



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL EMPUJE ACTIVO ESTÁTICO Y DINÁMICO, DESARROLLADO POR
SUELOS COHESIVOS SOBRE EL TRASDÓS DE UN MURO DE CONTENCIÓN
CANTILEVER, MEDIANTE LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN 2D USANDO MIDAS GTS
NX**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: Katherin Fernanda Flores Lanza
Willian Alexander Rivadeneira Manobanda
TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Katherin Fernanda Flores Lanza con documento de identificación N° 1724194764 y por Willian Alexander Rivadeneira Manobanda con documento de identificación N°1721651154; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

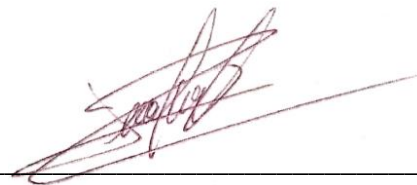
Quito, 23 de marzo del 2022

Atentamente,



Katherin Fernanda Flores Lanza

1724194764



Willian Alexander Rivadeneira Manobanda

1721651154

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Katherin Fernanda Flores Lanza con documento de identificación N°1724194764 y por Willian Alexander Rivadeneira Manobanda con documento de identificación N°1721651154; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis del Empuje Activo Estático y Dinámico, desarrollado por Suelos Cohesivos sobre el Trasdós de un Muro de contención Cantilever, mediante la Modelación Numérica en 2D usando Midas GTS NX”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

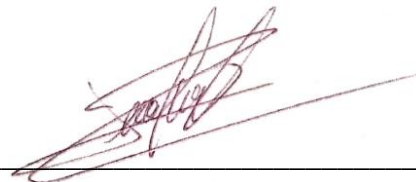
Quito, 23 de marzo del 2022

Atentamente,



Katherin Fernanda Flores Lanza

1724194764



Willian Alexander Rivadeneira Manobanda

1721651154

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N°1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL EMPUJE ACTIVO ESTÁTICO Y DINÁMICO, DESARROLLADO POR SUELOS COHESIVOS SOBRE EL TRASDÓS DE UN MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER, MEDIANTE LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN 2D USANDO MIDAS GTS NX , realizado por Katherin Fernanda Flores Lanza con documento de identificación N°1724194764 y por Willian Alexander Rivadeneira Manobanda con documento de identificación N°1721651154, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de marzo del 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Freddy Rodríguez B.", is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and includes a large flourish above the name.

Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, Msc.

1720094026

ÍNDICE

1. Introducción	3
2. Materiales y Métodos	3
2.1. Caracterización del suelo y parámetros geomecánicos.....	3
2.2. Aceleración normalizada en roca y registros sísmicos	4
2.3. Metodología	5
2.3.1. Modelos Constitutivos.....	5
2.3.2. Rigidez normal y tangencial del sistema suelo-muro.....	5
2.3.3. Modelación numérica	6
2.3.4. Teorías de cálculo de empuje activo estático	6
2.3.4.1.) Teoría de Rankine	7
2.3.4.2.) Teoría de Coulomb.....	7
2.3.5. Teorías de cálculo de empuje activo dinámico.	7
2.3.5.1.) Teoría de Mononobe-Okabe.....	8
2.3.5.2.) Teoría de Prakash-Saran.....	8
2.3.6. Análisis de sensibilidad	9
2.3.7. Regresión lineal múltiple.....	9
3. Resultados y Discusión	10
3.1. Prediseño del muro.....	10
3.2. Modelación Numérica en MIDAS GTS NX.....	10
3.2.1. Geometría y mallado	10
3.3. Ajuste del Espectro de Respuesta de los sismos	11
3.4. Resultados de cálculos analíticos y modelos numéricos.....	11
3.4.1. Análisis Estático	12
3.4.2. Análisis Pseudoestático	13
3.4.3. Análisis Dinámico	14
3.5. Correlación lineal múltiple.....	14
4. Conclusiones	15
Referencias	16

ANÁLISIS DEL EMPUJE ACTIVO ESTÁTICO Y DINÁMICO, DESARROLLADO POR SUELOS COHESIVOS SOBRE EL TRASDÓS DE UN MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER, MEDIANTE LA MODELACIÓN NUMÉRICA EN 2D USANDO MIDAS GTS NX

STATIC AND DYNAMIC ACTIVE SOIL PRESSURE ANALYSIS, IN COHESIVE BACKFILL SOILS ON THE CANTILEVER RETAINING WALL STEM, WITH 2D NUMERICAL MODEL USING MIDAS GTS NX

Katherin Flores Lanza¹, Willian Rivadeneira Manobanda², Freddy Rodríguez Badillo³

Resumen

El presente artículo analizó el empuje estático y dinámico desarrollado por un suelo cohesivo en el trasdós de un muro cantilever, a través de la comparación entre la modelación numérica MIDAS GTS NX en 2D y los procedimientos analíticos existentes. En la modelación numérica se consideró el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, usando parámetros como la cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad y peso específico obtenidos de ensayos de resistencia al corte, reflejando la importancia de considerar la influencia de la cohesión al calcular los empujes antes mencionados para no generar valores sobreestimados del empuje activo y que no disten de la realidad. De acuerdo con la comparación realizada entre el análisis dinámico tiempo historia y el cálculo analítico de Mononobe-Okabe (no considera la cohesión), se obtuvo una sobreestimación de hasta el doble del valor del empuje activo al utilizar una cohesión mayor a 0.9 t/m^2 en el análisis.

Se realizó un proceso de cálculo analítico del empuje estático y en condición sísmica, adicionalmente se obtuvo los empujes mediante la modelación numérica y se encontró una expresión analítica simplificada que aporta valores

Abstract

The present paper analyzed the static and dynamic soil pressure generated for a cohesive soil on the cantilever wall stem, with the comparison between 2D MIDAS GTS NX numerical model and the traditional analytical theories. In the numerical model, it was considered the Mohr-Coulomb constitutive model, using parameters such as cohesion, friction angle, elasticity modulus and unit weight obtained from shear strength tests, reflecting the importance of considering the influence of cohesion when calculating the soil pressure mentioned above in order not to generate overestimated values of the active soil pressure that do not differ from reality. According to the comparison made between the time-history dynamic analysis and the Mononobe-Okabe analytical calculation (not considering cohesion), it was obtained an overestimation up to twice the value of the active soil pressure when using a cohesion greater than 0.9 t/m^2 in the analysis.

It was performed an analytical calculation process of the static soil pressure and in earthquake condition, additionally it was obtained the soil pressure through numerical modeling, and it was found a simplified analytical expression that

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

³ Docente de Ingeniería Civil -Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: kflores1@est.ups.edu.ec; wriadeneira@est.ups.edu.ec; frodriguezbl@ups.edu.ec

aproximados del empuje activo dinámico en un suelo cohesivo bajo ciertas consideraciones. Para obtener esta expresión se realizó un análisis estadístico mediante el uso de una correlación lineal múltiple considerando variables independientes hasta encontrar los parámetros estadísticamente significativos que cumplan con un coeficiente de determinación (R^2) mayor al 95 %.

Palabras Clave: Suelo cohesivo, empuje activo estático, empuje activo dinámico, modelo numérico, MIDAS GTS NX, Mohr-Coulomb.

provides approximate values of the dynamic active soil pressure in a cohesive soil under certain considerations. To obtain this expression, it was performed a statistical analysis by using a multiple linear correlation considering independent variables until finding statistically significant parameters that meet a coefficient of determination (R^2) greater than 95 %.

Keywords: Cohesive soil, static active soil pressure, dynamic active soil pressure, numerical model, MIDAS GTS NX, Mohr-Coulomb.

1. Introducción

El empuje de suelo en estructuras de contención es uno de los temas que causan gran incertidumbre en la mecánica de suelos, a pesar de una investigación teórica y experimental por más de 200 años, aún existen discrepancias entre las soluciones teóricas y experimentales [1].

Como se menciona anteriormente para la determinación de los empujes de suelo en estructuras de contención, existe una problemática importante al no tomar en cuenta todas las propiedades del tipo de suelo ya que influyen en el cálculo de los empujes.

Tradicionalmente en nuestro medio se desprecia la cohesión generalizando a todos los suelos de relleno como granular, obteniendo una sobreestimación en las dimensiones para el diseño de muros, ocasionalmente se llega a considerar la cohesión y el ángulo de fricción del ensayo triaxial UU (Sin saturar) logrando una subestimación de las dimensiones antes mencionadas.

Se utilizó el modelo constitutivo de Mohr Coulomb en la modelación numérica, que considera un comportamiento idealizado elastoplástico del suelo, debido a que caracteriza de una manera simple el criterio de falla en comparación con otros modelos constitutivos.

Para verificar la influencia de la cohesión en el cálculo del empuje activo estático y en condición sísmica, se desarrolló un análisis de sensibilidad con la variación de la cohesión (c) (0.5 t/m^2 a 1.5 t/m^2), ángulo de fricción (ϕ) de (10° a 29°) y registros sísmicos, mediante la teoría de Rankine, Coulomb, Prakash-Saran, Mononobe Okabe y los modelos numéricos 2D.

Se realizó un análisis estadístico mediante el uso de una correlación lineal múltiple considerando variables dependientes e independientes, para determinar una correlación que cumpla con ciertos análisis previamente determinados, obteniendo un comportamiento ligeramente lineal.

2. Materiales y Métodos

2.1. Caracterización del suelo y parámetros geomecánicos.

Se llevó a cabo la investigación con los parámetros resistentes de un suelo natural mediante ensayo triaxial UU (sin saturar) y suelo de relleno a través del ensayo de corte directo (Anexo 1), cuyo resumen se presentan en la Tabla 1.:

Tabla 1. Parámetros de suelo natural y relleno

Parámetros	Suelo Natural	Suelo de relleno	Hormigón
Cohesión(t/m^2)	30	0.9	-
Ángulo de fricción ($^\circ$)	36.5	29	-
Peso Específico (t/m^3)	1.49	1.86	2.4
Módulo de Elasticidad (t/m^2)	2656	734	1811422
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.2

A partir de los valores de cohesión y ángulo de fricción del suelo de relleno, se obtuvo un rango de valores de c y ϕ , evidenciando la presencia del empuje activo debido a la cedencia del suelo de relleno, para el análisis de sensibilidad.

Mediante el número de golpes ponderado se determinó el perfil sísmico del suelo natural para obtener el coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto "Fa" según la NEC 15.

Para el módulo de elasticidad del suelo natural se eligió la curva esfuerzo-deformación cuyo esfuerzo de confinamiento representa el estado tensional del suelo cargado con el muro, de dicha curva se procedió a utilizar el método del módulo secante, calculando el 50 % del esfuerzo último y calcular la pendiente, que representa el módulo de elasticidad. (Anexo 2).

El módulo de elasticidad del suelo de relleno se determinó con una correlación en función del número de golpes del SPT [2].

2.2. Aceleración normalizada en roca y registros sísmicos

Se realizó la Figura 1 a 3., de los registros sísmicos medidos por la estación PRAM ubicada en el sector del antiguo aeropuerto de Quito, cuyos epicentros son: Calderón, Conocoto, Guayllabamba. Según la NEC 15, capítulo Peligro Sísmico, Diseño Sismorresistente [3], estos registros corresponden a la zona sísmica V, con $z = 0.4g$ y caracterización de peligro sísmico alta.

Epicentro Calderón: La aceleración máxima es $0.05g$ y se produjo en 7.75 segundos.

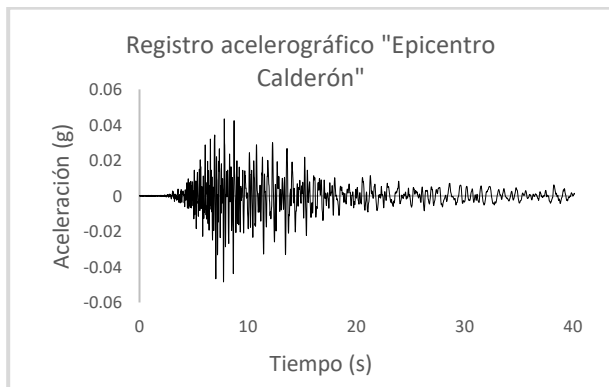


Figura 1. Acelerograma sismo 1

Epicentro Conocoto: La aceleración máxima es $0.003g$ y se produjo en 6.66 segundos.

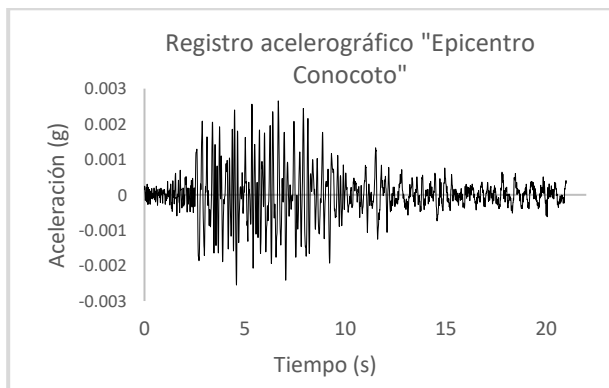


Figura 2. Acelerograma sismo 2

Epicentro Guayllabamba: La aceleración máxima es $0.03g$ y se produjo en 5.28 segundos.

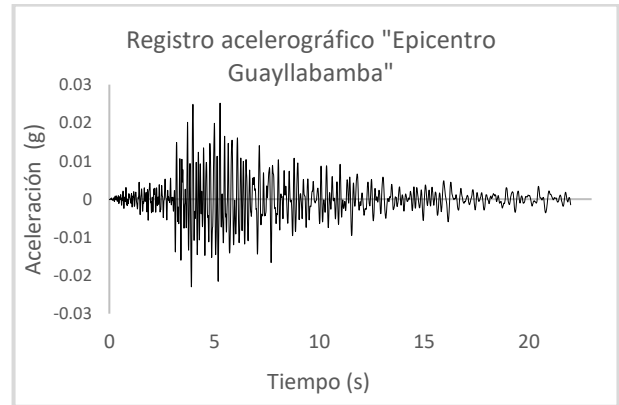


Figura 3. Acelerograma sismo 3

Los sismos fueron escalados y corregidos por línea base, de tal manera que el valor máximo en los espectros de respuesta de pseudoaceleración sea $z \cdot F_a$.

2.3. Metodología

2.3.1. Modelos Constitutivos

El modelo de Mohr Coulomb de la Figura 4., presenta una serie de funciones de fluencia que definen un límite entre el comportamiento elastoplástico perfecto, para todos los estados en la Figura 5., dentro del cono hexagonal el comportamiento es puramente elástico y todas las deformaciones son reversibles.

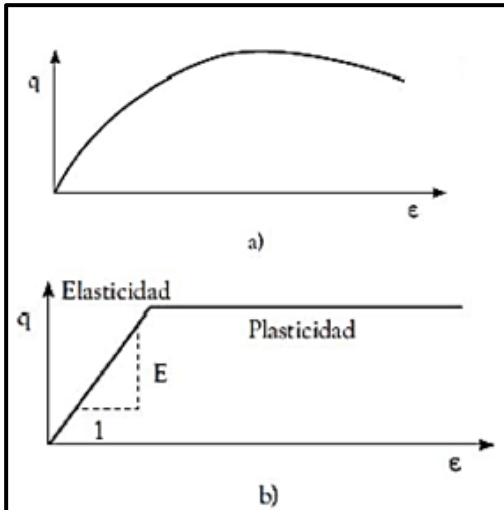


Figura 4. Representación de curva idealizada del modelo de Mohr – Coulomb: a) Respuesta experimental del suelo en ensayos de compresión triaxial, b) Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto (Mohr – Coulomb). Fuente: [4]

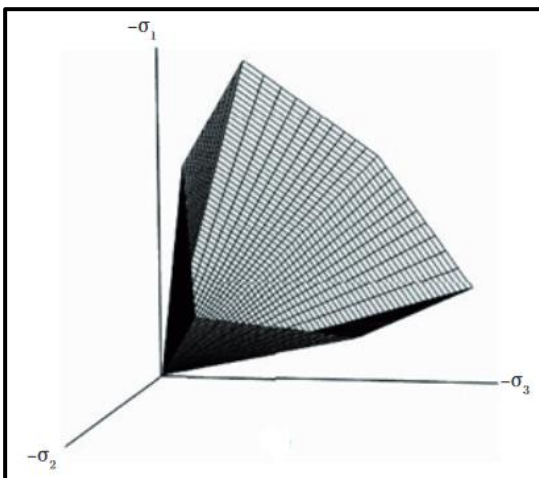


Figura 5. Superficie hexagonal de fluencia del modelo constitutivo Mohr-Coulomb[5]

2.3.2. Rigidez normal y tangencial del sistema suelo-muro

En la Figura 6., se muestra el comportamiento del contacto suelo-muro idealizado a través de la rigidez normal(k_n) y tangencial (k_t).

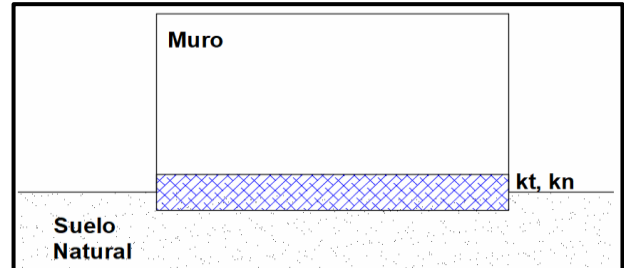


Figura 6. Representación del sistema muro-suelo con rigidez normal y tangencial

Se determinan mediante las ecuaciones 1 y 2:

$$k_n = \frac{\sigma_n}{\Delta_n} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{\sigma_t}{\Delta_h} \quad (2)$$

Donde:

σ_n : Esfuerzo normal

σ_t : Esfuerzo cortante

Δ_n : Desplazamiento normal

Δ_h : Desplazamiento horizontal

De acuerdo con la Tabla 2., se obtuvo valores referenciales del desplazamiento tangencial para conocer la deformación que produce el empuje activo y realizar el análisis de iteración de la rigidez tangencial (k_t) para el modelo numérico. La rigidez normal no interfiere en los modelos ejecutados.

Tabla 2. Valores referenciales de deformaciones horizontales según el tipo de suelo para empuje activo[6]

Tipo de Suelo	$\Delta L_a/H$
Arena Suelta	0.001-0.002
Arena Densa	0.0005-0.001
Arcilla Blanda	0.02
Arcilla Rígida	0.01

Donde:

$\Delta L_a/H$: Deformación unitaria horizontal.

2.3.3. Modelación numérica

Para realizar la simulación se optó por un programa de elementos finitos, MIDAS GTS NX, que utiliza la discretización del dominio del suelo y muro mediante mallas para un análisis tensodeformacional en 2D tanto para modelos estáticos y dinámicos[7].

Se consideró un análisis por etapas constructivas mostradas en la Tabla 3., para el cálculo del empuje activo:

Tabla 3. Análisis para el cálculo del empuje activo

Análisis	Consideraciones
Estático	-Suelo de relleno -Suelo natural -Muro -Peso Propio -Condiciones de borde estáticas (restricciones x-y) -Interfaz, simula el comportamiento friccional suelo-muro
Pseudoestático	-Suelo de relleno -Suelo natural -Muro -Peso Propio -Condiciones de borde estáticas (restricciones x-y) -Fuerza pseudoestática, considera una fuerza horizontal proporcional al peso - Interfaz, simula el comportamiento friccional suelo-muro
Dinámico tiempo historia	-Suelo de relleno -Suelo natural -Muro -Peso Propio - Interfaz, simula el comportamiento friccional suelo-muro -Modos de vibración del sistema suelo-muro, para definir el periodo de vibración. -Amortiguamiento. -Sistema de resortes, para darle continuidad al dominio del suelo a la izquierda y derecha. -Carga dinámica que varíe en el tiempo, para reflejar el efecto del peso propio en el análisis debido a las cargas sísmicas (acelerograma).

Se utilizó la herramienta “interfaz” que considera el rozamiento entre la base del muro y suelo natural, para determinar la deformación del suelo generado en el empuje activo como se observa en la figura 7, en consecuencia el muro se desplaza.

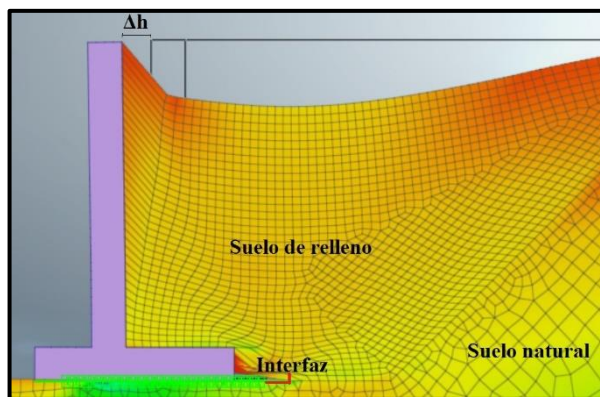


Figura 7. Desplazamiento del sistema suelo-muro en la modelación numérica.

2.3.4. Teorías de cálculo de empuje activo estático

En la teoría de Rankine y Coulomb, el empuje activo se determina a partir de los diagramas de esfuerzos resultantes mostrados en la Figura 8.

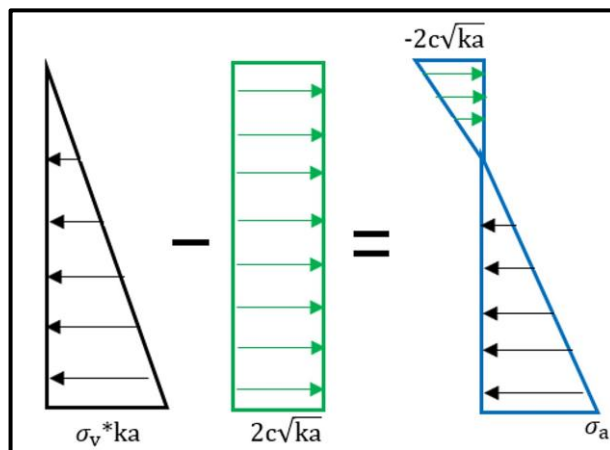


Figura 8. Diagramas de esfuerzo cálculo analítico

Mediante la expresión 3 se obtiene el empuje activo estático:

$$E_A = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 * Ka - 2 * c * \sqrt{Ka} * H \quad (3)$$

Donde:

g: Peso específico del suelo de relleno

H: Altura del muro

Ka: Coeficiente de empuje activo

c: Cohesión del suelo de relleno

El coeficiente activo (Ka) se determina con la teoría de Coulomb y Rankine.

2.3.4.1.) Teoría de Rankine

No considera el rozamiento entre el muro y el suelo, en la Figura 9. se muestra los parámetros considerados.

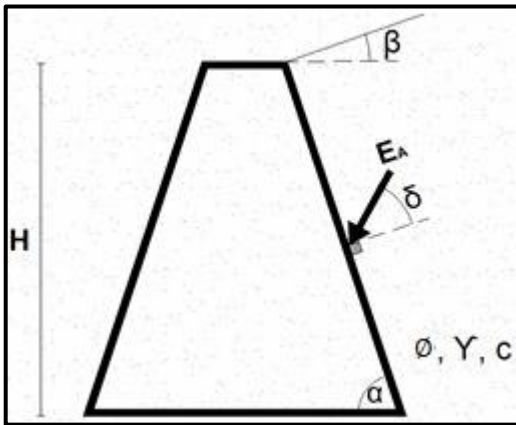


Figura 9. Parámetros para la teoría de Rankine

Donde:

α: Inclinación de la cara interna del muro

φ: Ángulo de fricción interna del suelo

β: Ángulo que forma la superficie del relleno con la horizontal

Para el cálculo del coeficiente activo se utiliza la ecuación 4:

$$K_a = \cos(\beta) * \frac{\cos(\beta) - \sqrt{\cos(\beta)^2 - \cos(\phi)^2}}{\cos(\beta) + \sqrt{\cos(\beta)^2 - \cos(\phi)^2}} \quad (4)$$

2.3.4.2.) Teoría de Coulomb

Considera la fricción entre el muro y suelo (δ) los valores referenciales[6] están entre $\frac{\phi}{2}$ y $\frac{2}{3}\phi$, en la Figura 10., se muestran los parámetros considerados.

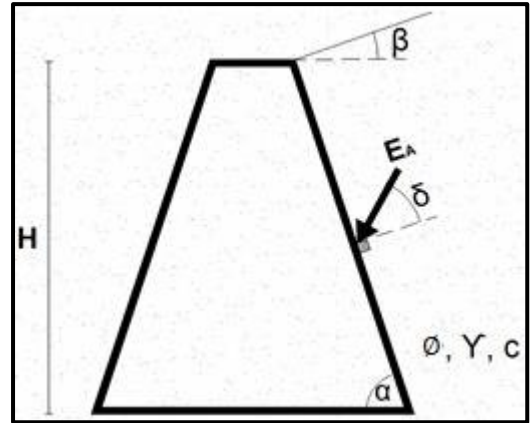


Figura 10. Parámetros considerados por la teoría de Coulomb

Para el cálculo del coeficiente activo se utiliza la ecuación 5 y 6:

Donde:

α: Inclinación de la cara interna del muro

φ: Ángulo de fricción interna del suelo

δ: Ángulo de fricción entre el suelo y el muro

β: Ángulo que forma la superficie del relleno con la horizontal

k: entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$

$$\delta = k * \phi \quad (5)$$

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\alpha + \phi)}{\text{sen}^2 \alpha * \text{sen}(\alpha - \delta) * [1 + \dots]} \quad (6)$$

$$\dots + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) * \text{sen}(\phi - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta) * \text{sen}(\alpha + \beta)}}$$

2.3.5. Teorías de cálculo de empuje activo dinámico.

Se basan en el desarrollo del empuje pseudoestático, es decir considera una fuerza horizontal proporcional al peso aplicada en el centro de gravedad de la cuña del suelo movilizado.

Según la norma NEC 15 se adoptó un valor del coeficiente sísmico horizontal (kh) de $0.6 * z * F_a$ y el coeficiente sísmico vertical (kv) de $2/3 * k_h$.

2.3.5.1.) Teoría de Mononobe-Okabe

Considera aceleraciones pseudoestáticas horizontales y verticales mostrados en la Figura 11., para suelos granulares desarrollada con las ecuaciones 7 a 9.

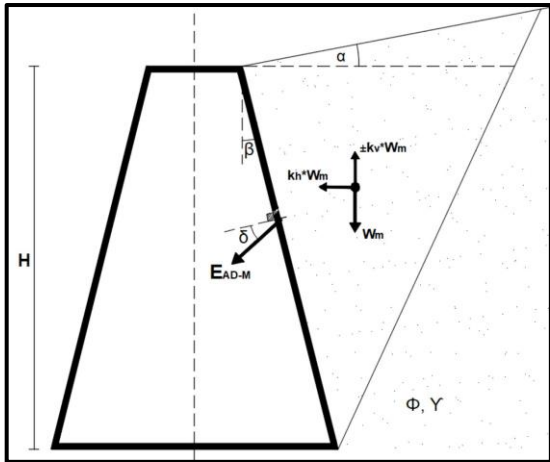


Figura 11. Parámetros para cálculo de empuje activo dinámico Mononobe-Okabe.

$$\theta_s = \text{atan}\left(\frac{k_h}{1 + k_v}\right) \quad (7)$$

$$k_{AD} = \frac{(1 \pm k_v) * \cos^2(\Phi - \beta - \theta_s)}{\cos\theta_s * \cos^2\beta * \cos(\delta + \beta + \theta)[1 + \dots]} \quad (8)$$

$$\dots \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{sen}(\Phi + \delta) * \text{sen}(\Phi - \alpha - \theta_s)}{\cos(\delta + \beta + \theta_s) * \cos(\alpha - \beta)}}}]^2$$

$$E_{AD-M} = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 * k_{AD} \quad (9)$$

Nota: Cuando el valor del radical es negativo se considera como cero.

Donde:

- γ : Peso específico del suelo de relleno
- H: Altura del muro
- c: Cohesión del suelo de relleno
- θ_s : Ángulo de gravedad aparente con respecto a la vertical

K_{AD} : Coeficiente activo del suelo en condiciones sísmicas.

z: Aceleración normalizada (g) máxima en roca
 α : Ángulo que forma la superficie de la cuña con la horizontal.

Φ : Ángulo de fricción interna del suelo

δ : Ángulo de fricción entre el suelo y muro

β : Inclinación de la cara interna del muro

E_{AD-M} : Empuje activo dinámico, teoría de Mononobe-Okabe.

2.3.5.2.) Teoría de Prakash-Saran

Para suelos cohesivos con ángulo de fricción, en la Figura 12. se muestran los parámetros considerados, se desarrolla con las ecuaciones 10 a 16.

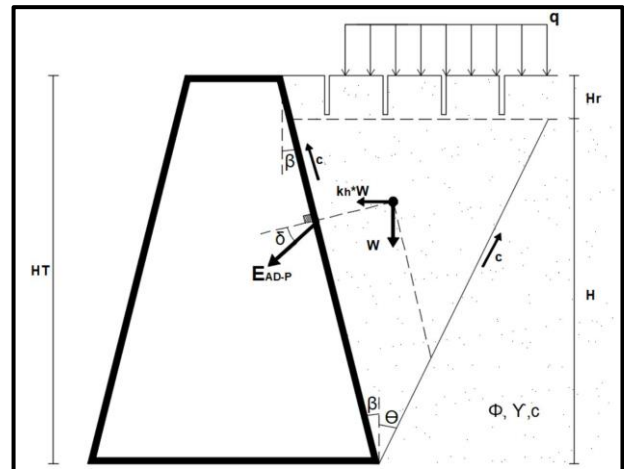


Figura 12. Parámetros para cálculo de empuje activo dinámico Prakash-Saran.

Donde:

K_a : coeficiente de empuje activo (sin sismo)
 N_{ay} , N_{ac} , N_{aq} , representan los coeficientes dinámicos asociados al peso, cohesión y sobrecarga respectivamente.

z: Aceleración normalizada (g) máxima en roca

c: Cohesión del suelo de relleno

γ : Peso específico del suelo de relleno

H_r : Profundidad de agrietamiento

H_T : Altura total del muro

Φ : Ángulo de rozamiento interno del suelo

δ : Ángulo de rozamiento suelo-muro

β : Inclinación de la cara interna del muro

θ : Ángulo de rotura del suelo obtenido de la gráfica entre $0^\circ - 90^\circ$

q : Sobrecarga uniforme sobre el relleno

E_{AD-P} : Empuje activo dinámico, teoría de Prakash-Saran.

$$H_r = \frac{2 * c}{\gamma * \sqrt{K_a}} \quad (10)$$

$$H = H_T - H_r \quad (11)$$

$$n_r = \frac{H_r}{H} \quad (12)$$

$$N_{ay} = \frac{[(n_r + 0.5) * (tg(\beta) + tg(\theta)) + 0.5 * n_r^2 * tg(\beta)] * [\cos(\theta + \phi) + k_h * \sin(\theta + \phi)]}{\sin(\beta + \theta + \phi + \delta)} \quad (13)$$

$$N_{aq} = \frac{[(n_r + 1.00) * tg(\beta) + tg(\theta)] * [\cos(\theta + \phi) + k_h * \sin(\theta + \phi)]}{\sin(\alpha + \theta + \phi + \delta)} \quad (14)$$

$$N_{ac} = \frac{2 * \cos(\theta + \phi) + \sin(\theta + \phi) * (tg(\theta) - tg(\beta))}{\sin(\beta + \theta + \phi + \delta)} \quad (15)$$

$$E_{AD-P} = \gamma * H^2 * N_{ay} + q * H * N_{aq} - c * H * N_{ac} \quad (16)$$

Con la gráfica empuje activo dinámico versus el ángulo de rotura(θ) mostrada en la Figura 13, se muestra en su corona el valor del empuje activo

dinámico máximo que debe considerarse en el cálculo.

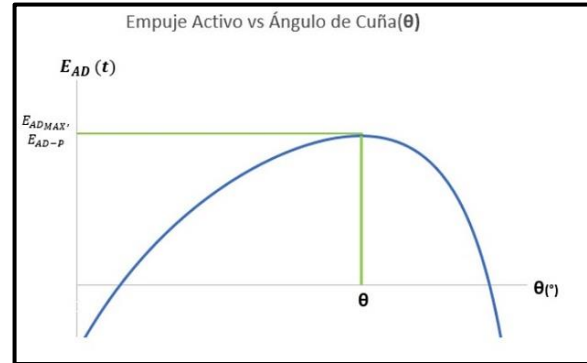


Figura 13. Empuje activo dinámico vs ángulo de rotura del suelo

2.3.6. Análisis de sensibilidad

Se realizó combinaciones de cohesión, ángulo de fricción y registros sísmicos mostrados en la Tabla 4., para comparar resultados del modelo numérico con las teorías analíticas.

Tabla 4. Combinaciones para análisis de sensibilidad

Combinación	Cohesión (t/m ²)	Ángulo de fricción (°)	Epicentro
1	0.5	29	Calderón
2	0.5	20	Conocoto
3	0.5	10	Guayllabamba
4	0.9	29	Calderón
5	0.9	20	Conocoto
6	0.9	10	Guayllabamba
7	1.5	29	Calderón
8	1.5	20	Conocoto
9	1.5	10	Guayllabamba

2.3.7. Regresión lineal múltiple

Trata de ajustar modelos lineales entre una variable dependiente y más de una variable independiente, configurando, variables de interacción, interrelación, etc.[8].

En función de los resultados analíticos y numéricos se planteó las variables independientes que tengan relación con la variable dependiente hasta ajustar de forma lineal la regresión esperada mostrada en la Figura14.

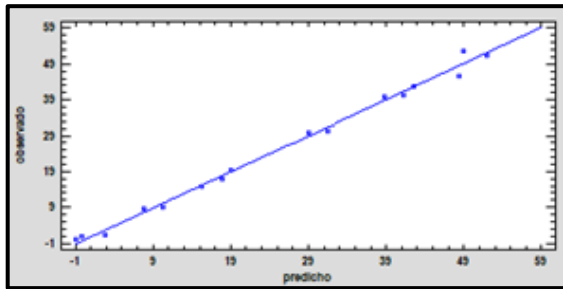


Figura 14. Ejemplo de regresión lineal múltiple ajustada.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon$$

Dónde:

y: Variable dependiente

β_i : Parámetros a estimar

X_i : Variables estadísticamente representativas.

Para realizar un análisis de regresión mediante un programa estadístico, R^2 es una parte prominente de los resultados. Si R^2 es pequeño, un analista buscará un modelo alternativo (modelo no lineal o de regresión múltiple que implique más de una sola variable independiente) que explique con más eficacia la variación de Y(variable dependiente)[9].

3. Resultados y Discusión

3.1. Prediseño del muro

Para el análisis de la estructura de contención se consideró un prediseño mostrado en la Figura 15.:

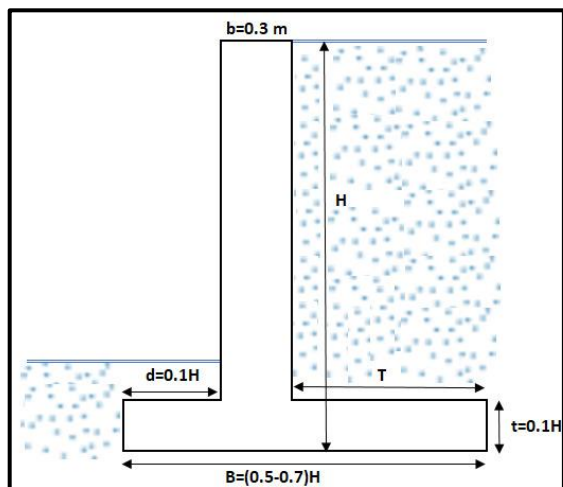


Figura 15. Valores referenciales para prediseño de muro[10]

Adoptando dimensiones indicadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Medidas adoptadas del muro

Predimensionamiento del muro	
H(m)	6
B(m)	4
b(m)	0.6
t(m)	0.6
d(m)	1
T(m)	2.4

Donde:

H: Altura

B: Base

b: Ancho de pantalla

t: Altura de peralte

d: Longitud del dedo

T: Longitud del talón

3.2. Modelación Numérica en MIDAS GTS NX

3.2.1. Geometría y mallado

Con las medidas adoptadas en el prediseño del muro y las herramientas de dibujo de MIDAS 2D se procedió a elaborar la geometría del suelo con su respectivo mallado mostrado en la Figura 16., se seleccionó el modelo constitutivo Mohr Coulomb para posteriormente crear el material, luego asignar a las regiones dibujadas, relleno y muro, para finalmente establecer las condiciones de borde y peso propio.

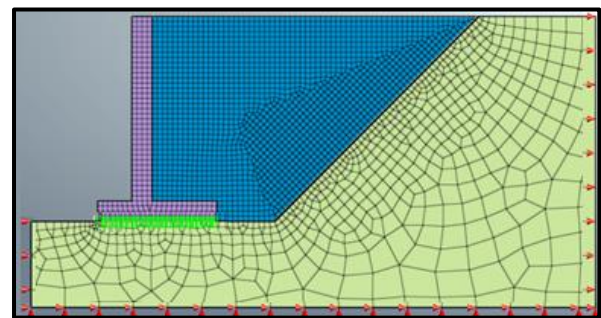


Figura 16. Modelación de muro en MIDAS GTS NX

Para que se desarrolle el empuje activo en la modelación numérica es necesario cierto desplazamiento horizontal que depende de la rigidez tangencial (k_t) aplicada iterativamente en el contacto entre suelo natural y la base del muro

como se indica en la Tabla 6., hasta llegar a la rotura del suelo de relleno.

En el contacto del trasdós del muro y suelo de relleno no se consideró la rigidez tangencial y normal en los modelos numéricos debido a que al implementarlas los elementos se liberan dando un comportamiento de distorsión y en consecuencia se mostró resultados incoherentes.

Tabla 6. Desplazamientos y rigideces tangenciales para condición de empuje activo.

c (t/m ²)	Ø (°)	kt(t/m ³)	Δ _h (cm)
0.5	29	77	3
0.5	20	349	1
0.5	10	530	0.1
0.9	29	25	4
0.9	20	127	2
0.9	10	553	0.75
1.5	29	3.1	20
1.5	20	27	2.5
1.5	10	242	1.00

De acuerdo con estos resultados se corroboró que la cohesión y ángulo de fricción son directamente proporcionales a la deformación necesaria para que se produzca el empuje activo. Se obtuvo la deformación horizontal mediante la comparación de los resultados del empuje activo con la teoría de Rankine y las modelaciones numéricas. Los resultados analíticos y numéricos fueron referidos a un metro de profundidad de muro.

3.3. Ajuste del Espectro de Respuesta de los sismos

El espectro de respuesta se define como la máxima respuesta de un sistema de un grado de libertad de cada componente de un movimiento en específico del suelo en función de la frecuencia natural (o período fundamental) y el amortiguamiento del sistema de 1GDL[11].

Para ello se determinó los periodos de vibración del sistema suelo-muro de acuerdo a la mayor participación de masa modal en el modo 3 y 7 cuyos periodos son 0.49 y 0.26 respectivamente

para considerar el amortiguamiento de Rayleigh[12] en el análisis dinámico tiempo historia (Anexo 3).

En la metodología de Rayleigh se consideró amortiguamiento inicial de 5 %.

El valor máximo de la pseudoaceleración del espectro de respuesta de cada uno de los sismos es 0.48g (z*Fa) como se indica en la Figura 17.

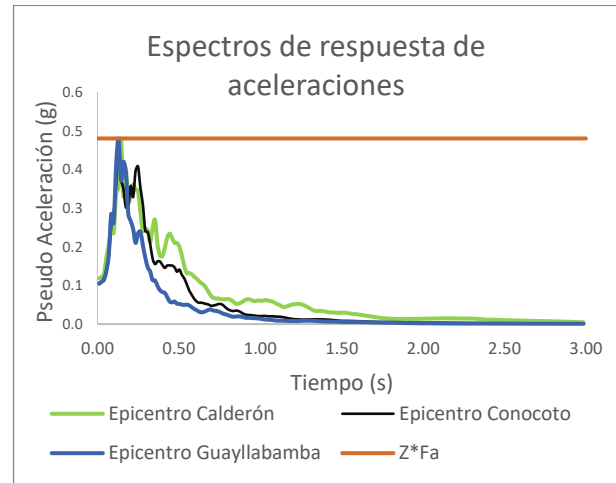


Figura 17. Espectros de respuesta de los tres eventos sísmicos de estudio, escalados a “z*Fa “

3.4. Resultados de cálculos analíticos y modelos numéricos

En los modelos numéricos y los cálculos se consideró que no existen grietas de tensión en el suelo de relleno, se extrajo los resultados de los diagramas de esfuerzos como se indica en el Anexo 4, para determinar la integral de esfuerzos en toda la altura del muro que representa el empuje activo estático, pseudoestático y dinámico. En la Figura 18., se indica el diagrama de esfuerzos de manera analítica.

3.4.1. Análisis Estático

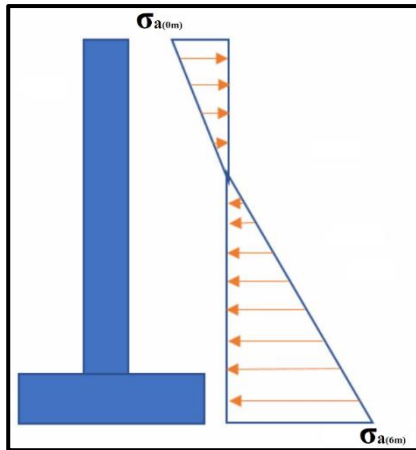


Figura 18. Diagrama de esfuerzos para cálculo de empuje activo estático

En la Tabla 7 y 8 se indica los resultados de la teoría de Rankine y Coulomb:

Tabla 7. Resultados de empuje activo estático horizontal teoría de Rankine

c (t/m ²)	Ø (°)	Ka	Zc (m)	σ _(0m) (t/m ²)	σ _(6m) (t/m ²)	E _A (t)
0.5	29	0.35	0.91	-0.59	3.29	8.09
0.5	20	0.49	0.77	-0.70	4.77	12.22
0.5	10	0.70	0.64	-0.84	7.02	18.55
0.9	29	0.35	1.64	-1.06	2.81	5.26
0.9	20	0.49	1.38	-1.26	4.21	8.86
0.9	10	0.70	1.15	-1.51	6.35	14.52
1.5	29	0.35	2.74	-1.77	2.11	1.02
1.5	20	0.49	2.30	-2.10	3.37	3.82
1.5	10	0.70	1.92	-2.52	5.34	8.48

Tabla 8. Resultados de empuje activo estático horizontal teoría de Coulomb

c (t/m ²)	Ø (°)	δ (°)	Ka	Zc (m)	σ _(0m) (t/m ²)	σ _(6m) (t/m ²)	E _A (t)
0.5	29	14.5	0.31	0.96	-0.56	2.94	6.92
0.5	20	10	0.45	0.80	-0.67	4.32	10.79
0.5	10	5	0.66	0.66	-0.81	6.58	17.24
0.9	29	14.5	0.31	1.73	-1.01	2.49	4.32
0.9	20	10	0.45	1.45	-1.20	3.79	7.63
0.9	10	5	0.66	1.19	-1.46	5.93	13.35
1.5	29	14.5	0.31	2.88	-1.68	1.82	0.41
1.5	20	10	0.45	2.41	-2.01	2.98	2.89
1.5	10	5	0.66	1.98	-2.44	4.95	7.51

De acuerdo con los resultados obtenidos se ratifica que el coeficiente activo es mayor en la teoría en Rankine debido a que no considera la fricción entre muro y suelo de relleno por consiguiente el valor de los empujes activos es mayor. Además, en la teoría de Coulomb para el cálculo del empuje activo se consideró el valor de la fricción entre suelo y muro $\delta = \frac{1}{2} * \phi$.

Se comparó la teoría de Rankine y Coulomb con los modelos numéricos que consideran cargas estáticas del software MIDAS GTS NX como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Error entre teorías analíticas y modelación numérica

Parámetros	Empuje Estático		MIDAS	error MIDAS-Rankine (%)	error MIDAS-Coulomb (%)		
	c (t/m ²)	Ø (°)	E _A (t)				
	0.5	29	6.92	8.09	7.88	2.53	12.24
	0.5	20	10.79	12.22	12.34	0.99	12.60
	0.5	10	17.24	18.55	18.88	1.75	8.68
	0.9	29	4.32	5.26	5.02	4.65	13.94
	0.9	20	7.63	8.86	8.44	4.75	9.63
	0.9	10	13.35	14.52	14.12	2.79	5.46
	1.5	29	0.41	1.02	1.54	51.22	73.26
	1.5	20	2.89	3.82	3.26	14.73	11.30
	1.5	10	7.51	8.48	8.67	2.19	13.38

Los errores obtenidos MIDAS- Rankine son menores al 5 % excepto en los modelos de $c = 1.5 \text{ t/m}^2$, $\phi = 29^\circ$ y $c = 1.5 \text{ t/m}^2$, $\phi = 20^\circ$ con errores de 51.22 % y 14.73 %, se puede evidenciar una diferencia de 0.5 t que se considera insignificante en consecuencia las magnitudes de los empujes no distan mayormente.

3.4.2. Análisis Pseudoestático

De acuerdo con la teoría de Mononobe Okabe en la Tabla 10 y 11, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 10. Resultados de empuje activo pseudoestático horizontal teoría de Mononobe Okabe

Υ (t/m ³)	Φ (°)	H (m)	kh	k_{AD}	E_{AD-M} (t)
1.86	29	6	0.29	0.63	21.11
1.86	20	6	0.29	0.87	29.06
1.86	10	6	0.29	1.26	42.10

Se puede evidenciar que existe una relación inversamente proporcional entre el ángulo de fricción con el coeficiente activo dinámico y el empuje activo dinámico.

Tabla 11. Resultados de empuje pseudoestático horizontal Mononobe Okabe- MIDAS

Parámetros		Empuje Pseudoestático		
c (t/m ²)	Φ (°)	Mononobe Okabe (t)	MIDAS (t)	Error Mononobe -Midas (%)
0.5	29	21.11	13.33	58.42
0.5	20	29.06	19.11	52.04
0.5	10	42.1	27.47	53.27
0.9	29	21.11	9.57	120.65
0.9	20	29.06	14.84	95.84
0.9	10	42.1	22.55	86.66
1.5	29	21.11	6.75	212.79
1.5	20	29.06	7.85	270.11
1.5	10	42.1	15.37	173.91

A pesar de que Mononobe Okabe y MIDAS consideran una fuerza horizontal proporcional al peso en el análisis pseudoestático se constata errores mayores al 50 % debido a la influencia de la cohesión.

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos entre la teoría de Prakash-Saran con los modelos numéricos en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de empuje activo pseudoestático horizontal MIDAS-Prakash

Parámetros		Empuje Pseudoestático		Error Prakash -MIDAS (%)
c (t/m ²)	Φ (°)	Prakash (t)	MIDAS (t)	
0.5	29	14.85	13.33	10.29
0.5	20	21.09	19.11	9.35
0.5	10	29.94	27.47	8.26
0.9	29	11.69	9.57	18.17
0.9	20	17.03	14.84	12.89
0.9	10	28.22	22.55	20.06
1.5	29	7.60	6.75	11.16
1.5	20	11.78	7.85	33.35
1.5	10	19.51	15.37	21.22

En la teoría de Prakash-Saran y la modelación numérica se aplica una fuerza horizontal en el centro de gravedad de la cuña (análisis pseudoestático), a pesar de ello existe un error máximo de 33.35 % posiblemente producto de no considerar el comportamiento independiente entre el mallado del trasdós del muro y suelo de relleno, porque al tener puntos comunes de contacto (entre mallados) provoca una deformación conjunta lo que no representaría un comportamiento real del sistema.

3.4.3. Análisis Dinámico

Se comparó los resultados obtenidos de la teoría Prakash-Saran con los resultados dinámicos del software MIDAS GTS NX mostrados en la Tabla 14 y la teoría de Mononobe-Okabe en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de empuje dinámico horizontal Mononobe Okabe- MIDAS

Parámetros		Empuje Dinámico		
c (t/m ²)	ϕ (°)	Mononobe Okabe (t)	MIDAS (t)	Error Mononobe-Midas (%)
0.5	29	21.11	16.13	30.86
0.5	20	29.06	23.03	26.19
0.5	10	42.1	23.88	76.31
0.9	29	21.11	11.80	78.84
0.9	20	29.06	20.74	40.10
0.9	10	42.1	20.15	108.93
1.5	29	21.11	5.66	273.17
1.5	20	29.06	14.50	100.44
1.5	10	42.1	14.91	182.42

El máximo error obtenido Mononobe-MIDAS es 273.17 % en el modelo c= 1.5 t/m², ϕ= 29° reflejando que al despreciar la cohesión (Mononobe-Okabe) se obtuvo valores de empuje activo dinámico más del doble que al considerarla en la modelación numérica.

Tabla 14. Resultados de empuje activo dinámico horizontal MIDAS- Prakash-Saran

Parámetros		Empuje Dinámico		Error Prakash-MIDAS (%)
c (t/m ²)	ϕ (°)	Prakash-Saran (t)	MIDAS (t)	
0.5	29	14.85	16.13	7.93
0.5	20	21.09	23.03	8.44
0.5	10	29.94	23.88	25.39
0.9	29	11.69	11.80	0.95
0.9	20	17.03	20.74	17.88
0.9	10	28.22	20.15	40.02
1.5	29	7.59	5.66	34.30
1.5	20	11.78	14.50	18.75
1.5	10	19.51	14.91	30.88

Se observó que en los modelos analíticos de Prakash-Saran considera una fuerza horizontal que se aplica al suelo y muro (0.6*z*Fa), mientras que en los modelos numéricos un registro de aceleraciones cuyo máximo valor corresponde a una pseudoaceleración máxima z*Fa del espectro de respuesta de aceleración en los tres registros sísmicos escalados, lo que conlleva a tener una variación entre los empujes, con resultados comparables.

3.5. Correlación lineal múltiple

La Figura 19., muestra la regresión que consideró como variable dependiente el empuje activo dinámico MIDAS GTS NX. Como variables independientes: cohesión (c), ángulo de fricción del suelo (ϕ), empuje activo estático Rankine (E_{AE}), empuje activo dinámico Mononobe Okabe (E_{AD-M}), empuje activo dinámico Prakash (E_{AD-P}) para mayor ajuste se tomó la regresión lineal múltiple logarítmica y a su vez se realizó la comprobación de la expresión 17 con valores dentro del rango del análisis de sensibilidad establecido. (Anexo 5).

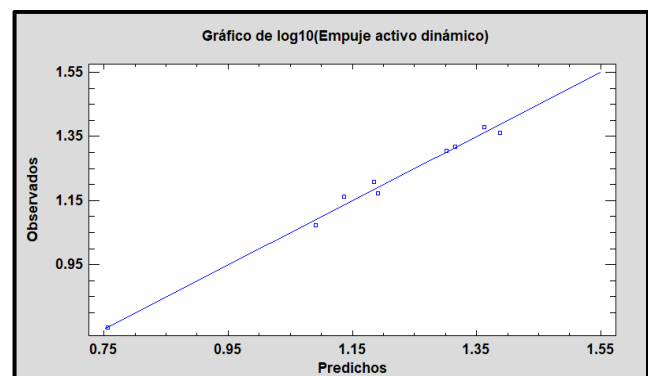


Figura 19. Gráfica predichos vs observados

$$E_{AD} = \frac{1.409 \times 10^{-7} * E_{AE}^{0.446} * \phi^{2.159} * E_{AD-P}^{0.0826} * E_{AD-M}^{3.302}}{c^{0.009}} \quad (17)$$

Coefficiente de determinación (R²) = 97.63 %

En la regresión lineal múltiple se despreció el efecto de la sobrecarga, por lo que se recomienda su uso a rellenos sin sobrecarga, en muros con altura (H)=6 m, kh=0.48, $\gamma=1.86 \text{ t/m}^3$.

4. Conclusiones

–En el software de elementos finitos no se debe colocar directamente el mallado del muro con el del suelo debido a que los nudos en común no permiten el deslizamiento del muro, desarrollando un comportamiento inadecuado del sistema suelo-muro, por ello se implementó la condición interfaz en la base del muro, que simula el posible deslizamiento lateral que podría tener el muro, a fin de que se desarrolle el empuje activo, dando un comportamiento real al modelo.

–Se concluye en la Figura 20., que al usar la cohesión y ángulo de fricción obtenidos en el ensayo triaxial UU(sin saturar) se podría generar un grado de subestimación del empuje activo debido a que los parámetros obtenidos en el ensayo corresponden a la humedad óptima de compactación, y una sobrestimación al no considerar la cohesión, generalizando al relleno como un suelo granular; por ello es necesario considerar un escenario crítico dentro de la realidad del suelo de relleno (condición saturada y con drenaje) que nos brinde parámetros efectivos de cohesión y ángulo de fricción para obtener empujes activos más cercanos a la realidad.

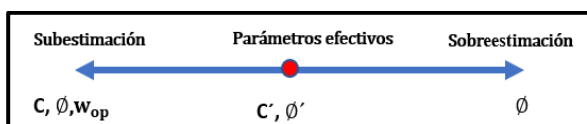


Figura 20. Consideraciones de parámetros para el diseño de muro

–Se utilizó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb porque describe el comportamiento perfectamente plástico del suelo de relleno, siendo un modelo sencillo que para su ejecución es necesario obtener parámetros (cohesión, ángulo de fricción y módulo de elasticidad) mediante ensayos triaxiales.

–En la Figura 19 se observa que todos los pares ordenados del empuje activo dinámico (observados

vs. predichos) se ajustan ligeramente a un comportamiento lineal con un coeficiente de determinación $R^2=97.63 \%$ en el que intervienen siete variables independientes, que son significativamente representativas para el análisis estadístico realizado.

–En los diagramas de esfuerzos de los cálculos analíticos se presenta una distribución lineal debido a que no considera la deformación del suelo, a diferencia de los modelos numéricos que sí contemplan dicha deformación, en consecuencia, los diagramas no son lineales, a pesar de lo mencionado se llega a obtener empujes próximos entre sí. También se constató un efecto en la parte baja del diagrama por la presencia del corte que se hizo en el suelo natural.

–El valor del empuje activo en el modelo numérico estático está en función del desplazamiento del muro, lo que indica que, si este desplazamiento fuera cero generaría el empuje en reposo y no el empuje activo, por ello se realizó una serie de iteraciones hasta obtener valores próximos del empuje activo de la teoría de Rankine.

–Debido a la instantaneidad del sismo cuando se hace un análisis pseudoestático del 60 % z^* fa de acuerdo con la NEC 15, se obtuvo resultados relativamente cercanos al análisis dinámico tiempo historia con la instantaneidad de las décimas de segundo en la aceleración.

–En base a las modelaciones numéricas dinámicas tiempo historia realizados se concluye que para los parámetros: cohesión 1.5 t/m^2 , fricción 29° , peso específico 1.861 t/m^3 , $z=0.4$, altura de 6 m, epicentro Calderón se obtuvo valores próximos tanto en modelación numérica, analítica y correlación. Debido a que la regresión lineal múltiple se realizó en base a cálculos analíticos y numéricos se obtuvo un valor de empuje activo dentro del rango de resultados entre los dos análisis mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación de resultados

Empuje activo (t)	
Modelación Numérica (t)	5.65
Prakash-Saran (t)	7.60
Regresión (t)	5.71

–De acuerdo con los resultados de la modelación numérica, la teoría de Prakash-Saran y la teoría de Mononobe Okabe (no toma en cuenta la cohesión) se refleja la influencia que tiene la cohesión en el empuje activo, debido a la sobreestimación que se presenta en la Tabla 16:

Tabla 16. Sobreestimación del empuje activo dinámico

Parámetros		MIDAS GTS NX		Sobreestimación		
c (t/m ²)	ϕ (°)	Mononobe Okabe (t)	Prakash Saran (t)	Empuje Dinámico (t)	Mononobe -Prakash (%)	Mononobe -Midas (%)
0.5	29	21.11	14.85	16.13	29.64	30.86
0.5	20	29.06	21.09	23.03	27.44	26.19
0.5	10	42.10	29.94	23.88	28.88	76.31
0.9	29	21.11	11.69	11.80	44.62	78.84
0.9	20	29.06	17.03	20.74	41.38	40.10
0.9	10	42.10	28.22	20.15	32.98	108.93
1.5	29	21.11	7.60	5.66	64.01	273.17
1.5	20	29.06	11.78	14.50	59.46	100.44
1.5	10	42.10	19.51	14.91	54.66	182.42

–La máxima sobreestimación que se obtiene entre Mononobe Okabe y Prakash-Saran es de 64.01 % con parámetros de cohesión 1.5 t/m² y ángulo de fricción 29°, además la mínima sobreestimación es de 27.44 % con parámetros de cohesión 0.5 t/m² y ángulo de fricción 20°.

–La máxima sobreestimación que se obtiene entre la teoría de Mononobe Okabe y el modelo MIDAS GTS NX es de 273.17 % con parámetros de cohesión 1.5 t/m² y ángulo de fricción 29°, además la mínima sobreestimación es de 27.44 % con parámetros de cohesión 0.5 t/m² y ángulo de fricción 20°.

–De acuerdo con la comparación anteriormente realizada con respecto a la sobreestimación Mononobe-Prakash y Mononobe-MIDAS GTS NX, indica la importancia de tomar en cuenta la cohesión para evitar medidas sobredimensionadas en el diseño de los muros.

–Es importante en la modelación numérica con análisis dinámico tiempo historia las condiciones de borde adoptadas, los periodos de vibración que fueron considerados para definir el amortiguamiento del sistema suelo-muro, porque al no considerar estos parámetros se obtienen valores erróneos del empuje activo dinámico y no se modela de manera adecuada el fenómeno.

Referencias

- [1] L. Báez and P. Echeverri, “Diseño de Estructuras de Contención Considerando Interacción Suelo-Estructura,” p. 134, 2015.
- [2] J. E. Bowles, “Foundation Analysis and Design,” pp. 404–414, 1997.
- [3] NEC 15, “Peligro sísmico,” 2015.
- [4] C. Vintimilla, “Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del sector las Orquideas de la ciudad de Cuenca, Ecuador,” p. 14, 2016.
- [5] A. Nieto Leal, J. Camacho Tauta, and E. Ruiz Blanco, “Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 75–91, 2009.
- [6] B. M. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 4ta Edición,” p. 636, 2013.
- [7] I. Jurado, “Análisis mediante Elementos Finitos 3D de los efectos de las propiedades del Substrato Rocoso en la cimentación de turbinas eólicas,” 2021.
- [8] S. Molina and J. Pimentel, “Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX,” 2021.

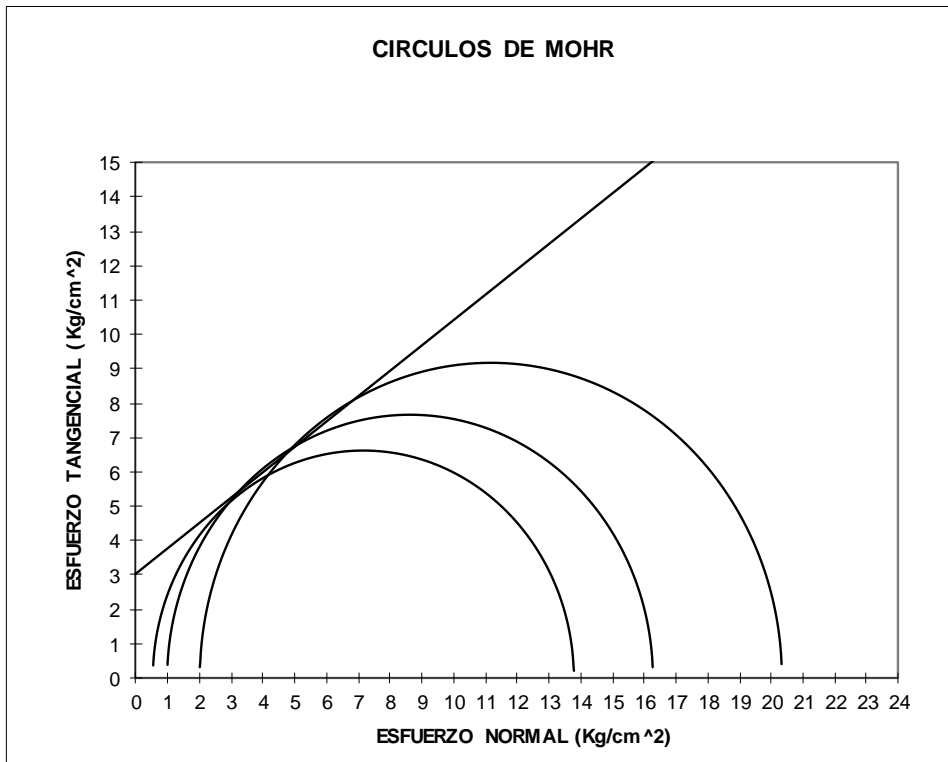
- [9] J. L. Devore, “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 8va edición,” p. 741, 2010.
- [10] B. M. Das, “Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones 7ma Edición,” p. 794, 2011.
- [11] A. Castro and J. Pérez, ““Espectro de diseño y zonificación sísmica basada en periodos fundamentales de vibración de los suelos, en el área urbana de la ciudad de Mateare’.,” no. July, pp. 1–23, 2016.
- [12] User Manual MIDAS GTS NX, “Analysis Reference_Chapter-3 Elements,” vol. 5, pp. 15–109, 2019.
- [12] K. Patiño, “Comparación entre el método de Mononobe-Okabe y un análisis dinámico tiempo-historia, para muros de contención tipo viga en voladizo, utilizando un registro sismográfico del sismo de Pedernales del 2016,” no. July, pp. 1–66, 2016.
- [13] R. N. Santana, “Presiones de tierra en muros rígidos sometidos a cargas sísmicas Director :,” p. 87, 2017.
- [14] “Cursos de Geotecnia Online para profesionales | Escuela de Formación GF,” 04-Feb-2022. [Online]. Available: <https://escuela.geotecniafacil.com/>. [Accessed: 04-Feb-2022].
- [15] J. Arias Trujillo, “Presiones Dinámicas en Estructuras de Contención,” p. 319, 2015.
- [16] J. C. Yacchirema, “Construcción de un muro de contención en el sitio del deslizamiento de la plataforma de la vía Guaranda –Río Blanco entre el KM 0+910 – KM 0+958 de la provincia Bolívar Cantón Guaranda,” p. 143, 2013.
- [17] L. Báez and P. Echeverri, “Diseño de Estructuras de Contención Considerando Interacción Suelo-Estructura,” p. 134, 2015.
- [18] C. G. Ureta Chalén, “Aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 para un suelo tipo F . Caso específico de cálculo de asentamientos utilizando el método de Asaoka,” p. 151, 2017.
- [19] B. Ayabaca and L. Salazar, “Análisis comparativo técnico-económico entre muro de contención de hormigón armado y muro de contención de suelo mecánicamente estabilizado con el sistema TERRAMESH® para el Proyecto Urbanización Toscana,” p. 271, 2018.
- [20] F. Lucero, E. Pachacama, and W. Rodriguez, “Análisis y Diseño de Muros de Contención,” p. 393, 2012.
- [21] V. Chamorro, “Serie de ejercicios de Geotecnia III,” pp. 1–152, 1984.
- [22] I. Bañuelos, C. Gallegos, M. Gomez, L. Muñoz, and R. Rodriguez, “Determinación del Empuje Activo Pseudo-estático en un Suelo con c y ϕ usando un Software Matemático,” pp. 1–7, 2015.
- [23] E. De la Fuente Lavalle, “Problemas Básicos de Empujes de Suelos sobre Estructuras de Soporte,” vol. 53, no. 9, p. 170, 2013.
- [24] A. F. Martinez, “Introducción a midas GTS NX,” p. 59, 2016.
- [25] User Manual MIDAS GTS NX, “Analysis Reference_Chapter-3 Elements,” vol. 5, pp. 15–109, 2019.
- [26] User Manual MIDAS GTS NX, “Analysis Reference_Chapter-5 Algorithm,” Twist, no. 52, pp. 253–310, 2019.

ANEXOS

Anexo 1: Ensayos para suelo natural y suelo de relleno.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO (NORMA ASTM: D 2850)

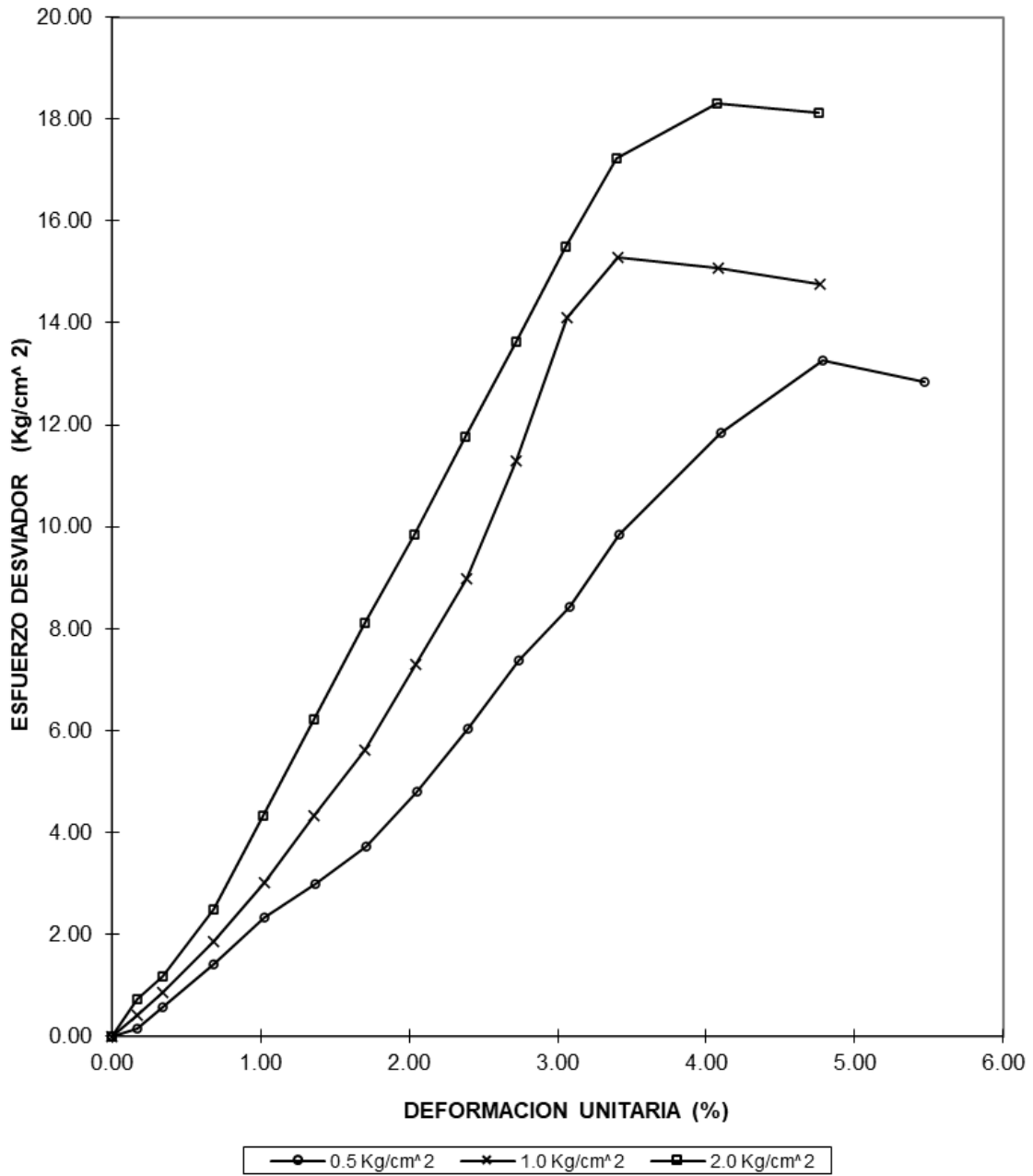
No	σ desv. Kg/cm ²	σ_3 Kg/cm ²	σ_1 Kg/cm ²	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ Kg/cm ²	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ Kg/cm ²
1	13.27	0.50	13.77	6.63	7.13
2	15.28	1.00	16.28	7.64	8.64
3	18.32	2.00	20.32	9.16	11.16



COHESION (kg/cm ²)	3
FRICCION (GRADOS)	36.5

DATOS DE ENSAYO		PROBETA No. 1	PROBETA No. 2	PROBETA No. 3
DIAMETRO MEDIO	(cm)	3.64	3.63	3.63
ALTURA MEDIA	(cm)	7.43	7.46	7.48
HUMEDAD FINAL	(%)	12.89	11.60	11.33
DENSIDAD HUMEDA	(gr/cm ³)	1.462	1.439	1.593
DENSIDAD SECA	(gr/cm ³)	1.295	1.290	1.431

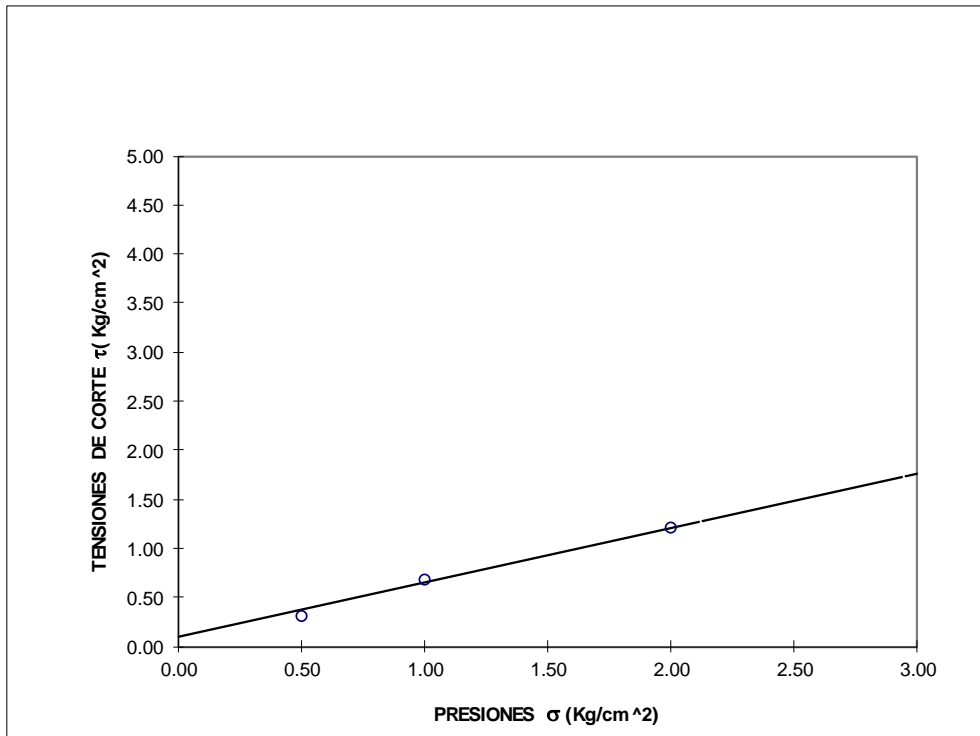
CURVAS ESFUERZO DEFORMACION



ENSAYO CORTE DIRECTO

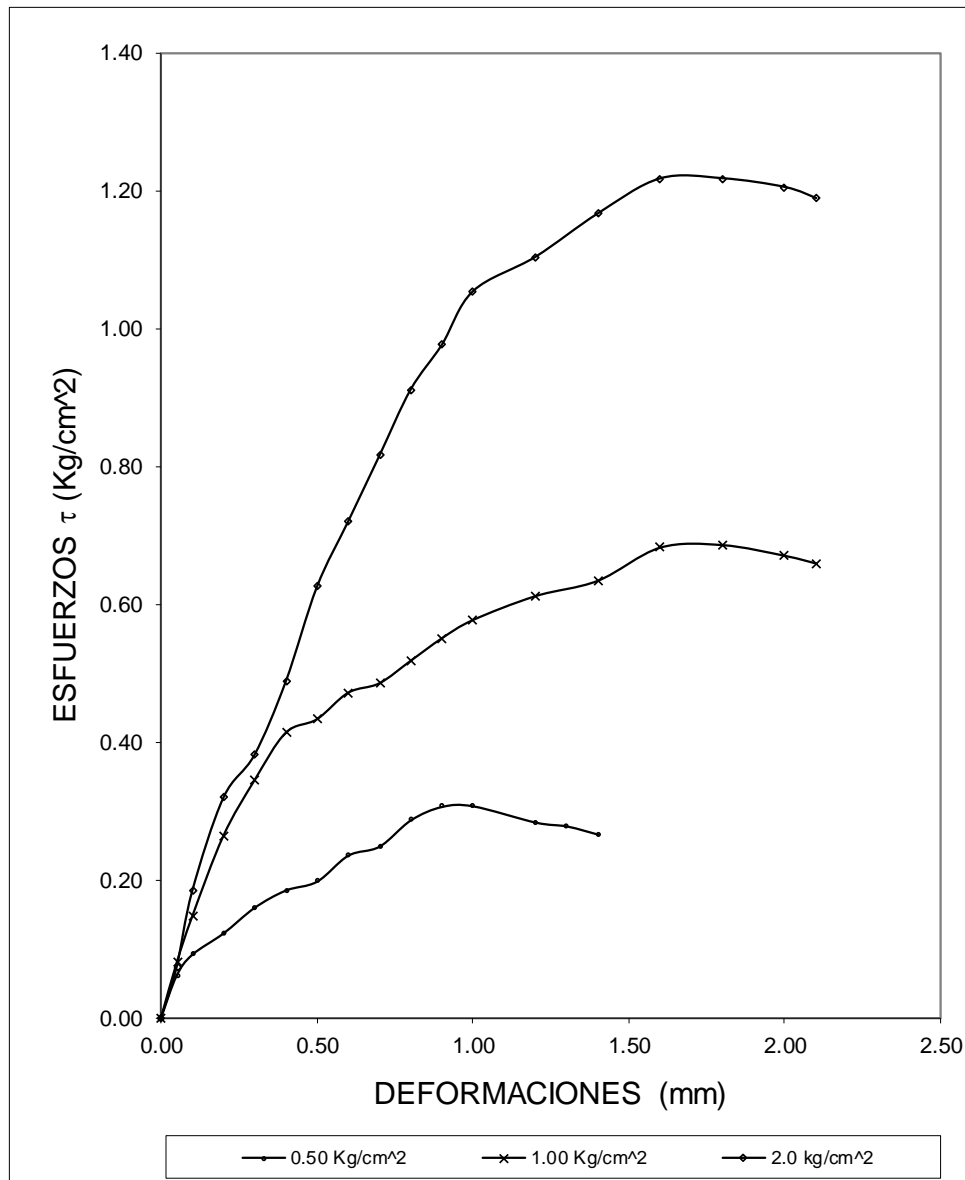
(NORMA ASTM D 3080-04)

No	PRESION σ Kg/cm ²	TENSION τ Kg/cm ²	γ_m g/cm ³	HUMEDAD %	γ_d Kg/cm ³
1	0.50	0.31	1.829	9.82	1.666
2	1.00	0.69	1.881	9.99	1.710
3	2.00	1.22	1.871	9.92	1.703

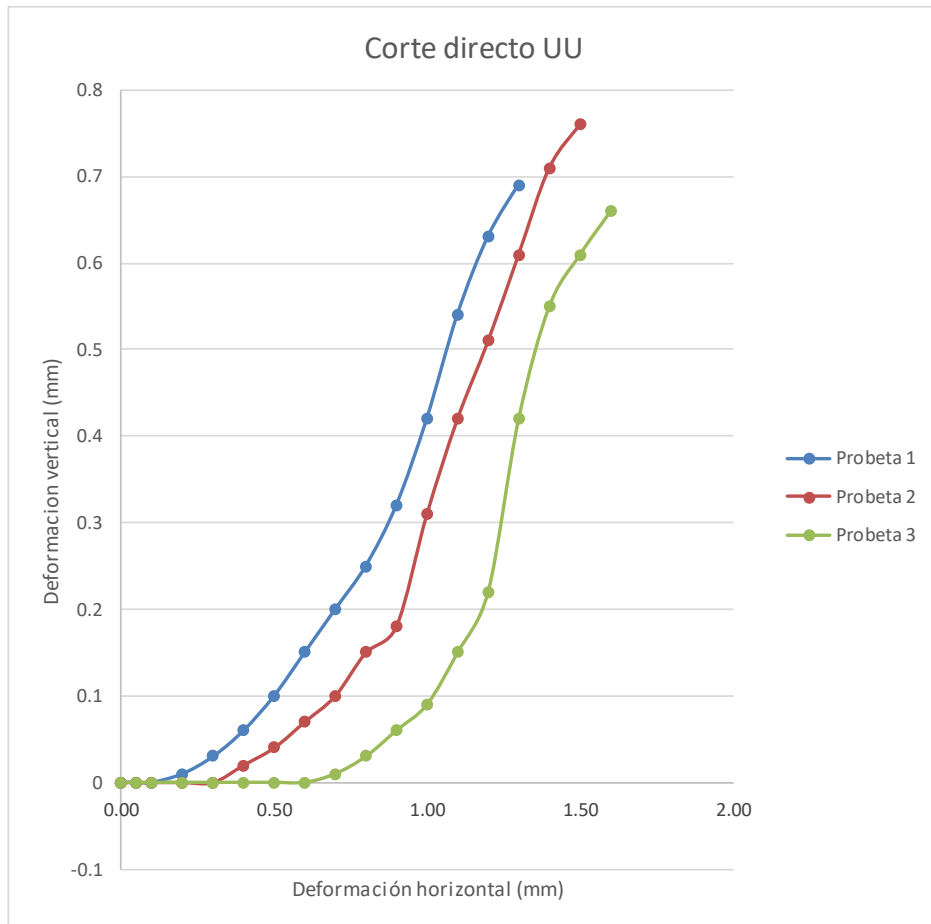


COHESION (kg/cm ²)	0.09
FRICCION (GRADOS)	29

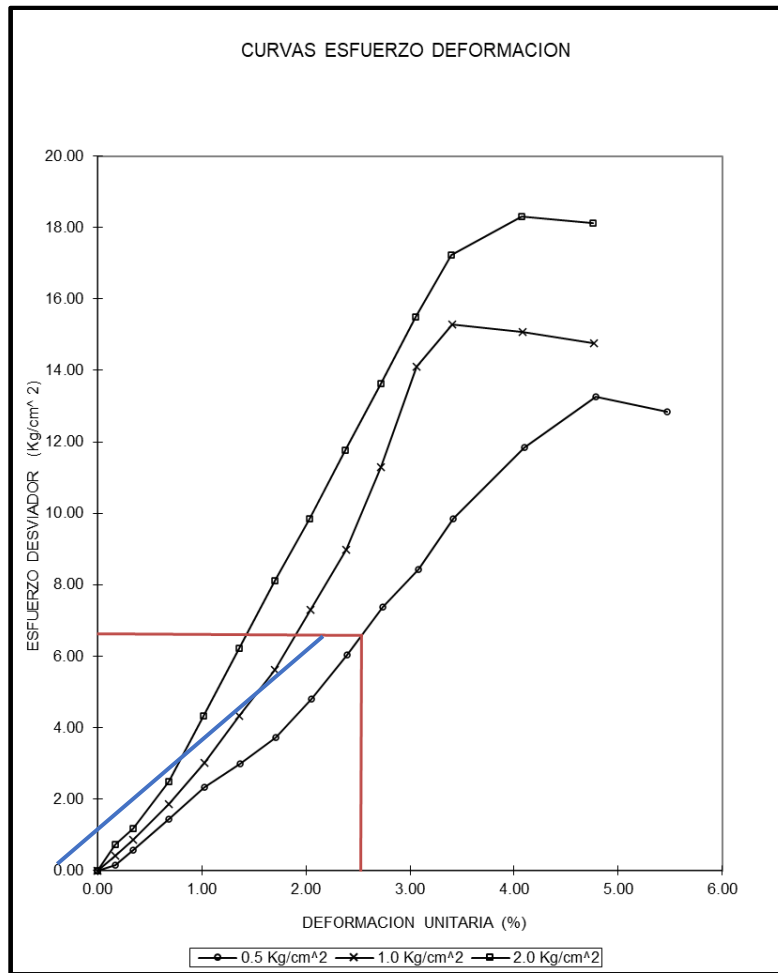
ENSAYO CORTE DIRECTO
CURVAS DEFORMACION - ESFUERZO



ENSAYO CORTE DIRECTO
CURVAS DEFORMACION HORIZONTAL- DEFORMACION VERTICAL



Anexo2: Curva esfuerzo vs deformación de ensayo triaxial.



Curva	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo vertical (kg/cm ²)	Coefficiente de Reposo Ko	Esfuerzo Inicial (t/m ²)	Módulo de Elasticidad (t/m ²)
2 (kg/cm ²)	18.32	9.56		0.39	
1 (kg/cm ²)	15.28	8.64	0.41	0.35	2656
0.5 (kg/cm ²)	13.27	8.77		0.36	

Tabla: Calculo del módulo de elasticidad del suelo de natural

Anexo3: Modos y periodos de vibración del sistema suelo-muro obtenidos del software MIDAS GTS NX.

REAL EIGENVALUES								
MODE NUMBER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	PERIOD	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS	ORTHOGONALITY LOSS	ERROR MEASURE
1	7.621364e+00	8.730042e+00	1.389429e+00	7.197201e-00	1.000000e+00	7.621364e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
2	1.582202e+00	1.257856e+00	2.001940e+00	4.995155e-00	1.000000e+00	1.582202e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
3	1.647029e+00	1.283366e+00	2.042541e+00	4.895863e-00	1.000000e+00	1.647029e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
4	3.398680e+00	1.843551e+00	2.934103e+00	3.408197e-00	1.000000e+00	3.398680e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
5	3.800013e+00	1.949362e+00	3.102507e+00	3.223200e-00	1.000000e+00	3.800013e+00	0.000000e+00	1.508118e-01
6	5.584742e+00	2.363206e+00	3.761159e+00	2.658755e-00	1.000000e+00	5.584742e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
7	5.764592e+00	2.400956e+00	3.821241e+00	2.616951e-00	1.000000e+00	5.764592e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
8	6.424897e+00	2.534738e+00	4.034161e+00	2.478830e-00	1.000000e+00	6.424897e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
9	8.677778e+00	2.945807e+00	4.688397e+00	2.132925e-00	1.000000e+00	8.677778e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
10	1.004248e+00	3.168988e+00	5.043600e+00	1.982711e-00	1.000000e+00	1.004248e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
11	1.026618e+00	3.204087e+00	5.099463e+00	1.960991e-00	1.000000e+00	1.026618e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
12	1.103765e+00	3.322295e+00	5.287597e+00	1.891218e-00	1.000000e+00	1.103765e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
13	1.175676e+00	3.428813e+00	5.457125e+00	1.832467e-00	1.000000e+00	1.175676e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
14	1.229237e+00	3.506048e+00	5.580048e+00	1.792099e-00	1.000000e+00	1.229237e+00	0.000000e+00	1.766945e-01
15	1.476237e+00	3.842183e+00	6.115025e+00	1.635316e-00	1.000000e+00	1.476237e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
16	1.531681e+00	3.913669e+00	6.228798e+00	1.605446e-00	1.000000e+00	1.531681e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
17	1.599449e+00	3.999311e+00	6.365101e+00	1.571067e-00	1.000000e+00	1.599449e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
18	1.757446e+00	4.192191e+00	6.672079e+00	1.498783e-00	1.000000e+00	1.757446e+00	0.000000e+00	1.494909e-00
19	2.015394e+00	4.489314e+00	7.144965e+00	1.399587e-00	1.000000e+00	2.015394e+00	0.000000e+00	1.209103e-00
20	2.136845e+00	4.622602e+00	7.357099e+00	1.359231e-00	1.000000e+00	2.136845e+00	0.000000e+00	1.043862e-00

Gráfico: Periodos de vibración

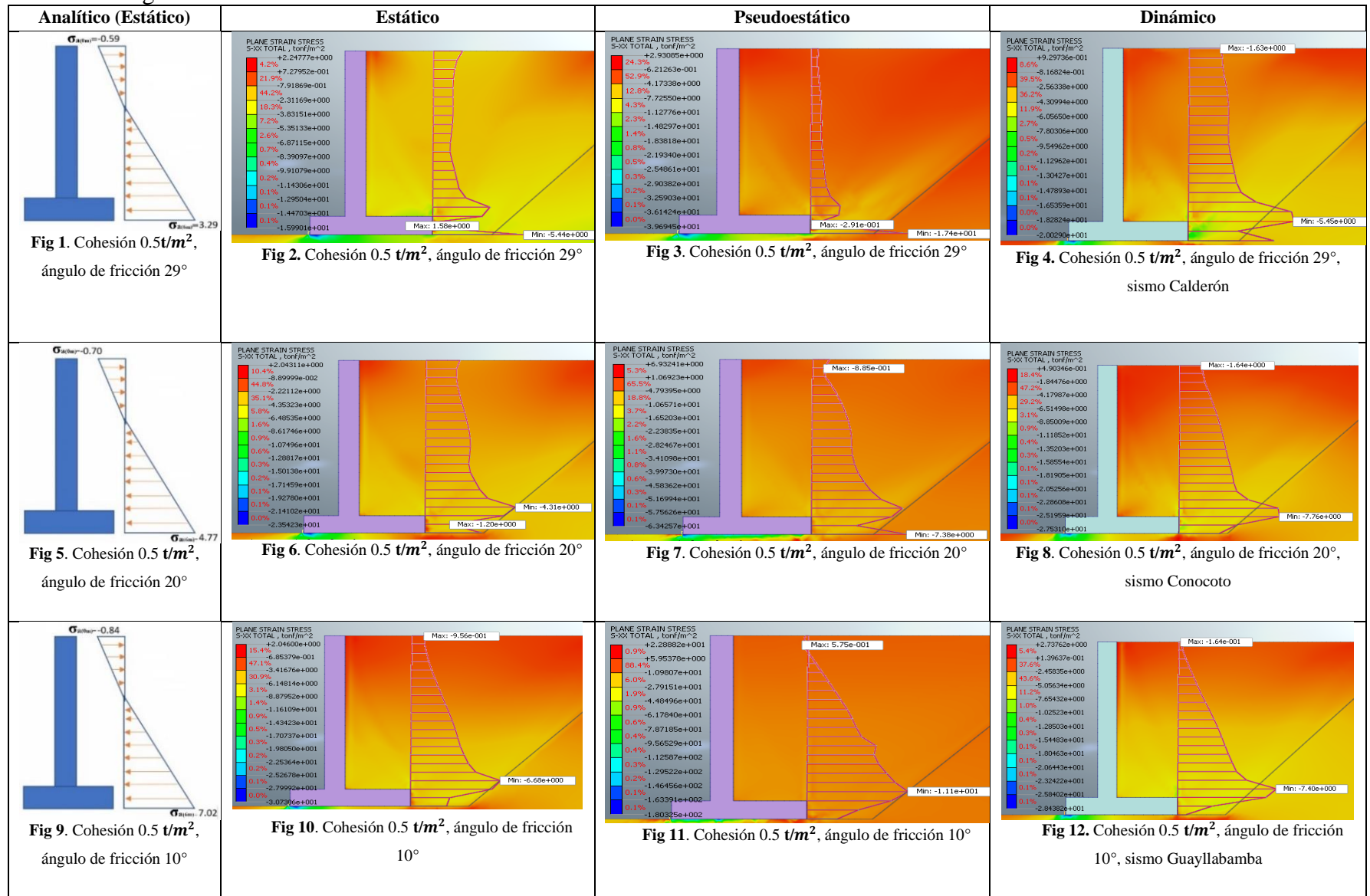
MODAL EFFECTIVE MASS						
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3
1	7.279026e+00	1.738394e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	3.816705e+00
2	1.326688e+00	1.704559e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.742317e+00
3	4.008078e+01	7.352169e-00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.992866e+01
4	9.743771e+00	7.546769e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	2.882639e+00
5	1.298295e+00	5.121147e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.199050e+00
6	2.104867e+00	6.213211e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	9.004193e+00
7	8.479752e-00	4.008192e+01	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	3.563221e+01
8	2.142011e+00	9.951363e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	2.014499e+00
9	5.790624e+00	1.626624e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	3.343562e+00
10	7.792235e+00	5.211349e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	2.101645e+00
11	1.594547e+01	4.968075e-00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	3.980339e+01
12	5.950013e+00	4.546155e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.016769e+00
13	1.035718e+00	1.012110e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	7.267379e+00
14	8.051965e+00	5.473147e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.184430e+00
15	4.416923e+00	1.742892e-00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.744565e+01
16	2.007598e+00	1.471549e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	4.360315e+00
17	3.664629e+00	8.691857e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	8.027621e+00
18	2.667285e+00	1.480876e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	7.376283e+00
19	9.053547e+00	4.795049e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.717813e+00
20	1.110471e+00	3.444997e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.552009e+00
TOTAL	6.044547e+01	4.008218e+01	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	3.976798e+01
TOTAL IN MODEL	6.930037e+01	6.930037e+01	6.930037e+01	5.690765e+01	1.540160e+01	1.597068e+01
	0	0	0	1	3	3

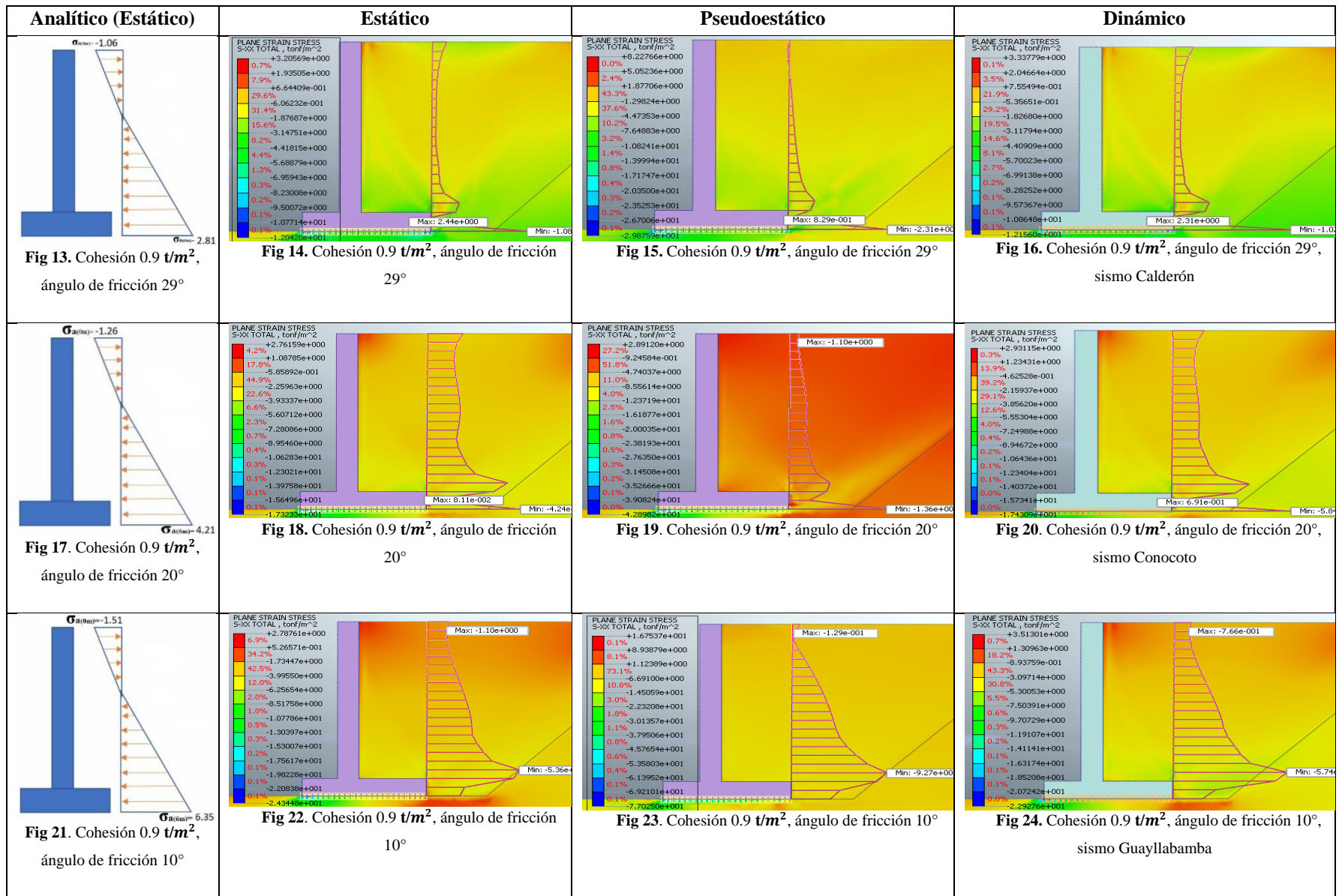
Gráfico: Masa Modal

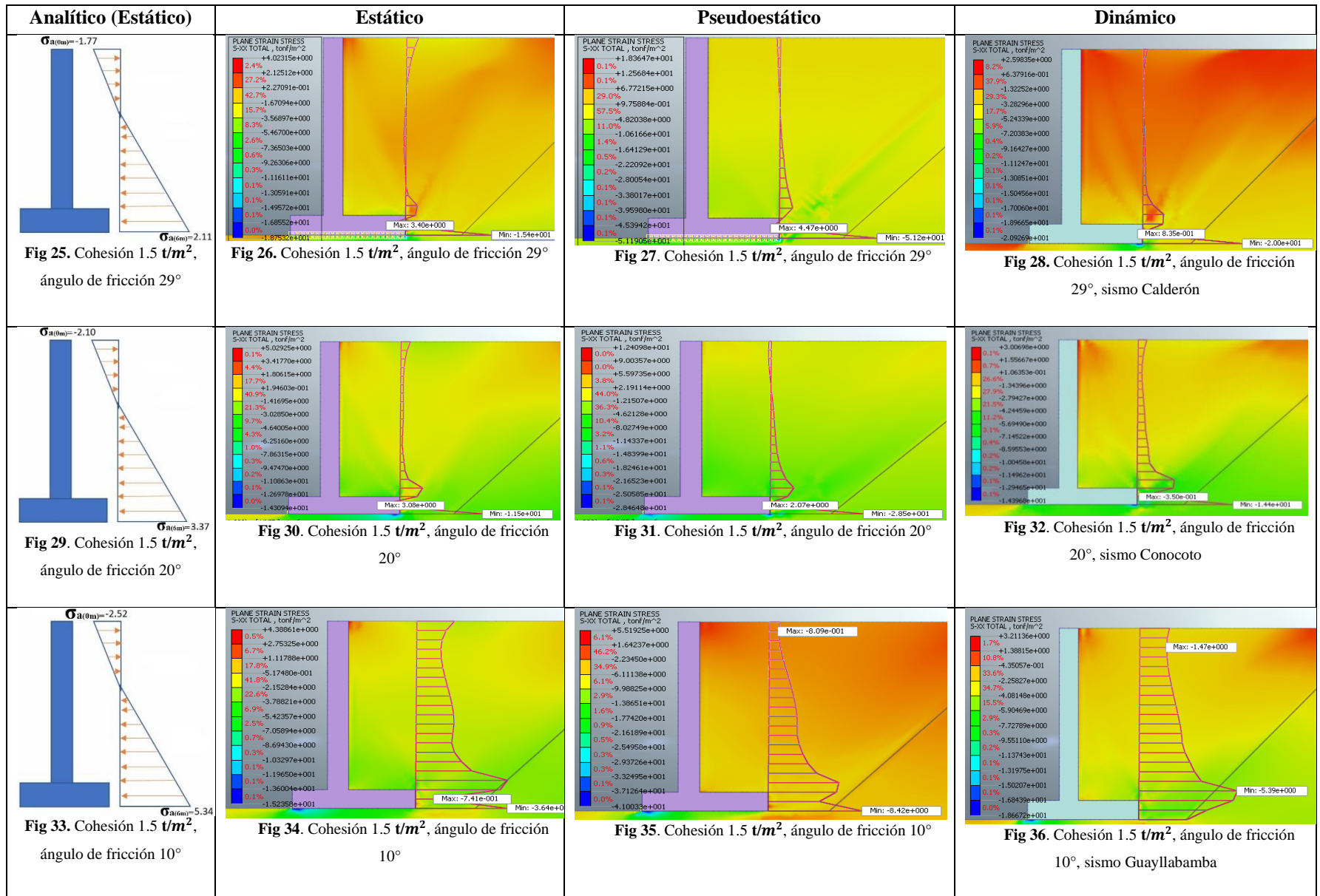
PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS						
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3
1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3	57.84%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.25%
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
7	0.00%	57.84%	0.00%	0.00%	0.00%	22.31%
8	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
9	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
10	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
11	23.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.25%
12	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
13	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
14	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
15	6.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.09%
16	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
17	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
18	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
19	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
TOTAL	87.22%	57.84%	0.00%	0.00%	0.00%	24.90%

Gráfico: Porcentaje de masa modal

Anexo 4: Diagrama de esfuerzo de los modelos numéricos.







Anexo5: Comprobación de regresión lineal múltiple

Error (%)	E_{AD-R} (t)	E_{AD-P} (t)	c (t/m²)	∅ (°)	E_{AE} (t)	E_{AD-M} (t)
14.88	17.79	15.15	0.7	25	8.24	24.27
21.82	25.29	19.77	1	15	10.52	36.28
10.52	21.66	19.38	1.3	12	9.33	40.75
13.13	17.44	15.15	0.6	25	9.01	23.83
23.27	22.95	17.61	1.2	15	8.67	36.28
10.99	20.51	18.25	1.4	12	8.36	40.75
10.33	15.93	14.29	0.8	25	7.48	23.83
22.67	24.14	18.67	1.1	15	9.59	36.28
11.07	19.91	17.71	1.45	12	7.88	40.75