LA ECUACION

Se observa que para el cálculo del empuje en la ecuación propuesta, es muy parecida a la ecuación de Coulomb por la variación del ángulo de inclinación de la cuña, solamente cambia, con la implementación del empuje hidrostático y fuerzas sísmicas consideradas.

Para calcular el empuje máximo o crítico se varía en ángulo de inclinación θ, es por eso que se opta por una programación en una hoja de cálculo (Excel) para encontrar dicho empuje de manera rápida para cada valor de θ.

Primeramente se realizan dos columnas en Excel, una para el valor del ángulo θ y otra para el ángulo ε, donde, este último resulta de la diferencia del ángulo θ y α (inclinación del relleno con la horizontal), y solo se aceptan valores positivos.

Tabla 5. Valores del ángulo de inclinación

Θ	ε
0°	0°-α
1°	1°-α
2°	2°-α
3°	3°-α . .
.	.
.90°	90°-α

Posteriormente se realiza otra columna en E, para calcular H', para esto será necesario tener dos hojas de Excel, una que me permita introducir parámetros del cálculo y otra donde estén las formulas (fig. 5.1). Por lo que en E4 se introduce la siguiente fórmula:

$$= (P R O G R A M A ! \$ B \$ 4) / \text{COS}(\text{PROGRAMA!}\$J\$2*3.1416/180)$$

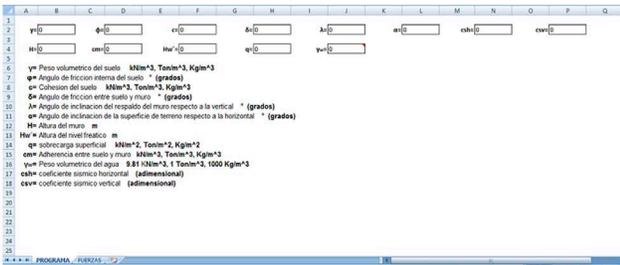


Figura 17. Hoja de parámetros del cálculo, (Pérez G. C., 2018).

Para calcular la longitud de la cuña de falla se realiza otra columna en F y se introduce la siguiente fórmula en F4:

$$=E4 * \text{SENO}((90 + \text{PROGRAMA!} \$L\$2 - \text{PROGRAMA!} \$J\$2) * 3.1416/180) / (\text{SENO}(\text{FUERZAS!}D4 * 3.1416/180))$$

Nuevamente se debe crear otra columna en G, con el fin de poder calcular la altura del triángulo de la cuña de deslizamiento, introduciendo en G4 la fórmula:

$$=E4 * \text{SENO}((90 - C4 + \text{PROGRAMA!} \$J\$2) * 3.1416/180)$$

En la columna H debe agregarse el cálculo del área de la cuña en estudio, y en la H4 se introduce la siguiente fórmula:

$$=F4 * G4 / 2$$

Para el cálculo del peso de la cuña, se introduce en I4 la fórmula:

$$=H4 * \text{PROGRAMA!} \$B\$2$$

Hoja de parámetros

Hoja de Formulas

En la columna J se calcula la distancia horizontal de la superficie de la cuña, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$=F4 * \text{COS}(C4 * 3.1416/180) + \text{PROGRAMA!} \$B\$4 * \text{TAN}(\text{PROGRAMA!} \$J\$2 * 3.1416/180)$$

Una vez obtenida la distancia horizontal, se procede a calcular la sobrecarga en la superficie, creando una columna en K, e introduciendo la siguiente fórmula en K4:

$$=J4 * \text{PROGRAMA!} \$H\$4$$

Para la fuerza resistente debida a la cohesión, se usa la columna L, y se introduce en L4 la siguiente fórmula:

$$=F4 * \text{PROGRAMA!} \$F\$2$$

En la columna M se calcula la fuerza resistente debida a la adherencia entre muro y suelo, para ello se introduce en M4 la fórmula:

$$=E4 * \text{PROGRAMA!} \$D\$4$$

Para conocer la fuerza de Subpresión hidráulica, es necesario calcular antes la longitud donde se desarrolla dicha presión, para eso se ocupa la columna N y se escribe en N4 la fórmula:

$$=\text{PROGRAMA!} \$F\$4 / \text{SENO}(\text{FUERZAS!}C4 * 3.1416/180)$$

Una vez obtenido lo anterior se usa la columna O para conocer la Subpresión hidráulica si existe en el muro y se introduce en O4 la siguiente fórmula:

$$=(N4 * \text{PROGRAMA!} \$F\$4 * \text{PROGRAMA!} \$J\$4) / 2$$

Para los cálculos de la fuerza sísmica horizontal se usara la columna P, y en la celda P4 se escribe la fórmula:

$$=(I4 + K4) * \text{PROGRAMA!} \$N\$2$$

Por lo consiguiente, para la fuerza sísmica vertical se ocupara la columna Q, y se escribirá en la celda Q4 la fórmula:

$$=(K4 + I4) * \text{PROGRAMA!} \$P\$2$$

Teniendo todos los valores de distancias, ángulos y fuerzas, se ocupara la columna R específicamente para determinar la fuerza resistente debido a la fricción del suelo, escribiendo en R4 la siguiente fórmula:

$$=(I4 + K4 - M4 * \text{COS}(\text{PROGRAMA!} \$J\$2 * 3.1416/180) - \text{FUERZAS!}Q4 - \text{FUERZAS!}B4 * \text{SENO}((\text{PROGRAMA!} \$H\$2 + \text{PROGRAMA!} \$J\$2) * 3.1416/180) - \text{FUERZAS!}L4 * \text{SENO}(\text{FUERZAS!}C4 * 3.1416/180) - \text{FUERZAS!}O4 * \text{COS}(\text{FUERZAS!}C4 * 3.1416/180)) / (\text{COS}((\text{FUERZAS!}C4 - \text{PROGRAMA!} \$D\$2) * 3.1416/180))$$

Una vez completado los parámetros que permiten calcular el empuje de suelo, se ocupa la columna B para esta ecuación y se escribe en B4 la fórmula:

$$=\text{SI}(D4 > 0, (P4 - L4 * \text{COS}(C4 * 3.1416/180) + O4 * \text{SENO}(C4 * 3.1416/180) + M4 * \text{SENO}(\text{PROGRAMA!} \$J\$2 * 3.1416/180) + \text{TAN}((C4 - \text{PROGRAMA!} \$D\$2) * 3.1416/180)) * (\text{FUERZAS!}I4 + \text{FUERZAS!}K4 - \text{FUERZAS!}M4 * \text{COS}(\text{PROGRAMA!} \$J\$2 * 3.1416/180) - \text{FUERZAS!}Q4 - \text{FUERZAS!}L4 * \text{SENO}(\text{FUERZAS!}C4 * 3.1416/180) - \text{FUERZAS!}O4 * \text{COS}(\text{FUERZAS!}C4 * 3.1416/180))) / (\text{COS}((\text{PROGRAMA!} \$H\$2 + \text{PROGRAMA!} \$J\$2) * 3.1416/180) + \text{TAN}((\text{FUERZAS!}C4 - \text{PROGRAMA!} \$D\$2) * 3.1416/180)) * \text{SENO}((\text{PROGRAMA!} \$H\$2 + \text{PROGRAMA!} \$J\$2) * 3.1416/180), 0)$$

Se condiciona la formula debido a que no queremos que nos considere el ángulo negativo ϵ , y por lo consiguiente nos tome en cuenta un empuje negativo.

Al final, en la hoja de cálculo de fuerzas (formulas) nos debe quedar cada columna en el orden indicado como lo muestra la figura 18, con la finalidad que las formulas antes escritas puedan correr sin ningún problema.

Figura 18. Orden en columnas para el cálculo de las fuerzas, (Pérez G. G., 2018).

Una vez corrido las formulas hasta un ángulo θ de 90° , con un incremento de 0.1, será necesario encontrar el valor máximo del empuje, para esto, se escribirá en la hoja de parámetros (programa), celda N5 la siguiente fórmula:

$$=MAX(FUERZAS!B4:B903)$$

Con el fin de darle más importancia al ángulo de falla de la cuña, se obtendrá este para lo cual la fuerza del empuje es máximo, escribiendo en la hoja de parámetros, celda N6 la fórmula:

$$=BUSCARV(M5,FUERZAS!B3:C903,2,FALSO)$$

Ahora solo resta editar la hoja de parámetros de manera que al ingresar los datos geométricos del muro y condición del suelo, este pueda realizar los cálculos correspondientes de manera segura, como lo muestra la figura 19.

Es necesario que los datos a ingresar estén en las mismas unidades y que el peso volumétrico del agua se cambie al valor que corresponda.

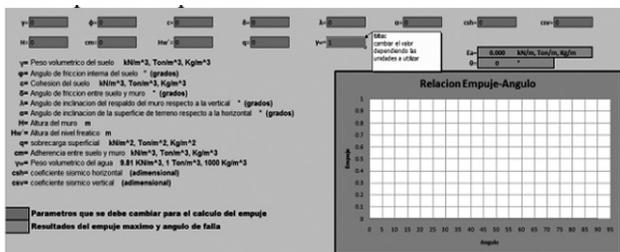


Figura 19. Programa para calcular el empuje de suelo utilizando la ecuación Pérez Gonzalo. (Pérez G. G., 2018).

APLICACIÓN DE ECUACION PROPUESTA A EMPUJE DE TIERRAS PARA SU DEMOSTRACIÓN

Para poder hacer valida la Ecuación Pérez Gonzalo y su programación, será necesario comparar con otros métodos antes mencionados, para lo cual se utilizara el método de Rankine, método de Coulomb, método de Terzaghi y formula de Mononobe – Okabe, donde cada uno tiene límites diferentes de aplicabilidad y parámetros propios.

Con ello se pretende darle un rango amplio de aplicación a la Ecuación propuesta, logrando que su uso sea práctico y sencillo, para todo aquel que pretenda utilizarlo.

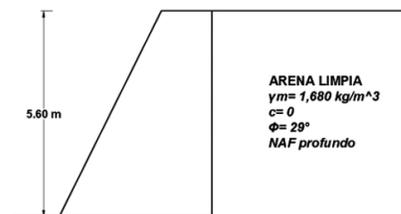


Figura 20. Método de Rankine contra ecuación Pérez Gonzalo, (Pérez G. G., 2018).

Ejemplo 1: determine la magnitud de la fuerza de empuje activo, E_a , que produce un relleno de arena limpia sobre la pared vertical lisa interna (paramento) de un muro que tiene 5.60 m de altura.

El peso volumétrico seco de la arena es de 1,680 kg/m³, el ángulo de fricción interna de 29° , y el nivel de aguas freáticas, N.A.F., es profundo (figura 6.1).

Figura 6.1. Ejemplo 1 de empuje de tierras (Rankine). Propósito: calcular el empuje de un relleno puramente friccionante por el método de Rankine y la ecuación Pérez Gonzalo.

- Solución por el método de Rankine

$$E_A = 12KA\gamma H^2$$

$$\text{Donde } KA = \tan^2(45^\circ - \phi/2) = \tan^2(45^\circ - 29^\circ/2) = 0.34$$

$$7EA = 12(0.347) * (1,680 \text{ kg/m}^3) * (5.60 \text{ m})^2 = 9,140 \text{ kg/3}$$

- Solución por la ecuación Pérez Gonzalo

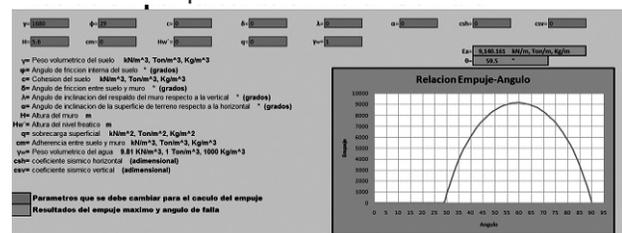


Figura 21. Análisis del ejemplo 1 con la ecuación Pérez Gonzalo. (Pérez G. G., 2018).

Colocando los parámetros del muro y suelo, se observa que el empuje activo es $E_a = 9,140.161 \text{ kg/m}$ y esto ocurre a un ángulo de falla $\theta = 59.5^\circ$. Para poder corroborar los valores se sustituirá los datos en cada ecuación correspondiente. $\varepsilon = \theta - \alpha = 59.5^\circ - 0^\circ = 59.5^\circ$

$$\begin{aligned}
 H' &= H \cos \lambda = 5.60 & m \cos 0^\circ &= 5.60 & m \\
 L &= (H') * \sin(90^\circ - \lambda + \alpha) \sin \varepsilon = (5.60 & m) * \sin(90^\circ - 0^\circ + 0^\circ) \sin 59.5^\circ &= 6.50 & m \\
 h &= (H') * \sin(90^\circ - \theta + \lambda) = (5.60 & m) * \sin(90^\circ - 59.5^\circ + 0^\circ) &= 2.842 & m \\
 A &= L * h / 2 = (6.50 & m) * (2.842 & m) / 2 &= 9.236 & m^2 \\
 W &= \gamma m * A = (1,680 \text{ kg/m}^3) * (9.236 & m^2) &= 15,516.87 & \text{ kg/m} \\
 D &= L * \cos \theta + H * \tan \lambda = (6.50 & m) * \cos 59.5^\circ + (5.6 & m) * \tan 0^\circ &= 3.3 & m \\
 Q &= q * D = 0 \text{ kg/m} & C &= c * L = 0 \text{ kg/m} \\
 C_m &= c_m * H' = 0 \text{ kg/m} & L_w &= H_w * c_{sc} \theta = 0 \text{ m} \\
 U &= H_w / 2 * \gamma_w * c_{sc} \theta = 0 \text{ kg/m} & S_h &= c_{sh} * (W + Q) = 0 \text{ kg/m} \\
 S_v &= c_{sv} * (W + Q) = 0 \text{ kg/m} \\
 E_a &= 0 - 0 \cos 59.5^\circ + [15,516.87 + 0 - 0 \cos 0^\circ - 0 - 0 \sin 59.5^\circ - 0 \cos 59.5^\circ] * \tan(59.5^\circ - 29^\circ) + 0 \sin 59.5^\circ + 0 \sin 0^\circ \cos(0^\circ + 0^\circ) + \sin(0^\circ + 0^\circ) * \tan(59.5^\circ - 29^\circ) & E_a &= 9,140.16 & \text{ kg/m}
 \end{aligned}$$

Ejemplo 2: determine el empuje activo que produce un limo arenoso sobre la pared vertical lisa interna de un muro que tiene 5.00 m de altura. La sobrecarga es de 4 ton/m2. El peso volumétrico de la masa de suelo es de 1.85 ton/m3, la cohesión es de 2 ton/m2 y el ángulo de fricción interna de 15° (fig.4.4.3). Para los casos siguientes:

- a) Cuando el NAF, es profundo.
- b) Cuando el NAF, es superficial.

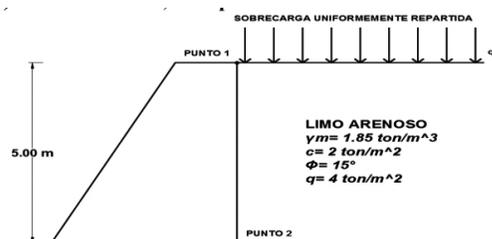


Figura 22. Ejemplo 2 de empuje de tierras (Rankine). (Pérez G. G., 2018).

Propósito: calcular el efecto de una carga externa uniformemente repartida en un relleno con cohesión y fricción, cuando el nivel de las aguas freáticas esta alto y cuando esta profundo.

Solución por el método de Mononobe – Okabe La componente vertical del sismo es igual a cero (KV=0).

Aplicando la formula de Mononobe – Okabe con: $\varphi = 35^\circ$, $\omega = 0^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\delta = 23.33^\circ$

$$\begin{aligned}
 \theta &= \arctg(Kh - Kv) = \arctg(0.21 + 0) = 11.31^\circ \\
 K_{ad} &= \cos 2(35^\circ - 0^\circ - 11.31^\circ) \cos 11.31^\circ \cos 20^\circ \cos(23.33^\circ + 0^\circ + 11.31^\circ) [1 + \sqrt{\sin(23.33^\circ + 35^\circ) \sin(35^\circ - 10^\circ - 11.31^\circ)}] \cos(23.33^\circ + 0^\circ + 11.31^\circ) \cos(10^\circ - 0^\circ) / 2 \\
 K_{ad} &= 0.464
 \end{aligned}$$

El empuje total debido al empuje estático más el del sismo vale:

$$\begin{aligned}
 EAT &= 12 \gamma H^2 (1 - Kv) K_{ad} = 12 * (1.75 \text{ ton/m}^3) * (6 \text{ m})^2 * (1 - 0) * (0.464) = 14.62 \text{ ton/m} \\
 \text{El empuje estático vale: } EAE &= 12 * (1.75 \text{ ton/m}^3) * (6 \text{ m})^2 \cos 2(35^\circ - 0^\circ) \cos 20^\circ \cos(23.33^\circ + 0^\circ) [1 + \sqrt{\sin(23.33^\circ + 35^\circ) \sin(35^\circ - 10^\circ)}] \cos(23.33^\circ + 0^\circ) \cos(0^\circ - 10^\circ) / 2 \\
 EAE &= 8.656 \text{ ton/m} \\
 \text{El empuje, debido al sismo, es igual al empuje total menos el empuje estático:} \\
 EAD &= 14.62 \text{ ton/m} - 8.656 \text{ ton/m} = 5.964 \text{ ton/m}
 \end{aligned}$$

- Solución por la ecuación Pérez Gonzalo

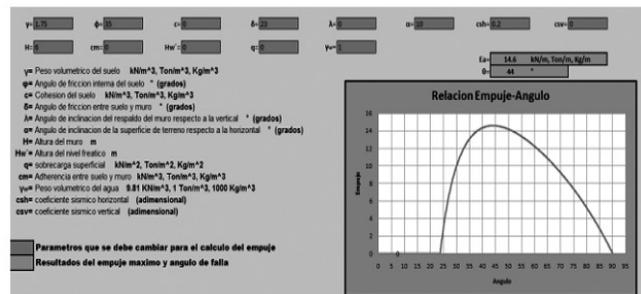


Figura 23. Análisis del ejemplo 5 con la ecuación Pérez Gonzalo. (Pérez G. G., 2018).

Colocando los parámetros del muro y suelo, se observa que el empuje activo es $E_a = 14.60 \text{ ton/m}$ y esto ocurre a un ángulo de falla $\theta = 44^\circ$. Para poder corroborar los valores se sustituirá los datos en cada ecuación correspondiente. $\varepsilon = \theta - \alpha = 44^\circ - 10^\circ = 34^\circ$

$$\begin{aligned}
 H' &= H \cos \lambda = 6.0 & m \cos 0^\circ &= 6.0 & m \\
 L &= (H') * \sin(90^\circ - \lambda + \alpha) \sin \varepsilon = (6 & m) * \sin(90^\circ - 0^\circ + 10^\circ) \sin 34^\circ &= 10.567 & m \\
 h &= (H') * \sin(90^\circ - \theta + \lambda) = (6 & m) * \sin(90^\circ - 44^\circ + 0^\circ) &= 4.316 & m \\
 A &= L * h / 2 = (10.567 & m) * (4.316 & m) / 2 &= 22.803 & m^2 \\
 W &= \gamma m * A = (1.75 \text{ ton/m}^3) * (22.803 & m^2) &= 39.906 & \text{ ton/m} \\
 D &= L * \cos \theta + H * \tan \lambda = (10.567 & m) * \cos 44^\circ + (6 & m) * \tan 0^\circ &= 7.601 & m \\
 Q &= q * D = 0 \text{ kg/m} & C &= c * L = 0 \text{ kg/m} \\
 C_m &= c_m * H' = 0 \text{ kg/m} & L_w &= H_w * c_{sc} \theta = 0 \text{ m} \\
 U &= H_w / 2 * \gamma_w * c_{sc} \theta = 0 \text{ kg/m} \\
 S_h &= c_{sh} * (W + Q) = (0.2) * (39.906 \text{ ton/m} + 0 \text{ ton/m}) &= 7.981 & \text{ kg/m} \\
 S_v &= c_{sv} * (W + Q) = 0 \text{ kg/m} \\
 E_a &= 7.981 - 0 \cos 44^\circ + [39.906 + 0 - 0 \cos 0^\circ - 0 - 0 \sin 44^\circ - 0 \cos 44^\circ] * \tan(44^\circ - 35^\circ) + 0 \sin 44^\circ + 0 \sin 0^\circ \cos(23.33^\circ + 0^\circ) + \sin(23.33^\circ + 0^\circ) * \tan(44^\circ - 35^\circ) & E_a &= 7.981 \text{ ton/m} + 6.32 \text{ ton/m} \\
 E_a &= 14.60 \text{ ton/m}
 \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

Las estructuras de retención son muy complejas de analizar en su profundidad y tan útiles en diversas obras de ingeniería, como los estribos en puentes y estabilidad de carreteras. Su diseño depende principalmente de las características de la estructura y de la tierra a soportar.

La ecuación propuesta abarca en su totalidad todos los efectos que la estructura pudiera sufrir en cualquier instante. Su comprobación con las teorías de Rankine, Coulomb y Mononobe – Okabe, resulto estar muy cerca como se demostró anteriormente, y no fue casualidad alguna que los valores coincidieran, si no, que el razonamiento propuesto en la ecuación Pérez Gonzalo, es muy similar a estas teorías, lo único planteado fue, una extensión de las mismas, con el fin de simular lo más próximo a la realidad y buscar condiciones crítica.

Lo práctico de la ecuación presentada, radica en la programación y formulación de las ecuaciones, ya que solo se necesita ingresar los parámetros geométricos del muro y características del suelo, y los resultados encontrados serán los del empuje máximo.

Con esta aportación quedan demostrados los conocimientos en varias materias de la ingeniería civil como, la geometría analítica, trigonometría, programación y mecánica de suelos, que durante la carrera se ha adquirido.

REFERENCIAS

- Badillo, J., & Rodríguez, R. (2014). *Mecánica de Suelos*, Tomo 2. México: Limusa, 2a. Edición.
- Cruz, J. C., & Hernández, J. A. (Noviembre 2012). *Diseño y revisión de muro de contención perimetral de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Facultad de Ingeniería, UNACH.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: THOMSON LEARNING.
- Deméneghi Colina, A., & Puebla Cadena, M. (2010). *Apuntes de Mecánica de Suelos, Volumen 1*. Ciudad de México: UNAM.
- Excel, M. O. (19 de Enero de 2011). www.ebriik.com. Recuperado el 21 de Marzo de 2018, de <https://www.uv.mx/personal/llopez/files/2013/03/Manual-Microsoft-Office-Excel-2010.pdf>
- Lavalle, E. D. (2013). *Problemas Básicos de Empujes de Suelos Sobre Estructuras de Soporte*. México: M. en A. Soledad Moliné Venanzi.
- Maza, M. A. (Marzo de 1999). *Diseño y Construcción de Muros de Contención*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Facultad de Ingeniería, UNACH.
- Pérez G. G. (2018). "Análisis de la Ecuación de Empuje de Tierras (Pérez Gonzalo) considerando efecto sísmico a través de programación excel": UNACH-FACULTAD DE INGENIERIA.
- Ramírez de la Cruz, J. C. (2012). *Diseño y Revisión del Muro de Contención Perimetral de la Zona del Libramiento SURPONIENTE de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez: UNACH-FACULTAD DE INGENIERIA.
- UPC, I. G.-G. (s.f.). *Universidad Politécnica de Cataluña, Grado en ingeniería de la Construcción*. Recuperado el 20 de marzo de 2018.