

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACION DE LA INCIDENCIA DE LAS
PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN LAS ESTRUCTRAS MEDIANTE EL
SOFTWARE MIDAS**

AUTOR(A): GERMY ALBERTO PUPO VIERA

HOLGUÍN

2022



DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACION DE LA INCIDENCIA DE LAS
PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN LAS ESTRUCTRAS MEDIANTE EL
SOFTWARE MIDAS**

AUTOR(A): GERMY ALBERTO PUPO VIERA

TUTORA: MSc. VIVIAN HERNÁNDEZ COLUMBIÉ

PROFESOR(A) ASISTENTE

HOLGUÍN

2022





"Entender los fenómenos de la naturaleza es una tarea difícil y de tiempo que el ingeniero científico tiene que descubrir sin desesperarse..."

Leonardo Zeevaert (1984)

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, gracias a Dios por estar a mi lado durante este camino y brindarme la sabiduría que hizo posible este trabajo.

A mi madre por todo su amor, apoyo y comprensión en este proceso.

A mi padre que siempre ha estado ahí para apoyarme en todo momento

A mi tutora Vivian Hernández Columbié por sus sabios consejos y conducción en el desarrollo de la investigación.

A mi esposa por estar a mi lado en cada paso.

A mis suegros por ser de apoyo y darme fuerzas para seguir adelante

A aquellas personas que de una forma u otra han estado presentes en este camino de resistencia brindándome su apoyo.

DEDICATORIA

A mis padres por todo su amor y sacrificio para que yo alcanzara mis metas.

RESUMEN

El estudio de los suelos es de vital importancia para el diseño de las diferentes estructuras. Estas son susceptibles a los efectos de las ondas generadas por los sismos y las vibraciones de máquinas de gran envergadura. Su falla puede causar importantes pérdidas, por lo que es imprescindible que mantengan su integridad ante la acción de dichos fenómenos.

En el presente trabajo se realiza un análisis de la acción de propiedades dinámicas y propiedades estáticas de los suelos en las estructuras. Para ello se emplea el Método de Análisis 2d Equivalente a través del software Midas GTS NX. Se aplica al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas. Se realiza una comparación entre el análisis considerando las propiedades dinámicas, y considerándola empleando de solo las propiedades estáticas. El desarrollo del estudio dinámico, reporta un incremento de todas las solicitaciones generadas tanto en la estructura de cimentación como en el suelo. Se demuestra que el uso de las propiedades dinámica en el cálculo de esfuerzos para el diseño de estructuras nos acerca más a la realidad.

ABSTRACT

The study of soils is of vital importance for the design of the different structures. These are susceptible to the effects of waves generated by earthquakes and the vibrations of large machines. Their failure can cause significant losses, so it is essential that they maintain their integrity in the face of the action of these phenomena.

In the present work, an analysis of the action of dynamic properties and static properties of soils in structures is carried out. For this, the Equivalent 2d Analysis Method is used through the Midas GTS NX software. Applies to the case study: Bridge over the Cabañas River. A comparison is made between the analysis considering the dynamic properties, and considering it using only the static properties. The development of the dynamic study reports an increase in all the requests generated both in the foundation structure and in the ground. It is shown that the use of dynamic properties in the calculation of efforts for the design of structures brings us closer to reality.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENTE A LAS PROPIEDADES DINÁMICAS Y SU INCIDENCIAS EN LAS ESTRUCTURAS	6
Introducción al capítulo	6
1.1 Generalidades sobre las propiedades dinámicas de los suelos	7
1.1.1 Factores que inciden en las propiedades dinámicas del suelo	10
1.1.2 Métodos para la determinación de las propiedades dinámicas de los suelos	11
1.1.3. Ensayos para la obtención de propiedades dinámicas	17
1.2. Uso y aplicación de las propiedades dinámicas del suelo.....	20
1.2.1 Propiedades dinámicas de los suelos que inciden en las estructuras.....	22
1.3. Métodos existentes para la estimación del comportamiento estructural según propiedades dinámicas del suelo	23
1.3.2 Métodos analíticos matemáticos	24
Conclusiones del capítulo:	28
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE EL SOFTWARE MIDAS	29
Introducción a capítulo	29
2.1 Concepciones metodológicas para la elaboración del procedimiento	29
2.2 Diseño del procedimiento para la estimación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en las estructuras mediante el software Midas.	30
2.2.1 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa I).....	32
2.2.2 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa II).....	34
2.2.3 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa III).....	35
2.3. Aplicación del procedimiento al caso de estudio puente sobre Rio Cabaña, Moa.	36
2.3.1 Descripción general del caso de estudio.....	36
2.3.2 Procedimiento de análisis equivalente en 2d.	42
2.3.3 Modelo del caso de estudio con el software.	45
Conclusiones del capítulo	49
CONCLUSIONES GENERALES	51
RECOMENDACIONES	52

BIBLIOGRAFÍA..... 53
ANEXOS..... 58

INTRODUCCIÓN

Toda obra constructiva ya sea puentes, edificaciones, obras hidráulicas, vías de comunicación entre otras sientan sus bases sobre el suelo, el cual se convierte en una de las partes fundamentales que debe garantizar la estabilidad y seguridad. De ahí la importancia de conocer las características físicas y mecánicas de los mismos, que permita predecir el comportamiento no solo estático si no también dinámico. Por ende, facilita obtener la respuesta estructural de la obra civil construida en dicha zona, así como también las soluciones que deberían adoptarse tanto en el diseño como en la mitigación de daños post construcción.

Ante la acción de movimientos telúricos el suelo asume un comportamiento totalmente diferente en comparación con las cargas estáticas. Refiere (Joffre, 2016) que la incidencia de sismos en el comportamiento dinámico de los suelos es para la ingeniería un estudio de vital importancia. Estudiar lo que sucede con el suelo en el momento que ocurre el sismo ayuda al análisis de parámetros importantes como el módulo de corte y el amortiguamiento, los cuales son claves en el comportamiento dinámico. Además de ser factores de interés en la prevención de daño en las estructuras debido a la pérdida de resistencia del suelo.

La magnitud del daño que puede ocasionar un sismo sobre una edificación depende de las características del movimiento del mismo, de las características de la construcción (rigidez, configuración estructural, configuración en planta, y elevación de la estructura, etc.) y de la respuesta del terreno. La combinación de estos tres elementos determina el peligro que tienen las estructuras levantadas por el hombre (Rodriguez, 2007).

Según refiere (Joffre, 2016) que lo anterior supone un problema producto de la interacción dinámica suelo - estructura traducido en el comportamiento o estabilidad del suelo de cimentación, la naturaleza de sollicitación, condiciones del suelo y el efecto recíproco entre la estructura y el suelo. Lo cual sirve de fundamento para entender el sismo y su respuesta sísmica a lo que conlleva a un mejor análisis sobre este tipo de eventos.

Entre los numerosos casos de la influencia del suelo en las características vibratorias de los movimientos pueden mencionarse ejemplos conocidos desde hace mucho tiempo como en el sismo de la India en 1819 y el de San Francisco, EUA, sismo de 1906 donde

las diferencias en intensidad observada estaban en dependencia de las características del suelo (Seed, 1982). Durante las últimas décadas muchos registros se han obtenidos con la red de instrumentos para movimientos fuertes en sitios que tienen diferentes características del suelo, mostrando los efectos de los suelos en las características de los movimientos vibratoriales. Como ejemplos típicos mencionaremos los sismos de Monte Negro, Yugoslavia en 1979 y México en 1985. En estos sismos para diferentes características del suelo, se registraron diferencias significativas en las aceleraciones picos. Por ejemplo, en la ciudad de México se registraron aceleraciones pico, en el rango de ($a_{max} = 0,035g$) en suelo rígido, hasta ($a_{max} = 0,168g$) en suelo muy suelto a gran profundidad. En el caso de los sismos, un riesgo especial está dado en el desplazamiento de masa de tierra o rocas superficiales degradadas, fallo de taludes o la ocurrencia de licuación, estos fenómenos son resultado de los efectos de cargas dinámicas adicionales y la transformación de las propiedades iniciales del suelo (Mestre, 2006)

Cuba es un archipiélago de las Antillas Mayores, y desde el punto de vista neo tectónico un mega bloque emergido, y en ascenso diferencial entre sus partes, que está incorporado tectónicamente al borde meridional de la placa Norteamérica. Esta neo-estructura tiene 3 grandes bloques (Occidental, Centro-Occidental y Oriental) con 5 límites tectónicos definidos (fallas: Cauto-Nipe, Cochinos, Norte cubana, Oriente y Sur cubana) (Figura 3). Las zonas con mayor modificación de las propiedades del suelo por consecuencia de los sismos es la zona Oriental en su totalidad. (Rodríguez, 2020).

El Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) en el estudio realizado 2010 sobre la provincia de Holguín para determinar el peligro sísmico, revela que, en los municipios de Moa, Mayarí y Sagua de Tánamo se reportan las mayores actividades sísmicas y se esperan grandes valores de aceleración del terreno comparado con el resto de los municipios de la provincia.

Desde el punto de vista sismo tectónico, la región de Moa está directamente afectada por la zona de falla que es la continuidad de la falla Norte de la Española. A partir del análisis de la información tectónica y sismológica de la región de Moa, al noreste de la región de estudio, Arango et al. (2009), llegaron a la conclusión de que, al norte de la región oriental

de Cuba, específicamente al este de la Bahía de Nipe, a pocos kilómetros de la costa, se evidencia la existencia de la continuidad de la falla Norte de la Española. (Arias, 2017). Esta zona está bajo un mayor riesgo sísmico lo cual conlleva a que las propiedades dinámicas del suelo en este lugar estén en constante modificación por causa de los constantes movimientos telúricos.

En las empresas de diseño como Umbrales, Arquitectos de la Comunidad, IPROYAZ, Vértice, CEPRONIQUEL... pertenecientes a la provincia de Holguín realizan los estudios de forma tradicional en zonas de mediana y alta actividad sísmica. Consideran la estructura rígida en su base y emplean las propiedades estáticas del suelo. Siendo estas una de las causas de aparición de lesiones importantes en viviendas y edificaciones en la región mencionada. Algunas investigaciones realizadas por Patricia, Conthya, Hernández en la provincia revelan el efecto desfavorable al considerar el suelo en las modelaciones matemáticas de edificaciones y puentes.

En dichas investigaciones se emplean el método equivalente y aproximado: método del coeficiente de balasto o método de Winkler, que toma como referencia una propiedad estática: el módulo de elasticidad (E). Si bien estos resultados se aproximan al comportamiento real de una estructura una vez construida, no se considera el efecto de las propiedades dinámicas del suelo, lo que trae aparejado la incertidumbre en dichos resultados. Se tiene en cuenta como limitación que la obtención de las propiedades dinámicas requiere de técnicas, tecnologías y ensayos específicos y que aún el cómo emplear las mismas en el campo de la modelación es limitada.

Por lo anterior se define como **problema de la investigación** cómo predecir el comportamiento del suelo y su incidencia en las estructuras ante cargas sísmicas, a partir de considerar las propiedades dinámicas del suelo.

El **objeto de la investigación** propiedades dinámicas del suelo, inmerso en el **campo de acción** incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en el comportamiento de las estructuras.

Como **objetivo general** se plantea diseñar un procedimiento para la estimación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en el comportamiento de las estructuras.

Luego de analizar la situación problemática se formula la siguiente **hipótesis**: si se diseña un procedimiento que considere las propiedades dinámicas del suelo se podrá realizar una estimación del comportamiento de la estructura ante las cargas sísmicas.

Con el fin de demostrar la validez de la hipótesis, dar cumplimiento al objetivo general y solucionar el problema de la investigación se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Analizar el estado del arte referente a las propiedades dinámicas de los suelos.
2. Fundamentar teórica y metodológicamente el uso de las propiedades dinámicas de los suelos para la estimación del comportamiento de las estructuras.
3. Establecer los pasos fundamentales para el diseño del procedimiento
4. Aplicar el procedimiento al caso de estudio Puente Siboney

Para constatar la validez de la hipótesis, dar cumplimiento a los objetivos y resolver el problema de la investigación se utilizó un sistema de métodos de la investigación científica de naturaleza teórica, empírica y estadístico-descriptivos.

Métodos teóricos:

- Histórico-lógico: Se realizó una búsqueda bibliográfica para la determinación de los antecedentes históricos relacionado con las propiedades dinámicas de los suelos.
- Hipotético-deductivo: Se elaboró la hipótesis de la investigación, se precisaron las variables y se escogió una lógica investigativa.
- Sistémico estructural funcional: Para conformar el aporte de la investigación con un enfoque sistémico considerando su estructura, componentes y relaciones.
- Modelación: La modelación científica es un instrumento de la investigación utilizado para analizar la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en el comportamiento de las estructuras, utilizando el software Midas GTS.
- El análisis-síntesis, la inducción-deducción, y la abstracción-generalización fueron concebidos como procedimientos teóricos de la investigación y se aplicaron a lo largo de todo el proceso investigativo.

Métodos empíricos:

- **Análisis documental:** Se empleó en gran medida para la búsqueda de información relacionada con la caracterización histórica, teórico-metodológica y empírica en torno a las propiedades dinámicas de los suelos.
- **Entrevistas:** Permitió obtener información de interés acerca del objeto de estudio para su caracterización y el campo de acción de la investigación, ya que se pudo intercambiar con el proyectista y equipo de diseño encargados de la obra.
- **Consulta a expertos:** Permitió validar la factibilidad del análisis de la estructura incluyendo los efectos de la incidencia de las propiedades dinámicas de los suelos en estructuras a través del criterio de especialistas.

Métodos estadísticos:

- **Métodos estadísticos descriptivos:** Posibilitaron la gestión y recepción de los datos para una mejor interpretación y representación de las informaciones derivadas del análisis del objeto de la investigación y de la validación del diseño.

El **aporte** de la investigación radica en el análisis de la influencia de las propiedades dinámicas de los suelos en las estructuras, mediante el uso del software Midas GTS tomando en cuenta todas estas acciones como un conjunto para simular la estructura lo más similar a la realidad.

La **actualidad** es revelada por el hecho de que la investigación responde a una de las líneas de investigación que desarrolla el Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín: Innovación para el desarrollo sostenible y responde a una de las áreas del conocimiento que es el modelado, diseño y evaluación de obras de ingeniería, además de estar vinculado al proyecto de investigación: Vulnerabilidad física-estructural y evaluación de riesgo de las edificaciones en la Universidad de Holguín ante eventos sísmicos. (Proyecto Institucional dirigido por el Departamento). Además, tributa al proyecto asociado al Programa Nacional de Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas (DISA): Gestión del riesgo sísmicos en las edificaciones y puentes de la provincia de Holguín. Está en correspondencia con los objetivos 9 y 11 de la Agenda 2030, abogando por la obtención, desde el diseño, de infraestructuras resistentes y resilientes ante fenómenos que pueden causar desastres naturales, como los sismos.

Además, forma parte de los grupos científico estudiantiles: Vulnerabilidad estructural de las edificaciones ante la acción de fuertes vientos y eventos sísmicos y Percepción de riesgos en la construcción, desarrollados por el departamento de construcciones.

El informe de la investigación se estructura en introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografías y anexos.

En el capítulo I se realiza una valoración sobre la filosofía general de las propiedades dinámicas de los suelos, particularizando en los conceptos de propiedades dinámicas. Se aborda también el tema de la filosofía del diseño sismo resistente de estructuras en Cuba y el mundo, la clasificación de los mismos en la región oriental, fundamentalmente en Holguín. Se realiza un análisis crítico sobre las experiencias nacionales e internacionales de la acción de las propiedades dinámicas en el suelo. Se determinan los modelos y métodos para la obtención de propiedades dinámicas del suelo. Se define el software a emplear en la simulación.

En el capítulo II se detalla el procedimiento realizado al modelo matemático empleando el software Midas GTS. Se tienen como requisitos; los datos del perfil ingeniero-geológico suministrados por la ENIA y los datos de la estructura suministrados por la Empresa de Proyectos Vértice, en un diseño conjunto considerando el efecto de sitio plasmado en la NC: 46-2017 y la respuesta tanto de la estructura como del suelo al considerar el coeficiente de balasto. Se evalúan además las condiciones desfavorables, la interacción suelo - estructura y los efectos producidos por la influencia sísmica y el paso de la carga vehicular, y se comparan los resultados de la modelación con el análisis del puente sin considerarla. Se aprecia un incremento en cuanto al período de oscilaciones del sistema, las sollicitaciones y la flexibilidad del sistema en general.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENTE A LAS PROPIEDADES DINÁMICAS Y SU INCIDENCIAS EN LAS ESTRUCTURAS

Introducción al capítulo

El conocimiento y estudio de las propiedades dinámicas de los suelos es uno de los problemas más frecuentes en el ámbito de la ingeniería civil, cuyas consecuencias son altamente costosas en todos los sentidos. Las ondas que generan los movimientos telúricos y además la acción de las estructuras sobre los suelos generan una cantidad de

cargas dinámicas que en gran magnitud representan un problema para las diversas estructuras. La necesidad de una eficiente estimación de las pérdidas socio-económicas luego de un sismo de gran intensidad ha constituido el motor impulsor hacia el desarrollo de novedosas metodologías. Las mismas persiguen como fin la evaluación de estructuras ya existentes y la estimación del posible daño causado por un terremoto en un lugar específico.

En el presente capítulo se desarrolla la búsqueda de información relacionada con las propiedades dinámicas de los suelos, métodos de obtención y factores que inciden en las mismas.

1.1 Generalidades sobre las propiedades dinámicas de los suelos

La Dinámica de suelo es la rama de la mecánica de suelos que se ocupa del comportamiento del suelo bajo carga dinámica, incluido el análisis de estabilidad de estructuras de tierras y estructuras de retención. Estas cargas están asociadas con las propiedades dinámicas de los suelos que son la velocidad de onda cortante (V_s), módulo de cortante (G), factor de amortiguamiento (D) y el coeficiente de Poisson (μ). Las particularidades internas con las que se definen el comportamiento de los suelos no pueden obviarse ante el análisis de la interacción suelo - estructura como un mecanismo que funciona en relación. Ver anexo 1 (Fernández Sola, 2013)

Bajo la influencia de las cargas dinámicas, el suelo como medio actúa de forma impredecible. Las cargas dinámicas iniciales desarrollan fuerzas de inercia en el suelo, las cuales modifican la relación tensión-deformación convencional. Estas relaciones tensión-deformación son extremadamente complejas y aún en la contemporaneidad no han sido descritas para la exactitud del cálculo en su comportamiento. (Calderín Mestre, 2006).

- Velocidad de Ondas Cortantes

En el caso de las ondas transversales o cortantes los términos de la ecuación de onda son vectoriales, pues la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación, sin embargo, el análisis se simplifica bastante si se considera la onda en una dimensión. La

ecuación diferencial de movimiento ondulatorio de dirección transversal, en una dimensión (Alonso y Finn, 1986) es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{G}{p} * \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Debido a que el movimiento transversal en tres dimensiones se puede separar en dos componentes de una dimensión, además de la dirección de propagación, la velocidad de propagación de la onda cortante es:

$$Vs = \sqrt{\frac{G}{p}} \quad (1.2)$$

p: Densidad de la masa

Vs: Velocidad de ondas Cortantes

G: Modulo de Corte

- **Módulo de Corte (G)**

Según (Troncoso, 1992) el Módulo de Corte es una de las propiedades mecánicas del suelo necesarias para obtener las relaciones entre velocidades y para calcular la velocidad de onda longitudinal. Es una de las propiedades más importantes en el análisis dinámico del suelo, ya que es el parámetro directo y representativo en el cálculo de esfuerzos y deformaciones que experimenta. Como se ha observado el suelo presenta un comportamiento no lineal entre esfuerzos y deformaciones. Además, es una relación curvilínea que se conoce como "Ciclo de histéresis esfuerzo deformación del material; por lo cual, se define el módulo de rigidez a cortante del suelo (G) como la pendiente de la secante que une los puntos extremos de dicho ciclo, G1 y G2.

El módulo de rigidez a cortante (G), se usa para predecir desplazamientos debidos a vibraciones de cimentaciones sujetas a cargas cíclicas, así como las sollicitaciones impuestas por un sismo. Algunos problemas en el área de la Dinámica de Suelos caen en dos categorías generales de magnitud deformación, las cuales se muestran en la Tabla No.1.(Sanchez, 2009)

Tabla No.1. Intervalos de amplitud de deformación ξ . Fuente:(Sanchez, 2009)

Categorías generales de magnitud de deformación	Intervalos de Amplitud de la de la Deformación ξ
Cimentaciones Para Maquinas	$10^{-4} a 10^{-3}$
Sismos	$10^{-2} a 10^{-1}$ y Mayores

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.3)$$

Dónde: E es el Módulo de Young y μ es el coeficiente de Poisson.

- Coeficiente de Poisson:

El coeficiente de Poisson es la razón entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal. Para materiales elásticos, el coeficiente de Poisson varía entre 0 y 0,5. En el caso de las rocas, valores en el rango corresponden a rocas muy duras; y rocas alrededor de 0,45 son muy blandas (Rosales, 2001).

- Factor de Amortiguamiento:

La razón de amortiguamiento (D) expresa la capacidad del material para disipar la energía. Se calcula según (Rodríguez ,2005):

$$D = \frac{1}{4\pi} * \frac{A_l}{A_T} = \frac{1}{2\pi} * \frac{A_l}{G * \gamma_1^2} \quad (1.4)$$

A_l : es el area del ciclo de carga – descarga para causar deformacion maxima

Existen además ciertos tipos de amortiguamiento dependiendo de los mecanismos que utilice un determinado sistema para disipar la energía, dentro de los que podemos distinguir:

- a) Amortiguamiento viscoso.
- b) Amortiguamiento por radiación.
- c) Amortiguamiento histerético.

1.1.1 Factores que inciden en las propiedades dinámicas del suelo

Los factores claves que influyen en las propiedades dinámicas del suelo son la tensión efectiva de confinamiento, el nivel de tensiones en el suelo, el índice de poros y la plasticidad del suelo. La tensión total efectiva vertical está definida como $\sigma'V = \rho z$, donde ρ es el peso específico del suelo y z la profundidad desde la superficie. Por lo tanto, la tensión efectiva vertical aumenta con la profundidad y el material está más confinado. Un incremento de tensión efectiva media provoca un aumento del límite de deformación elástica. En consecuencia, los suelos bajo tensiones de confinamiento altas se comportan como materiales más rígidos que suelos idénticos bajo tensiones de confinamiento menores. Se ha observado que para arcillas el aumento del índice de poros causa una disminución del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento.

Es necesario comprender los factores que afectan a los parámetros que mejor describen el comportamiento del suelo cuando este se encuentra en movimiento son el módulo de rigidez a cortante (G) y la razón de amortiguamiento. (Mestre, 2006)

Factores que influyen en el Módulo de Cortante:

- a) Efecto de la amplitud de deformación.
- b) Efecto de la relación de vacíos.
- c) Efecto de la presión confinante.
- d) Efecto de la historia de consolidación OCR.
- e) Efecto de la consolidación secundaria.
- f) Efecto del índice de plasticidad.

Factores que influyen en la Razón de Amortiguamiento:

- a) Efecto de la amplitud de deformación angular (γ).
- b) Efecto de la presión confinante.
- c) Efecto de la frecuencia de carga.

Tabla No.2. Parámetros que afectan el módulo de rigidez o cortante y el amortiguamiento.

Fuente:(Joffre, 2016)

Parámetros	Importancia para el módulo de rigidez (G) ^(a)		Importancia para el amortiguamiento (ξ)	
	Arenas limpias	Suelos cohesivos	Arenas limpias	Suelos cohesivos
Amplitud de formación (γ).	M	M	M	M
Presión de confinamiento (σ_c).	M	M	M	M
Relación de vacíos (e).	M	M	M	M
Numero de ciclos de carga (N).	R ^(b)	R	M	M
Grado de saturación (S).	R	M	m	m
Parámetros de resistencia al corte.	m	m	m	m
Frecuencia de carga (arriba de 0.1 Hz).	R	R	R	R
Características granulares, tamaño, forma, mineralogía.	R	R	R	R
Estructura del suelo.	R	R	R	R
Cambio de volumen debido a la amplitud cortante.	D	R	D	D

d) M = muy importante

e) m = menos importante

f) R = relativamente importante

g) D = desconocido.

1.1.2 Métodos para la determinación de las propiedades dinámicas de los suelos

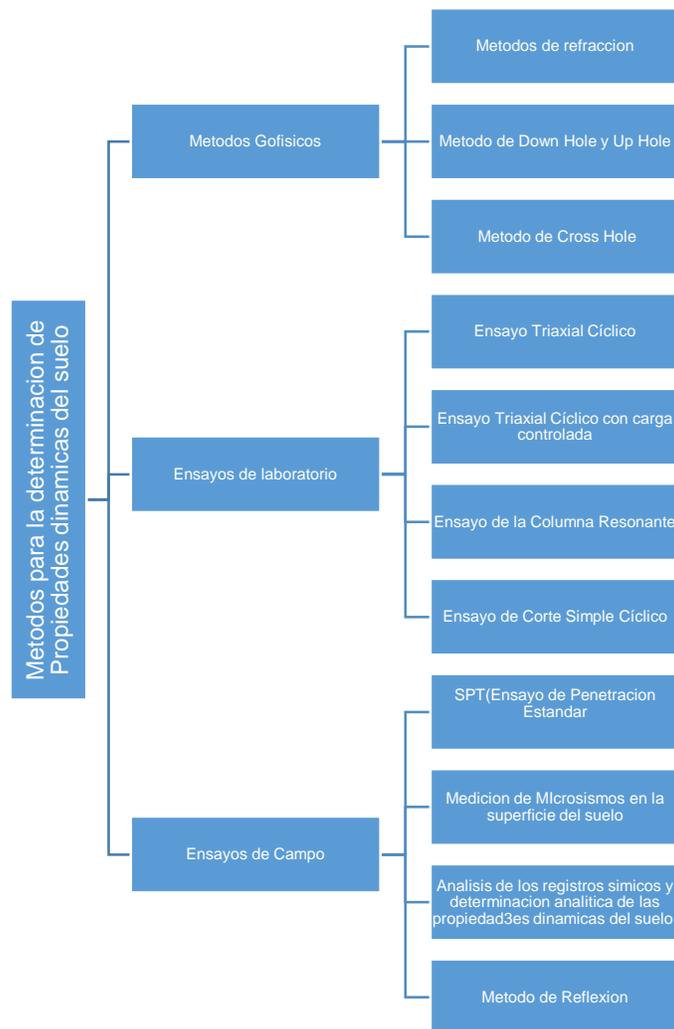
El problema de medir las características del comportamiento dinámico de los suelos es uno de los aspectos fundamentales de la Dinámica de Suelos que demuestra toda su utilidad en los trabajos de microzonificación sísmica de ciudades. En el caso de la Dinámica de Suelos se han desarrollado metodologías de análisis en laboratorio sobre muestras inalteradas para la obtención de las propiedades dinámicas del suelo. Las ventajas y desventajas de cada una de estas metodologías son bien conocidas y deben

analizarse con rigor para decidir sobre el dominio de validez de cada una de ellas.(Sanches, 2009).

Anexo 1. Métodos para la determinación de Propiedades dinámicas del suelo Fuente: Creación propia

En el estudio del comportamiento del suelo sometido a cargas cíclicas se puede distinguir el comportamiento del suelo a la ruptura y antes de la ruptura. No todos los ensayos permiten llevar el suelo a la ruptura; actualmente solo se puede aplicar grandes deformaciones mediante algunos ensayos de laboratorio.

Existen métodos geofísicos para determinar las propiedades dinámicas de los suelos los cuales hacen posible la investigación de las propiedades de los suelos. Los sedimentos y los afloramientos rocosos, también son utilizados para determinar las propiedades



dinámicas de los suelos, en particular los de compresión y cortante, velocidades de las ondas del suelo, así como los módulos de elasticidad y de corte del suelo. Estas propiedades son necesarias para determinar la respuesta del suelo y los sistemas suelo – estructura a cargas dinámicas. La ventaja de estos métodos consiste en que una vez definidos los parámetros del suelo, estos son realísticos ya que las mediciones se han realizado en condiciones naturales del suelo donde todos los factores que afectan las propiedades y los parámetros dinámicos del suelo están presentes. Partiendo de este punto de vista en la dinámica de suelos estos métodos se han aplicado en la determinación de las velocidades máximas (V_{s0}) y (V_{p0}) y los módulos (G_0) y (E_0) tomados como los resultados como los más correctos.(Mestre, 2006)

Las desventajas de estos métodos, es que ellos no pueden aplicarse para la determinación algunos parámetros dinámicos del suelo como son: los módulos a grandes deformaciones, el amortiguamiento y las relaciones ($\sigma-\epsilon$) es decir ($\tau-\gamma$). (Mestre, 2006)

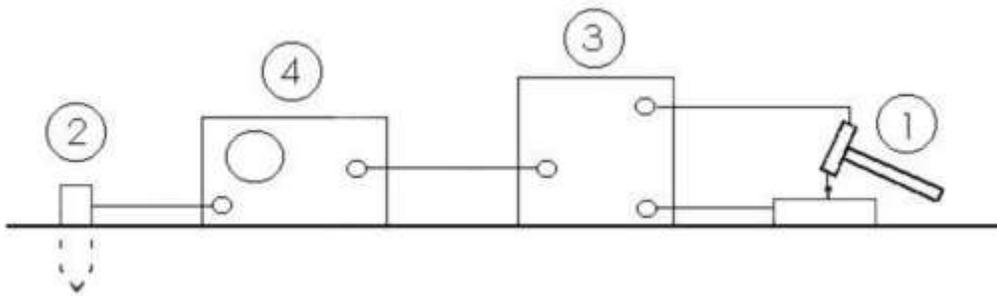


Fig.: 1 Equipamiento geofísico de medición de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. (1) Generador de excitación (S), (2) Un receptor de señal (Geófono) (R), (3) Circuito capacitivo (4) Osciloscopio. Fuente:(Mestre, 2006).

Métodos Geofísicos

- Métodos de Down Hole y Up Hole:

Estos métodos se aplican para la medición directa de la velocidad de propagación de la onda elástica a través de los estratos del suelo mediante un hueco de perforación. En el caso del método Down Hole la fuente (s) de las ondas elásticas se ubicará en la superficie del suelo al lado del hueco, mientras los geófonos (R) los cuales registran el arribo de las ondas elásticas, son puestos en algunos puntos a diferentes profundidades hacia abajo

del hueco, usualmente cercanos al horizonte entre estratos, como se muestra en la Fig.2. Las ondas se propagan de la superficie a la profundidad pasando a través de los estratos del suelo en los que el tiempo (t) de viaje de (S) a (R). Se mide con las distancias (Z) entre (S) y (R) conocidas, y la 26 distancia relativa (H) entre los geófonos, pueden medirse las velocidades (Vs) correspondientes directamente a partir de la expresión:

$$V_s = \frac{\Delta Z}{\Delta t}$$

La aproximación del método up hole es equivalente, excepto que los geófonos registradores que toman la onda se ubican en la superficie del suelo cercanos al hueco, mientras la fuente de las ondas se ubica a diferentes niveles de profundidad, pasando a través de los estratos del suelo y el tiempo de viaje (t) se mide de (S) a (R).Fig:3

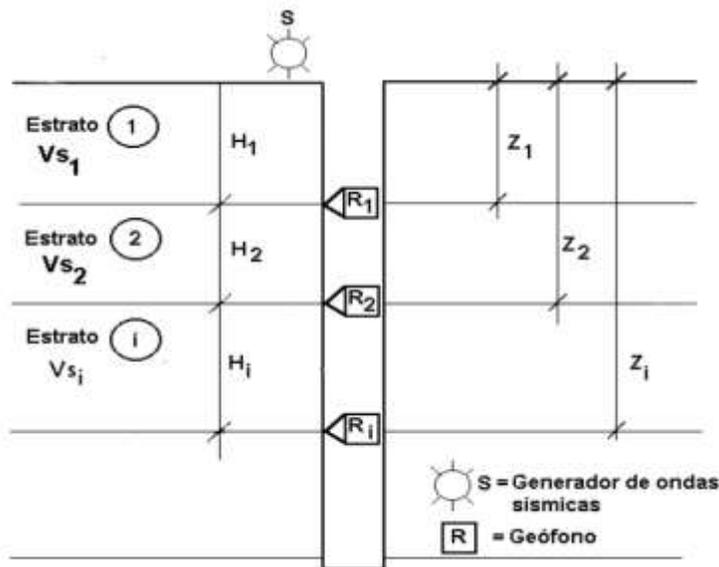


Fig.: 2. Métodos de Down Hole. Fuente:(Mestre, 2006).

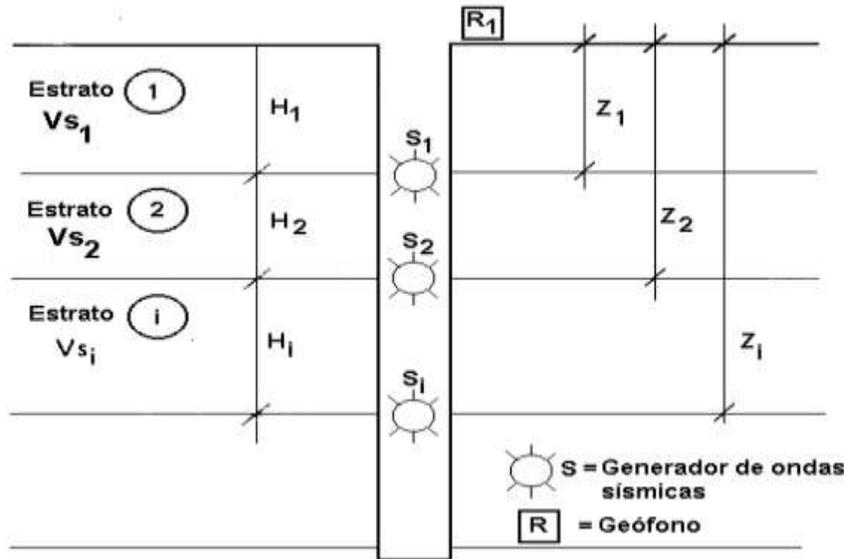


Fig.: 3. Métodos de Up Hole. Fuente:(Mestre, 2006).

Método de Cross Hole:

Este método es considerado como uno de los más precisos, dando velocidades más realistas, cuando se realiza la medición del tiempo de viaje solo a través de un estrato. Por lo que este método se aplica a sitios de extraordinaria importancia, como por ejemplo, los planificados para la construcción de centrales nucleares, presas o similares. Para realizar las mediciones por este método es necesario tener los huecos taladrados (perforaciones). El generador (S) es puesto en uno de ellos y los geófonos -registradores se ubican en el otro, ambos instrumentos se ubican a la misma profundidad (Z) del estrato considerado. Las ondas viajan directamente de (S) hacia (R) a través del estrato a la profundidad (Z), donde el tiempo de arribo (t) se mide, como la distancia entre (S) y (R) pueden medirse directamente las velocidades correspondientes (Vs) pueden obtenerse directamente a partir de la expresión:

$$V_s = \frac{X}{t}$$

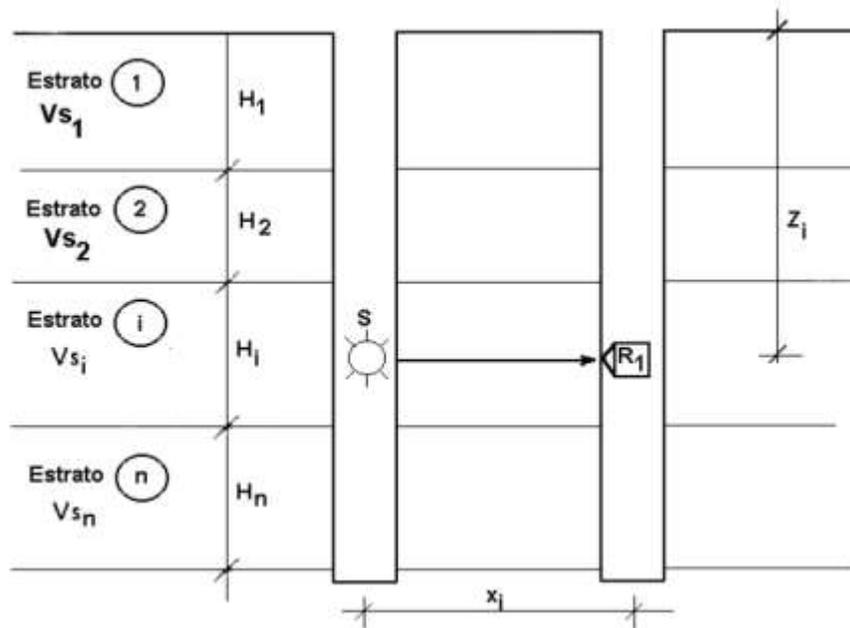


Fig.: 4. Métodos de Cross Hole. Fuente: (Mestre, 2006)

Métodos empíricos

Según (Sanches, 2009) existen varias pruebas empíricas para la búsqueda de propiedades dinámicas de los suelos. Son las más usadas por los investigadores para determinar la acción de las propiedades dinámicas del suelo en estructuras

1. Prueba de Penetración Estándar(SPT)

La prueba de penetración estándar ha sido por mucho tiempo la prueba más comúnmente usada como ensayos in situ en la ingeniería geotécnica. Es también de uso general en una serie de aplicaciones geotécnicas de Ingeniería Sísmica. El sondeo de penetración estándar es de los métodos que arrojan mejores resultados en la práctica ya que proporcionan información útil en torno al subsuelo, estos se realizan según la norma ASTM D1586-84, utilizando un tubo de pared gruesa partido longitudinalmente (comúnmente llamado tubo partido).

2. Sondeo de cono eléctrico (SCE).

Trabajos realizados por Jaime (1987), en las arcillas de la ciudad de México, dio como resultados correlaciones de los valores del perfil de resistencia de punta de cono con los

resultados de la medición de propagación de ondas S, obteniendo mediante la sonda suspendida, así como los obtenidos con la técnica de Down hole. Ambos procedimientos se emplearon para determinar las velocidades de onda de cortante. Es importante señalar que las correlaciones corresponden a la formación arcillosa superior, existiendo zonas en las que las correlaciones corresponden a la formación arcillosa superior existiendo zonas en las que únicamente son válidas para los primeros 20m a 40m.

3. Ensayos Triaxiales consolidados no drenados (CU)

De acuerdo con Jaime (1987) se realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) con consolidación isotrópica en muestras de arcillas inalteradas, ensayando también en la columna resonante especímenes de sitios y profundidades iguales. En muchos de los casos las muestras ensayadas en triaxial CU y en columna resonante eran gemelas o bien correspondían al tramo inmediato superior o inferior del mismo tubo shelby.

1.1.3. Ensayos para la obtención de propiedades dinámicas

Debe tenerse en cuenta que no existe un ensayo único que cubra todo el intervalo de deformaciones requerido en la solución de los problemas de la Dinámica de Suelos. El ensayo de los suelos sometidos a carga dinámica puede realizarse mediante técnicas de laboratorio.(Sanches, 2009)

- **Ensayo Triaxial Cíclico o Ensayo Triaxial Cíclico con carga controlada**

Este método de prueba cubre la determinación de la fuerza triaxial cíclica (a veces llamada potencial de licuefacción) de suelos saturados en estado inalterado o alterado, por la técnica triaxial cíclica de carga controlada.

La resistencia triaxial cíclica de un suelo es evaluada de manera relativa de acuerdo a un número de factores, que incluyen: Incremento de la deformación axial, la magnitud del esfuerzo cíclico aplicado, número de ciclos de aplicación de los esfuerzos, desarrollo de excesos de la presión de poros y el estado de esfuerzos efectivos. Esta prueba se conduce bajo condiciones no drenadas, de manera similar a las condiciones no drenadas encontradas en campo durante un sismo o a través de un evento que produzca un proceso carga cíclica.

Sus resultados se utilizan para evaluar la capacidad de un suelo a resistir esfuerzos cortantes, los cuales son inducidos en la masa de suelo debido a un sismo o algún otro proceso de carga cíclica. Se puede realizar a diferentes valores de presión de confinamiento efectiva (presión de la cámara menos contrapresión) en especímenes consolidados isotrópicamente, proporcionando de esta manera los datos requeridos para estimar la estabilidad cíclica de un suelo. Esta prueba es una técnica comúnmente usada para determinar la resistencia cíclica de un suelo (potencial de licuefacción de un suelo).(Sanches, 2009).



Fig.: 5. Conjunto de ensayo triaxial cíclico para el control y medición de la carga aplicada. Fuente:(Sanches, 2009).

Ensayo de la Columna Resonante

El ensayo de la columna resonante consiste en inducirle vibración a un espécimen de suelo hasta alcanzar deformaciones máximas tanto cortantes como axiales, lo que se genera al entrar en resonancia el sistema; con estas deformaciones se pueden calcular el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G), la razón de amortiguamiento (ξ), parámetros dinámicos del suelo que son utilizados en análisis dinámicos de suelo e interacción suelo-estructura.

Este método de prueba cubre la determinación de los siguientes parámetros dinámicos del suelo: Módulo de elasticidad dinámico (E_d), módulo dinámico al esfuerzo cortante (G),

razón de amortiguamiento (ξ), amplitud promedio de deformación cortante, (γ), amplitud promedio de deformación elástica axial (ϵ), para un espécimen cilíndrico sólido de suelo, ya sea este inalterado (extraídos del tubo de muestras o cortado a mano de maquetas de suelo) o bien alterado (reconstruido por compactación). La vibración del espécimen puede ser aplicada en condiciones donde se va controlando la presión de confinamiento en el espécimen.

Los parámetros dinámicos del suelo que se obtienen de la prueba columna resonante son útiles en el análisis de estructuras de suelos expuestas a cargas cíclicas reversibles como el caso de los sismos, tráfico, etc.(Sanches, 2009)

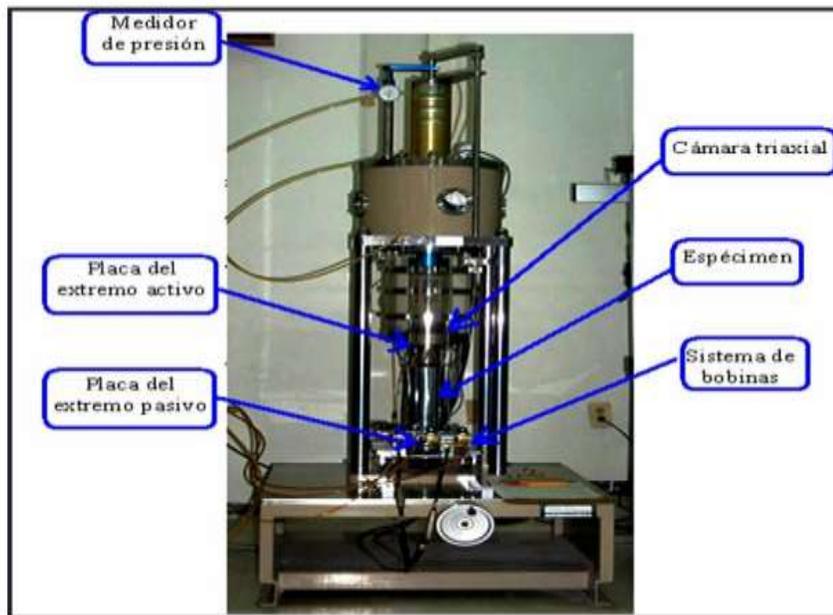


Fig.: 6. Aparato de Columna resonante. Fuente:(Sanches, 2009).

Ensayo de Corte Simple Cíclico

Esta prueba modela deformaciones grandes, similares a la prueba triaxial cíclica. Para la realización de esta prueba no existe un ensayo estándar bajo ASTM, sino más bien el procedimiento para llevarlo a cabo queda a criterio de cada uno de los laboratorios que cuentan con esta clase de equipo.

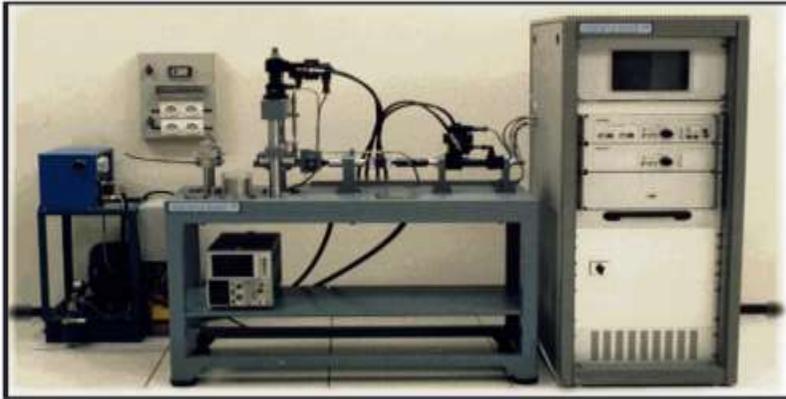


Fig.: 7. Modelo de equipo de corte simple cíclico. Fuente:(Sanches, 2009)

1.2. Uso y aplicación de las propiedades dinámicas del suelo.

En varios estudios realizados por (Zeevaert-Wiechers, 2000) refiere que en los últimos tiempos, se ha incrementado el interés por conocer con mayor precisión el efecto que causan las ondas sísmicas en los problemas relacionados con el subsuelo, las cimentaciones y obras de ingeniería civil en general; así también, en todas aquellas regiones sujetas a sismos destructores. El suelo es altamente sensible a la acción dinámica, sus propiedades dependen de varios factores físicos y de las condiciones ambientales con que se encuentran en la naturaleza.

Estas ondas producidas por vibraciones en la superficie del suelo mediante el efecto de cargas dinámicas modifican las propiedades del suelo de estáticas a dinámicas. El conocimiento de estas propiedades dinámicas nos ayuda a resolver estos problemas.(Zeevaert-Wiechers, 2000)

1. Cálculo de la celeridad de las ondas

a) De cortante o equivolumétricas por la distorsión angular.

b) Irrotacionales, de compresión y dilatación. c) Componente de la onda superficial de compresión y dilatación.

2. Períodos de vibración del suelo

3. Presiones, deformaciones unitarias y aceleraciones que se originan en el subsuelo en cada uno de los estratos que lo forman.

4. Presión sísmica en el agua de poro del suelo

5. Angulo de fricción interna durante la acción sísmica

6. Capacidad de carga sísmica

7. Falla de la superficie del suelo por tracción de las ondas

8. Falla de la superficie del suelo por la compresión de las ondas

9. Profundidad de grietas sísmicas en la superficie del suelo

10. Reducción de la fricción positiva y negativa en pilotes

11. Reducción de la capacidad de carga en pilotes apoyados de punta

12. Cálculo de la flexo-compresión sísmica en pilotes

13. Estabilidad de las obras de tierra y cimentaciones

14. Estabilidad de muros de retención, anclas y excavaciones en general

Según (Hurtado, 1993) la aplicación de propiedades dinámicas del suelo y estructuras de tierra ante problemas relacionados con las frecuentemente encontrados

1. Terremoto, vibración del suelo y propagación de las ondas a través de los suelos

2. Esfuerzos dinámicos, deformación y propiedades de resistencia de los suelos

3. Problema de presión dinámica de tierra

4. Problemas de capacidad de carga dinámica y diseño de cimientos superficiales

5. Problemas relacionados con la licuefacción del suelo

6. Diseño de cimentaciones para maquinaria y equipos vibratorios

7. Diseño de cimentaciones empotradas y pilotes bajo cargas dinámicas

8. Estabilidad de los terraplenes bajo carga sísmica.

1.2.1 Propiedades dinámicas de los suelos que inciden en las estructuras

Las propiedades de los suelos se ven influenciadas por la propagación de ondas y otros fenómenos de baja deformación que incluyen la rigidez del suelo, amortiguamiento, relación de Poisson y la densidad. De éstos, la rigidez y el amortiguamiento son los más importantes, los otros tienen menos influencia y tienden a caer dentro de rangos relativamente más estrechos. (Zeevaert-Wiechers, 2000)..

Refiere (Ing. Oscar Valerio Salas, 2011) que el esfuerzo cortante en los suelos es el aspecto más importante de la ingeniería geotécnica. La capacidad de soporte de cimentaciones superficiales como profundas, la estabilidad de los taludes y el diseño de muros o paredes de retención, llevan implícito el valor de la resistencia al esfuerzo cortante. Desde otro punto de vista, el diseño de los pavimentos, se ve influenciado de una forma indirecta por la resistencia al cortante de los suelos, ya sea en el análisis de la estabilidad de un talud o en el diseño de los muros de retención y de forma directa, a través del diseño de las fundaciones que soportan el pavimento, específicamente, en la subrasante. Por consecuencia, tanto las estructuras como los taludes deben ser estables y seguros frente a un colapso total, cuando éstos sean sometidos a una máxima aplicación de cargas. El esfuerzo cortante de un suelo se ha definido como la última o máxima resistencia que el suelo puede soportar. Específicamente, se ha expresado como la resistencia interna que ofrece la masa de suelo por área unitaria para resistir la falla al deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él.

La razón de amortiguamiento expresa la capacidad del suelo de disipar energía. Como Se ha demostrado que parte de la energía es disipada incluso a niveles muy bajos de deformación, por lo que el coeficiente de amortiguamiento nunca es cero. Al contrario de lo que ocurre con el módulo de corte, la razón de amortiguamiento aumenta cuando la deformación máxima aumenta. Esto significa que la respuesta del suelo es una función del nivel de sollicitación y que mientras mayor sea la tensión sollicitante más deformable será el suelo y mayor será su capacidad de amortiguamiento. (Cornier, 2017; Gordillo, 2011).

1.3. Métodos existentes para la estimación del comportamiento estructural según propiedades dinámicas del suelo

Según (Claudia M. González Blandón 2011) para evaluar la respuesta dinámica de un depósito de suelo y de sistemas suelo-estructura, es necesario conocer propiedades del material en cuestión, como el módulo de rigidez al esfuerzo cortante, G , y la relación de amortiguamiento, λ . Estas propiedades presentan comportamientos no lineales respecto a la deformación angular, γ . La obtención experimental de estas propiedades, frecuentemente, es afectada por la disponibilidad de equipos necesarios y los costos de las pruebas requeridas. Por tal razón, se recurre a procesos de modelación que requieren un mínimo de pruebas experimentales y facilitan los análisis.

Existen modelos (Seed e Idriss, 1970; Hardin y Drnevich, 1972; Ramberg-Osgood, 1970 (descrito por Anderson y Richart, 1976); Romo, 1995; Flores et al., 1999) que consideran, según el tipo de suelo, tendencias en los comportamientos de las propiedades dinámicas. La modelación de las propiedades dinámicas de un suelo, debe considerar una ley constitutiva que defina el comportamiento elástico (rango de pequeñas deformaciones) y elasto-plástico (rango de grandes deformaciones) de los suelos, tal como lo hace la conocida Regla de Masing (Ishihara, 1996).

El empleo del Modelo tipo Masing parte de la función normalizada $G/G_{\max}=f(\gamma)$; por consiguiente, el efecto del valor máximo del G no se considera. Aunque, es de notar que tanto el G_{\max} como el G_{\min} corresponden a valores frontera dentro del proceso de modelación. Estos valores no afectan a los demás parámetros empleados por el Modelo (figura). De manera similar al módulo de rigidez al cortante, los valores máximo y mínimo de la relación de amortiguamiento corresponden a valores frontera dentro del proceso de modelación.

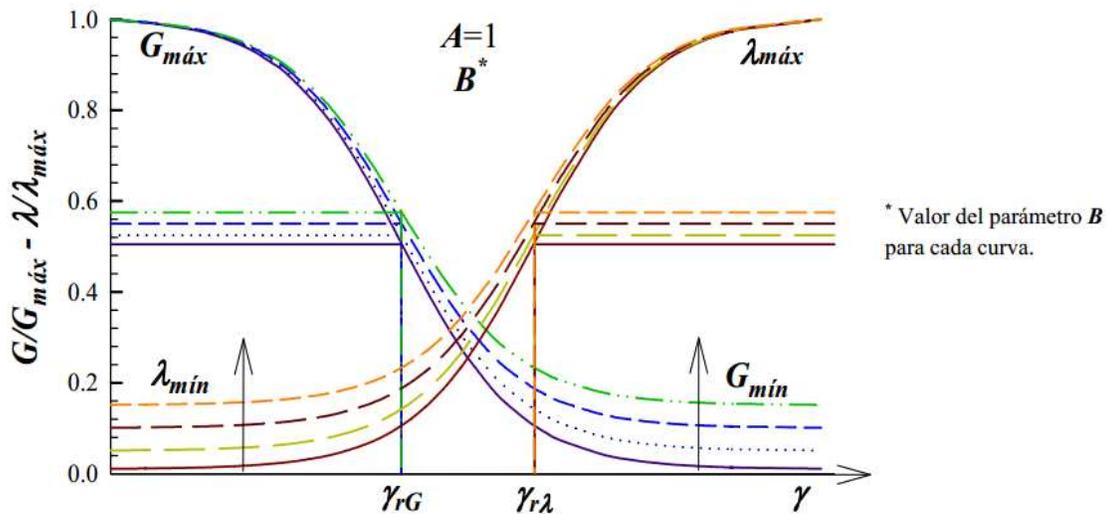


Fig.: 8. Variación de los valores mínimos de G y λ , en resultados teóricos. Fuente: (Claudia M. González Blandón 2011)

1.3.2 Métodos analíticos matemáticos

Según (Sanches, 2009) las ecuaciones empíricas para determinar (G) fueron propuestas por varios investigadores como Hardin y Black (1966), Ohsaki e Iwasaki (1973), Hardin y Drnevich (1972), Sheriff e Ishibashi (1976) a través de una gran variedad de trabajos realizados en campo y laboratorio, siendo algunas de ellas las siguientes:

a) Arenas

Aceptado por la mayoría de investigadores que el módulo de rigidez a cortante (G), en arenas está afectado por:

- ✓ La amplitud de la deformación de cortante, γ
- ✓ La presión confinante,
- ✓ La densidad y relación de vacíos.

1. Hardin y Black (1966) han propuesto para deformaciones cortantes inferiores a 10^{-4} las

expresiones siguientes:

- ✓ Para arenas con granos redondeados ($e < 0.8$):

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{697.35(2.17-e)^2}{(1+e)} (\sigma_0)^{0.5}$$

✓ Para arenas con granos angulosos:

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{326.14(2.97-e)^2}{(1+e)} (\sigma_0)^{0.5}$$

Dónde:

Gmáx: Módulo de rigidez a cortante en kg/cm².

e: Relación de vacíos, adimensional.

σ_0 = Esfuerzo octaédrico efectivo = $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$

2. Seed e Idriss (1970) proponen el cálculo del módulo de rigidez a cortante, mediante la ecuación:

$$G = 22k_2(\sigma_0)^{0.5}$$

3. Ohsaki e Iwasaki (1973) proponen una ecuación que expresa la relación entre el módulo (G) obtenido mediante el ensayo Cross-hole y la prueba de penetración estándar:

$$G_{m\acute{a}x} = 12,000 \cdot N^{0.8}$$

4. En 1972 Los investigadores Hardin y Drnevich propusieron la siguiente expresión:

$$G = \frac{G_{m\acute{a}x}}{1 + \frac{G_{m\acute{a}x}}{\tau_{m\acute{a}x}} \left(1 - 0.5 \cdot e^{-0.16 \cdot \frac{G_{m\acute{a}x}}{\tau_{m\acute{a}x}}}\right)}$$

Siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 1230 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \cdot \sigma_0^{0.5}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1 + k_0}{2} \cdot \sigma_v \cdot \sin \varphi + C \cos \varphi - \frac{1 - k_0}{2} \sigma_v^{2 \cdot 0.5}$$

Donde tiene definido sus parámetros de la siguiente forma:

K_0 = Coeficiente de empuje de tierras en reposo, adimensional.

Φ, C = Angulo de fricción interna efectivo y cohesión real de la arena, radianes.

σ_0 = Presión efectiva confinante del suelo, Kg/m².

σ_v = Presión efectiva vertical del suelo, Kg/m².

$G_{m\acute{a}x}$ = Módulo de rigidez para niveles de deformación de casi cero, Kg/m².

$\eta_{m\acute{a}x}$ = Resistencia de pruebas de cortante estático (dadas en 1972 como resultado de su investigación).

b) Arcillas

El valor de G , debe ser obtenido para diferentes esfuerzos confinantes volumétricos. En este caso de las arcillas, el suelo debe de consolidarse, es decir, dejar que el exceso de presión del agua se disipe, induciéndose entonces la vibración libre, con la cual se puede medir la respuesta elástica del suelo.

Hardin y Drnevich (1972) proponen para el caso de arcillas:

$$G = \frac{G_{m\acute{a}x}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_R}}$$

Siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 326 \frac{2.973 - e^2}{1 + e} OCR K(\sigma_0)^{0.5}$$

Donde:

G = Módulo de rigidez a cortante en kg/cm².

OCR = Relación de pre consolidación.

1) Las ecuaciones empíricas para determinar el amortiguamiento (ξ), fueron propuestas por varios investigadores a través de una serie de trabajos realizados. Hardin y Drnevich (1972) proponen las siguientes expresiones:

a) Para arenas:

$$\xi_{m\acute{a}x} = D - 1.5 \log N$$

b) Para arcillas saturadas

$$\xi_{m\acute{a}x} = 31 - 3 + 0.3f (\sigma m)^{0.5} + 1.5f^{0.5} - 1.5(\log N)$$

En donde:

ξ_{max} = Fracción del amortiguamiento crítico, %.

N = Número de ciclos, adimensional.

f = Frecuencia de la carga aplicada, Hz.

D = En arenas limpias se especifican valores de 33 y 28 para estados secos y saturados respectivamente.

Existen diversas herramientas para analizar el modelo matemático de las distintas estructuras diseñadas. En la actualidad se cuenta con varios programas computacionales para mecánica de suelos basados en el método de los elementos finitos. Algunos de ellos son: Robot, NOVOSPT, SAP 2000, Geo5, Midas GTS NX y GeoStru.

La elección del programa depende de las aptitudes del mismo para modelar el comportamiento de los materiales. Para esto se debe tener en cuenta la confiabilidad de los datos aportados por el software según la respuesta conocida de datos experimentales, las características de las librerías de herramientas para lograr modelar las características fuerza-deformación de los materiales lo más similar posible a la realidad, así como las facilidades del entorno gráfico con el usuario.

Por estas razones se define como programa computacional el Midas GTS NX en su versión 2019 para determinar los modelos cuantitativos avanzados para obtener la acción de las propiedades dinámicas del suelo en las estructuras. Esta elección se debe a que el programa tiene un entorno gráfico amigable y tiene como obtener propiedades dinámicas además de las propiedades estáticas, lo que respalda la confiabilidad de los resultados extraídos del software.

Midas GTS-NX es un programa de cálculo por elementos finitos orientado al análisis de diversos problemas en Geotecnia mediante la realización de modelos 2D y 3D: Túneles, Muros, Cimentaciones, etc. Tiene herramientas eficaces que facilitan las tareas necesarias para la elaboración y análisis de modelos, siendo de especial interés aquellas que permiten la inclusión de elementos particulares de la Geotecnia, modelos geotécnicos comunes, como son los análisis de estabilidad de taludes, falsos túneles, análisis dinámicos y análisis acoplados de tensiones y filtración. Su facilidad de uso y la complejidad de los modelos de estudio actuales, que requieren un alto nivel de definición en 3D y opciones de cálculo avanzadas, hace de GTS NX la herramienta perfecta para los ingenieros.

Conclusiones del capítulo:

La búsqueda de información permitió definir los conceptos de las propiedades dinámicas del suelo, factores que modifican dichas propiedades, los diferentes métodos para la obtención de los mismos como los métodos geofísicos, los ensayos de laboratorio, los ensayos de campo, métodos empíricos y matemáticos. Se determinaron cuáles son las principales propiedades dinámicas que tienen incidencia en las estructuras. Además, se definió el uso y aplicación de las cargas dinámicas del suelo. Según lo expuesto anteriormente tenemos que exponer que la literatura revisada muestra que existen disimiles metodologías para obtener las propiedades dinámicas del suelo y saber cuál es su incidencia en las estructuras. los programas más empleados en la modelación del suelo y la estructura, se basan en métodos numéricos y de elementos finitos, tales como Robot, NOVOSPT, SAP 2000, Geo5, Midas GTS NX y GeoStru. En este estudio le daremos uso al Midas GTS NX por sus características para simular las cargas dinámicas de suelo con espectros amortiguados y la acción de dichas propiedades en la estructura.

Seremos capaces de obtener los parámetros que tienen incidencia en las estructuras por parte de las propiedades dinámicas de los suelos

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE EL SOFTWARE MIDAS

Introducción a capítulo

El desarrollo del siguiente capítulo va dirigido a la evaluación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en la estructura del puente ferroviario Siboney empleando el software MIDAS GTS NX. Para ello se tienen en cuenta las características del puente proyectado, así como las condiciones geológicas e hidrogeológicas y las propiedades geotécnicas de la zona donde se desplanta la estructura. Se consideran además las cargas y combinaciones necesarias incluyendo la carga dinámica a través del empleo del espectro de diseño, así como el empuje del suelo y del agua sobre las pilas. Se describe la forma de obtención del espectro de diseño considerando el efecto de sitio tal como dispone la NC: 46-2017. El modelo realizado se fundamenta en el comportamiento de la estructura bajo la acción de las propiedades dinámicas del suelo. Para considerar dicha incidencia se basa la investigación en la obtención de dichas propiedades mediante el ensayo Triaxial Cíclico llevado al software.

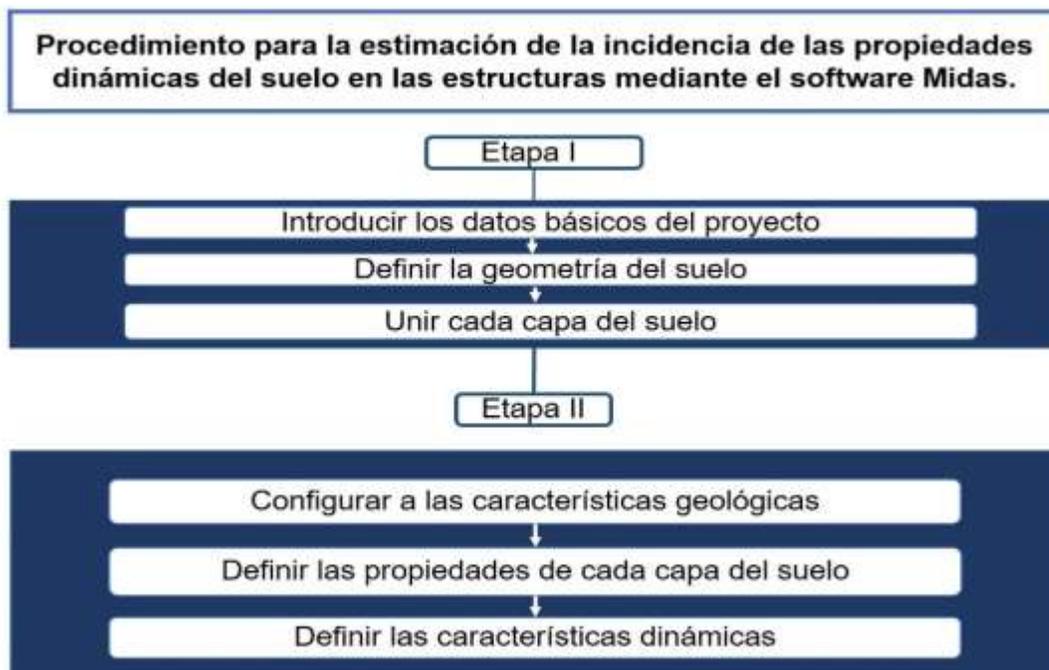
Se conjugan los modelos de comportamiento del suelo con los métodos matemáticos empleados en la solución del problema que ejerce las propiedades dinámicas de los suelos en las estructuras ante cargas sísmicas, a partir del empleo del software Midas GTS que estima los efectos originados en la estructura producto de las propiedades dinámicas de los suelos ante las sollicitaciones sísmicas.

2.1 Concepciones metodológicas para la elaboración del procedimiento

El procedimiento para la estimación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo a partir del software Midas GTS NX, parte de los tutoriales que ofrece la página de diseñador del programa (Martinez, 2019). Se toma como base las investigaciones realizadas por los autores (Estrada, 2021); (Moreno, 2020); (Corbacho, 2019); que plantearon procedimientos similares para el trabajo con software con fines geotécnicos.

Se estudiaron las potencialidades de diversas herramientas computacionales y ayudas de cálculo para el análisis con propiedades dinámicas, no todas contemplan el análisis con estas propiedades. El software, siendo un programa especializado para el análisis geotécnico, brinda bondades como: fácil interacción con el programa, trae un amplio e integrador paquete, permite la comprobación de los requisitos del diseño por el MEL y tiene implícito diferentes métodos de cálculo dinámico y estático, lineal y no lineal.

2.2 Diseño del procedimiento para la estimación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en las estructuras mediante el software Midas.



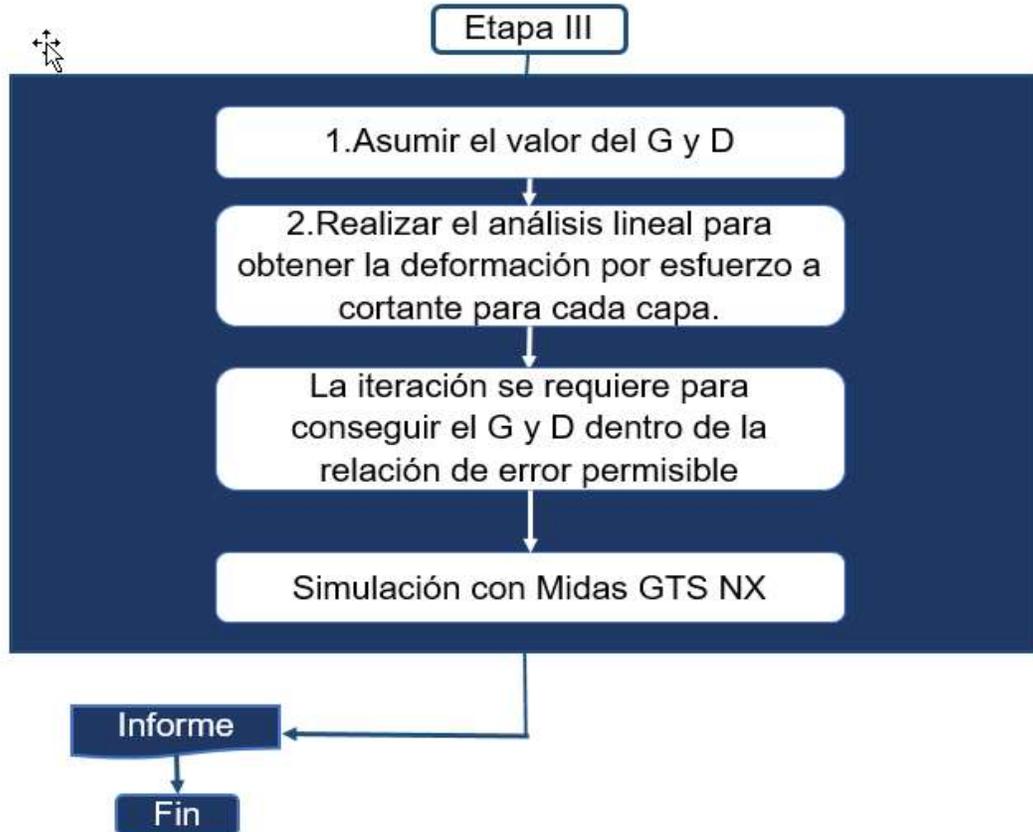


Fig: 9. Procedimiento para la estimación de la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en las estructuras mediante el software Midas GTS NX. Fuente: Creación propia

Para estimar la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en las estructuras se diseñó un procedimiento empleando el método de elementos finitos mediante el software MIDAS GTS.

Etapa 1: Diseño de la geometría del suelo

Etapa 2: Insertar las propiedades geotécnicas de cada capa del suelo y crear las condiciones para correr el análisis

Etapa 3: Modelación de la interacción de las propiedades dinámicas con las estructuras a través del método de análisis equivalente en 2d. Comprobación de resultados.

2.2.1 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa I)

Una vez cargado el programa se definen las unidades, propiedades iniciales como la fuerza de gravedad y la temperatura del suelo en que se quiere trabajar, esta opción se encuentra en la esquina superior izquierda del área de trabajo. Entonces se procede a modelar la estructura deseada.



Fig.: 10. Herramienta para crear un nuevo proyecto Fuente: Creación Propia

Luego de que se introducen los datos iniciales se procede a diseñar la geometría del suelo. En la opción de *Geometry* nos permite modelar la geometría del suelo de disimiles formas; partiendo desde una superficie en dos dimensiones hasta insertar todas las propiedades del suelo y de cada cala desde un *Excel* con la herramienta *Bedding Plane*



Fig.: 11. Herramienta *Bedding Plane* para crear la geometría de las capas del suelo Fuente: Creación Propia

Inserta en el *Excel* todas las profundidades de cada cala y la ubicación de cada una de ellas.

	A	B	C	D	E	F	G
1	[m]						
2		sondaje	bb1	bb2	bb3	bb4	bb5
3		ubicación	201, 259, 130	250, 117, 110	320, 280, 110	395,279,95	531,317,85
4							
5	no.	plano	profundidad				
6	1	plano 0	1.6	1.6	1.2	1.2	1.2
7	2	plano 1	3	3	3	3	2.2
8	3	plano 2	5	5	4	15	3
9	4	plano 2a	5.5	5.5	5.4	5.4	9.5
10	5	plano 3	8.5	8.5	7.5	7.5	12.5
11	6	plano 4	20	20.5	12.5	9.2	19
12	7	plano 5	0	23.5	20	20	20

Fig.: 12. Tabla de Excel para insertar datos de las propiedades geométricas del suelo
Fuente: Creación Propia

Luego de insertada toda esta información se procede a hacer un sólido uniendo cada capa con la herramienta *Box*.



Fig.: 13. Herramienta *Box* para crear sólido. Fuente: Creación Propia

Usar la herramienta *Divide Solid* para terminar la geometría del suelo y unir el sólido con cada superficie.



Fig.: 14. Herramienta *Divide Solid*. Fuente: Creación Propia

Para terminar la geometría y unir cada capa del suelo se usa la *Mesh* para generar el mallado en 3d usando la herramienta *Generate 3d*.

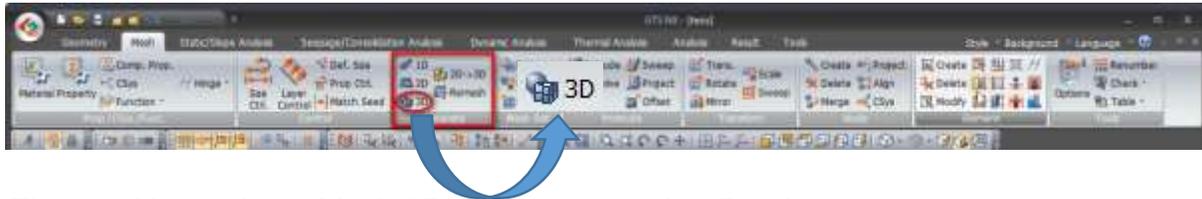


Fig.: 14. Herramienta Mesh 3D. Fuente: Creación Propia

En la opción Tools con la herramienta Terrain Geometry Maker Su le incorpora la topografía importando desde un Plano de Civil 3d



Fig.: 15. Herramienta Terrain Geometry Maker. Fuente: Creación Propia

2.2.2 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa II)

Primero se definen las propiedades de las diferentes capas de suelo que se desea modelar mediante la herramienta *Material*. Para ello se encuentra la opción *Mesh*. Existe una gran variedad de modelos constitutivos, y dependiendo del que se escoja, hay diversas opciones de los parámetros a definir. También se pueden de importar las características desde Excel. Además, se puede usar la base de datos que incluye el programa con varios tipos de suelo predeterminados.



Fig.: 16. Herramienta Material. Fuente: Creación Propia

A través de la opción *Property*, se asignan los materiales creados a un elemento específico. Como la estructura ya está diseñada, se crean dos propiedades, una en 2D y una en 3D, que serán aplicadas al mallado del suelo.



Fig.: 16. Herramienta *Property*. Fuente: Creación Propia

2.2.3 Esquema de trabajo modelado del suelo en Midas GTS (Etapa III)

Luego de creadas las condiciones geométricas y geotécnicas del suelo se configuran el análisis a correr. En el menú análisis se dan las características generales para el análisis equivalente en 2d



Fig.: 17. Herramienta *Alalisis General*. Fuente: Creación Propia

Mediante la herramienta *General* se le configura el tiempo de muestra que va a tomar el análisis para calcular. Se configura todas las propiedades dinámicas que va a tomar dicho análisis y los resultados deseados a mostrar como son las solicitaciones de la estructura y el suelo.

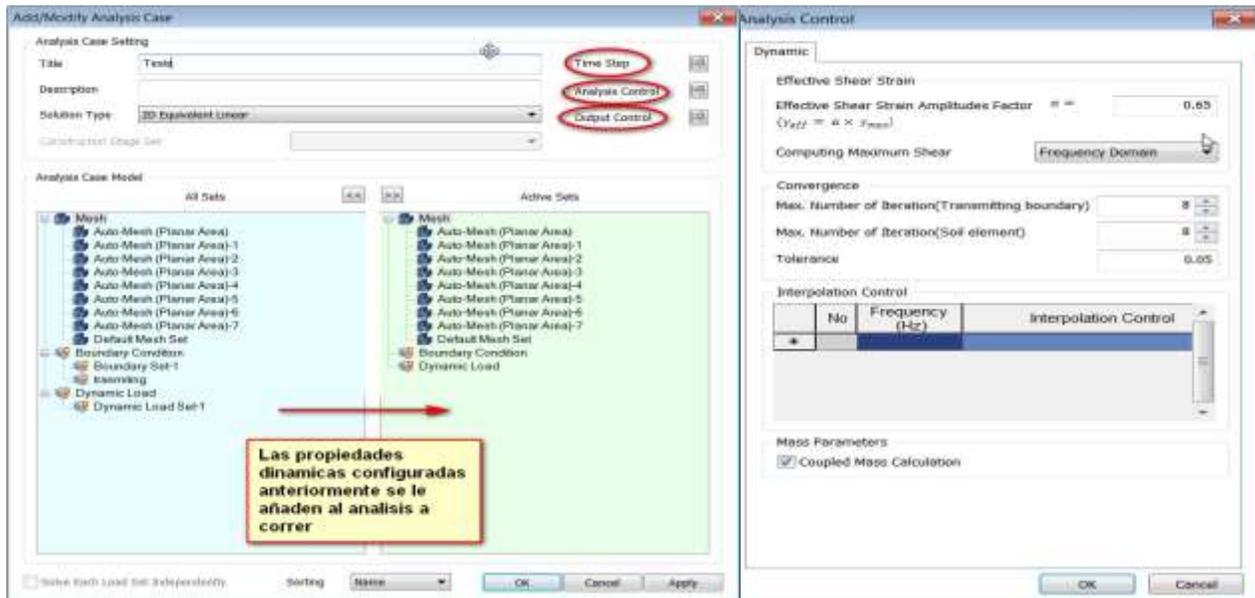


Fig.: 17. Procedimiento a seguir para insertar las propiedades del análisis equivalente en 2d. Fuente: Creación Propia

2.3. Aplicación del procedimiento al caso de estudio puente sobre Rio Cabaña, Moa.

2.3.1 Descripción general del caso de estudio

El puente sobre el río Cabañas está compuesto por tres luces de hormigón armado de 16 m cada una. La cimentación consiste en pilotes perforados, $\varnothing 600\text{mm}$, colocados “in situ”, los que se apoyan en punta en un estrato rocoso que se encuentra aproximadamente a unos 20 m de profundidad. Estos fungen como columnas hasta alcanzar el nivel inferior del cabezal que se construye “in situ”.

Encima del mismo se apoyan las vigas de la superestructura con sus respectivos aparatos de apoyo que consisten en planchas de neopreno. El tablero está compuesto por losas prefabricadas que se apoyan en las vigas y que fungen como cofre para la

fundición superior del tablero que se encarga de unir todos estos elementos logrando un vínculo entre ellos y que los obliga a trabajar como un emparrillado, garantizando la rigidez de la superestructura.

El puente no tiene juntas en el tablero, o sea, este es continuo a pesar que las vigas sean isostáticas. Las columnas del pretil se construyen “in situ” y las barandas son prefabricadas. Los estribos son cerrados y se construyen con hormigón armado entre los pilotes, el refuerzo de los mismos se suelda a las camisas de los pilotes, y el puente cuenta con aletones para la contención del material de relleno en los estribos (Ver plano del puente Anexo 1).

El área objeto de estudio se encuentra ubicada aguas arriba y próxima al antiguo puente colapsado sobre el río Cabañas, en la ciudad cabecera del municipio Moa. En el informe de la (ENIA, 2017) fue determinado el corte ingeniero – geológico hasta una profundidad de 30.00 m (Ver figura 2.15). A partir de los resultados obtenidos se pudo conocer que el mismo está conformado por 5 capas, las cuales se describen en la Tabla 2.1. Los niveles freáticos oscilan entre 4.80 y 5.00 m (Ver perfil ingeniero – geológico, Anexo 2).



Fig.: 18. Ubicación de las calas. Fuente: Creación Propia

El informe aportado por la ENIA brinda una descripción de la zona de estudio desde el punto de vista geomorfológico donde se refleja que la misma se encuentra sobre un relieve relativamente llano con pequeñas diferencias de cotas, las mayores hacia el norte

del área, la que ocupa parte de la terraza aluvial del río Cabañas, donde se distribuyen espesores de suelos aluviales de diferente granulometría.

La carga sísmica se considera a partir del espectro de respuesta. El mismo se construye empleando lo establecido en la NC 46: 2017 y en base al informe ingeniero geológico desarrollado por la ENIA en 2017, para la proyección del puente objeto de estudio. El mismo arrojó la existencia de 5 estratos, las capas 1, 2, 2a, 3, 4 y 5 (ver propiedades en anexo 6).

Estos elementos ingeniero geológicos se corresponden genéticamente con suelos aluviales y eluviales los que presentan en cierta medida propiedades desfavorables para ser utilizados como base de cimentación, por la presencia de suelos arenosos y arcillosos de baja compacidad y consistencia, y la presencia del nivel del agua subterránea muy cercana a la superficie, los mismos oscilan entre 4.8m y 1.5m de profundidad. Estas capas conforman un estrato arcilloso de potencia mayor de tres metros y con un índice plástico mayor que 20% (IP>20%) por lo que clasifica como tipo de perfil de suelo E, según la tabla 4.8 de la NC: 46-2017. Se realiza además el cálculo de la velocidad media de onda de corte Vs estipulado en el epígrafe 4.4.3.1 de la misma norma, para ello se tienen en cuenta las correlaciones del (Eurocódigo - 8) en la tabla 2.8, la tabla 31 de (Geostuff, 2002) y las propiedades de los diferentes estratos, los resultados se ilustran a continuación:

Suelos	Relleno	S ₁	S ₂	S _{2a}	S ₃	S ₄	S ₅
Descripción	Suelo laterítico re depositado, de composición areno arcillosa y/o limosa.	Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas.	Arcilla de alta plasticidad con arena.	Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas.	Arcilla de baja plasticidad con diferentes contenidos de arena.	Arena con contenido variable de limo y grava.	Serpentinita
Propiedades							
Peso específico del suelo (Gs) (kN/m³)	25	27,1	27,2	27,3	27,1	26,9	27

Humedad natural (ω) (%)	32	31,2	34,8	25,6	37,8	23,7	1,2
Peso específico húmedo (γ_i) (kN/m³)		18,6	18,7	18,5	18,5		22,3
Peso específico seco (γ_d) (kN/m³)		13,9	13,1	13,6	13,3		22
Índice de poros (e)	0,95	0,96	1	1	1,03	1	1
Saturación (S) (%)		88	89	70	99		14
Ángulo de fricción interna (ϕ) (°)	5	5	10	6	21	35	
Cohesión (C) (kPa)	15	15	43	11	19	10	
Módulo de deformación (E) (kPa)	5800	5716	9423	6229	8447	5000	2346
Coefficiente de poisson (μ)	0,35	0,3	0,38	0,3	0,41	0,3	0,1
Peso específico saturado (γ_{sat}) (kN/m³)	10,3	10,31	10,28	10,37	10,25	10,41	17,78

Tabla 3 Propiedades de los estratos. Fuente. Creación Propia

Estratos	Nsp	Cu	Vs
capa 1	6	15	100
capa 2	12	43	180
capa 2a	-	11	120
capa 3	7	19	150
capa 4	32	10	300
capa 5	-	-	600

Tabla4. Resultados de la velocidad media de onda de corte Vs. Fuente: (Nuñez, 2019)

Para realizar el analisis lineal equivalente en 2d se parte de registros o acelerogramas de sismos reales, preferentemente de la zona de estudio. Al no tener registros de los mismos, se emplea el programa SeismoMatch para reajustarlos. Este procedimiento se realiza incertando los acelerogramas a escalar con el

espectro de diseño del municipio de Moa ya definido. Luego de procesada la información, se escogen aquellos que convergen, en este caso fueron los acelerogramas siguientes: Friuli, Hollister, Kocaeli, Loma Prieta y Northridge. (Nuñez, 2019).

Para el análisis lineal equivalente en 2d en MIDAS GTS-NX, se necesita de las propiedades dinámicas del suelo como el módulo de corte G y amortiguamiento D para cada una de las capas, donde dichos parámetros se utilizan para representar el comportamiento dinámico del suelo, dado que a medida que se colocan más ciclos de una carga sísmica sobre el suelo se presentan mayores deformaciones.

Los parámetros para caracterizar el comportamiento del suelo ante cargas sísmicas son el módulo de corte inicial (G_{max}), las curvas de módulo secante vs deformación unitaria de corte (G/G_{max} vs γ) y las curvas de razón de amortiguamiento vs deformación unitaria de corte (D vs γ). Es por ello que se determinan las curvas dinámicas de los materiales que conforma el perfil estratigráfico, con el fin de evaluar el comportamiento no lineal del suelo para cada sismo, mediante un estudio de respuesta dinámica.

En el estudio de respuesta dinámica, se definen las propiedades dinámicas de las capas del suelo como: el módulo de corte (G) y amortiguamiento (D), para cada uno de los sismos, donde dichos parámetros se requieren para la modelación en 3D. El análisis de respuesta dinámica, se llevó a cabo en el programa MIDAS GTS-NX, y en primera instancia se realizó un análisis 1D “Campo Libre Unidimensional”, el cual se efectúa para

ver cómo se afecta el suelo ante el sismo y encontrar el factor de escala para el análisis lineal equivalente 2D.

Para la modelación del suelo donde se encuentra ubicado el Puente sobre en rio cabaña en Moa se utiliza el siguiente procedimiento de análisis equivalente en 2d. Este método demuestra como la deformación de corte efectivo aumenta, el módulo de cortante disminuye y el factor de amortiguamiento aumenta.

1. Asumir el valor del módulo de cortante y el factor de amortiguamiento para cada capa del suelo.
2. Realizar el análisis lineal para obtener la deformación por esfuerzo a cortante para cada capa basada en los valores iniciales tomados del módulo de cortante y el factor de amortiguamiento.
3. Encontrar la deformación de cortante efectiva usando la relación: $Y_{efe} = R_y * Y_{max}$ donde $R_y = (M - 1)/10$ o 0,65, M = intensidad sísmica.
4. Encuentra la deformación de corte y coeficiente de amortiguamiento actualizados que corresponden a la deformación por esfuerzo de cortante efectiva ($Y_{efe} = R_y * Y_{max}$) y realizar un análisis lineal utilizando los parámetros actualizados.
5. La iteración se requiere para conseguir el módulo de cortante y el factor de amortiguamiento dentro de la relación de error permisible.

También se utilizaron Métodos matemáticos pertenecientes al método de campo SPT para encontrar algunas propiedades que son utilizadas en el software.

Relación de Poisson.

$$\mu = \frac{1 - \sin \phi}{2 - \sin \phi}$$

Módulo de Elasticidad.

$$E(Mpa) = 6.19 * N_{spt}^{1.03}$$

Cohesión(C).

$$C = 29 * (N_{60})^{0.72} Kpa$$

Velocidad de Onda V_s

$$V_s = 98.69 * N_{spt}^{0.321}$$

Módulo de Corte G_s .

$$G_s = 120 * N_{60}^{0.8}$$

2.3.2 Procedimiento de análisis equivalente en 2d.

Ahora bien, en la elaboración de este análisis, primero se crea la geometría del perfil del suelo, y se ingresan las propiedades del suelo mediante la opción de MIDAS GTS-NX (2D Equivalente), aquí se ingresa el módulo de corte (G_0), la relación de Poisson μ , el peso unitario (γ) y finalmente las curvas de degradación del módulo y amortiguamiento de cada una de las capas, como se muestra en la Figura 22.

Ingresar los materiales a utilizar y definir las propiedades de cada capa y además las curvas de degradación del módulo de cortante y amortiguamiento en cada una de las capas. Figura 19

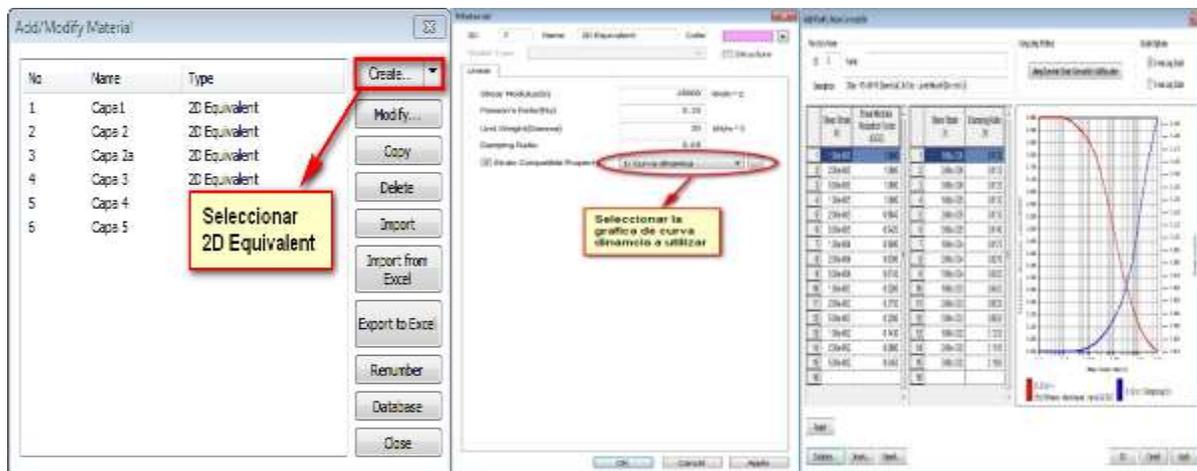


Fig.: 19. Pasos para añadir propiedades dinámicas al suelo. Fuente: Creación Propia

Seguidamente, se procede a realizar el mallado del suelo en 2D y se definen las condiciones de frontera, para las cuales se usaron las fronteras tipo transmiting que son de tipo transmitentes o amortiguadoras, este tipo de fronteras permite que la onda

sísmica pase libremente y evita el efecto rebote de la onda en el suelo, como se muestra en la figura 20.

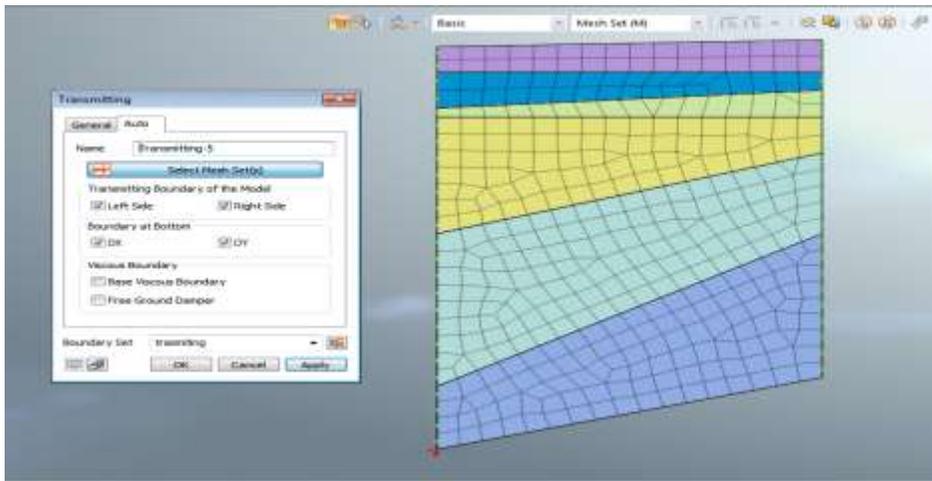


Fig.: 20. Herramienta Trasmiting. Fuente: Creación Propia

Posteriormente, se define la función de aceleración, en este paso se debe tener en cuenta la aceleración en roca del análisis en 1D, la cual se divide en el valor de la gravedad donde dicho valor se usará como factor de escala para el análisis en 2D, como se presenta en la Figura 21.

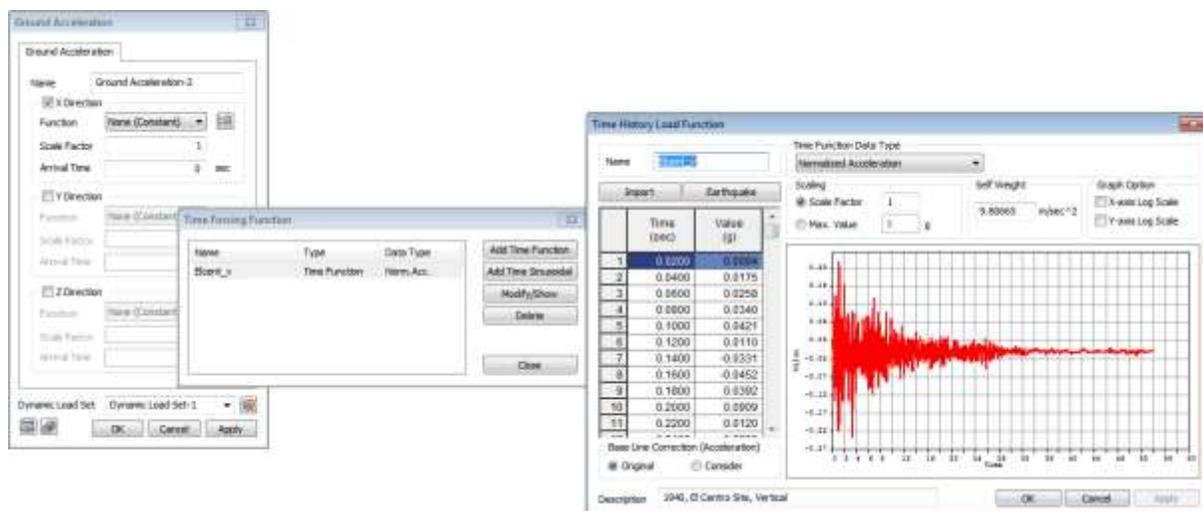


Fig.: 21. Añadir espectro de aceleración de sismo. Fuente: Creación Propia

Finalmente, se define el caso de análisis y se corre el programa, de aquí se verifica que el valor de aceleración en superficie del análisis en 2D sea similar al valor del análisis en 1D y se toma la tensión máxima de corte (γ_{max}), del análisis en 2D, con el fin de ingresar este valor a las curvas dinámicas de cada capa y tomar los correspondientes valores de corte (G) y amortiguamiento (D), de cada una de las capas, como se muestra en la Figura 22.

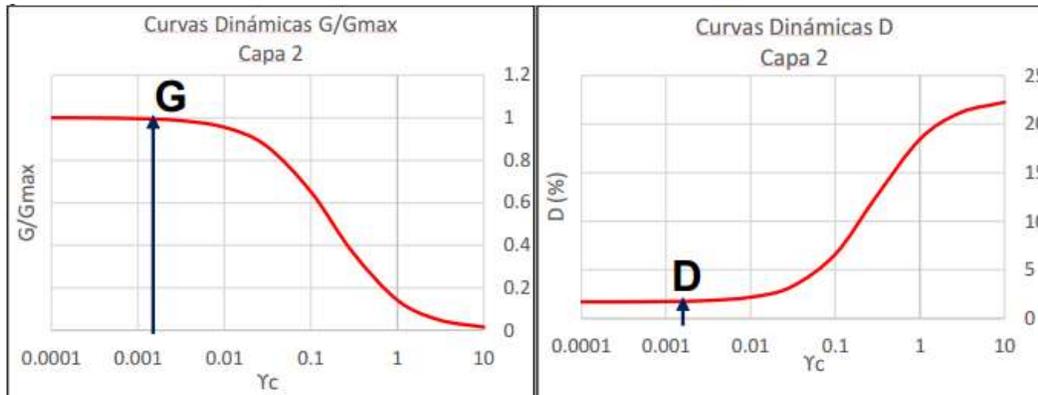


Fig.: 22. Curvas de módulo de corte y factor de amortiguamiento. Fuente: Creación Propia

Se toma como referencia los acelerogramas realizados por Según (Nuñez, 2019) para obtener el análisis dinámico se parte de registros o acelerogramas de sismos reales, preferentemente de la zona de estudio. Al no tener registros de los mismos, se emplea el programa SeismoMatch para reajustarlos. Este procedimiento se realiza incertando los acelerogramas a escalar con el espectro de diseño del municipio de Moa ya definido. Luego de procesada la información, se escogen aquellos que convergen, en este caso fueron los acelerogramas siguientes: Friuli, Hollister, Kocaeli, Loma Prieta y Northridge.

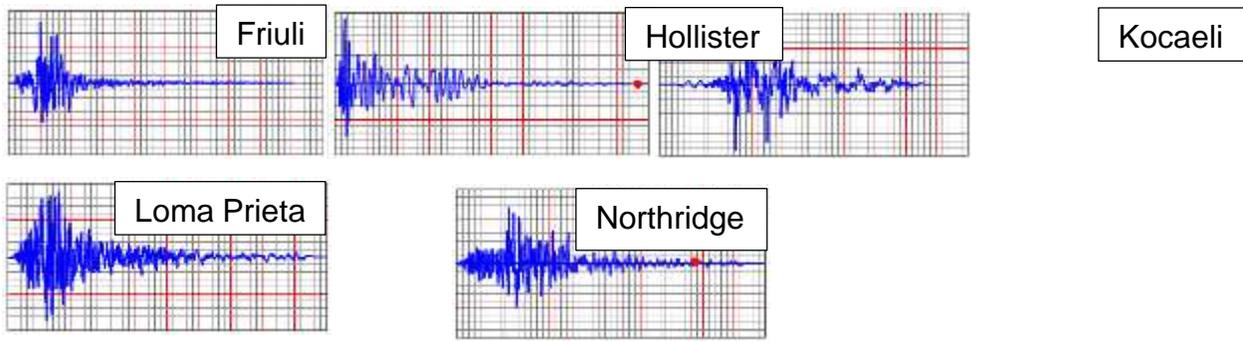


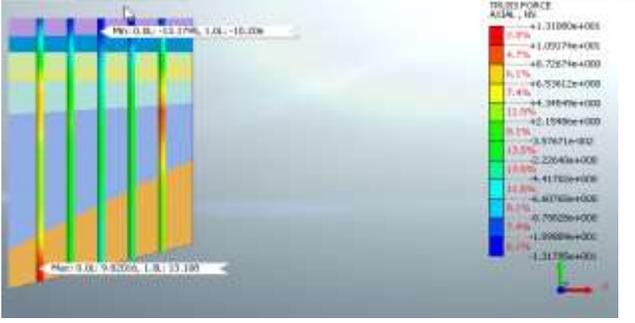
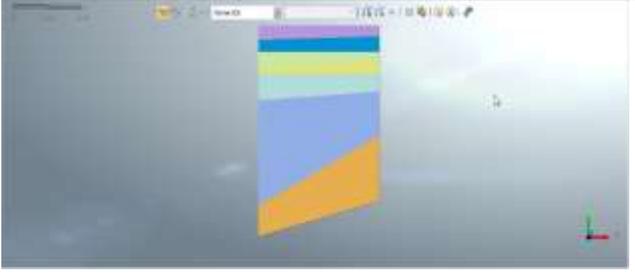
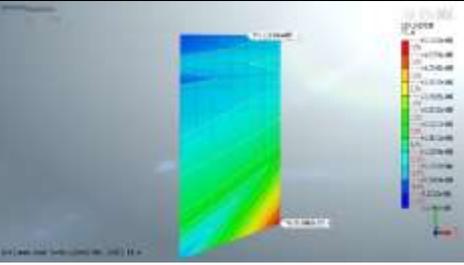
Figura 23. Acelerogramas empleados en el análisis dinámico no lineal. Fuente: (Nuñez, 2019)

2.3.3 Modelo del caso de estudio con el software.

Siguiendo el procedimiento realizado en el epígrafe 2.1 se realiza el modelo del objeto de estudio y considerando a las características geotécnicas y del elemento. El procedimiento este dividido por etapas según se muestra en el epígrafe 2.1.

Tabla 5. Progreso de cada Etapa del Procedimiento y Resultados. Fuente creación Propia.

Etapa	Modelo
1- Características geométricas	

<p>2- Aplicar las propiedades de los suelos a cada capa y mallar cada capa y pilote para que se unan para el análisis a correr.</p>	 
<p>3- Aplicación del análisis 2d equivalente y verificación de resultados</p>	 <p>Propiedades dinámicas</p>  <p>Propiedades Estaticas</p>

2.3.4 Resultados y análisis de los resultados.

Luego de realizar el análisis aplicando solo propiedades dinámicas se obtienen diferentes sollicitaciones como fuerza axial en los pilotes, tensión cortante, desplazamiento, velocidad y aceleración.

En cuanto al esfuerzo axial se observa que ante cargas dinámicas varían a medida que aumenta la profundidad, igual ocurre al considerar las propiedades estáticas del suelo con un aumento de 71% referente al de las propiedades estáticas. **Figura**



Gráfico 1 Axial máximo espectro en “X”. Fuente: elaboración propia

En cuanto al esfuerzo cortante se observa que ante cargas dinámicas aumentan los valores a medida que aumenta la profundidad, igual ocurre al considerar las propiedades estáticas del suelo con un aumento de 36% referente al de las propiedades estáticas.



Gráfico 2 Cortante máximo espectro en “X”. fuente: elaboración propia

Como resultados también se muestran en el programa las reacciones sobre el suelo de las propiedades dinámicas. Estas solicitudes son la velocidad, el desplazamiento del suelo y la aceleración.

En cuanto al desplazamiento del suelo se observa que ante cargas dinámicas aumentan los valores a medida que aumenta la profundidad, igual ocurre al considerar las

propiedades estáticas del suelo. Con propiedades dinámicas se alcanza un 96% de desplazamiento mayor que referente al modelo con propiedades estáticas.



Gráfico 3 Desplazamiento máximo espectro en “X”. Fuente: elaboración propia

En cuanto a la velocidad del suelo se observa que ante cargas dinámicas aumentan los valores a medida que aumenta la profundidad. También al variar el tiempo y el tipo de estrato en el que transcurren las ondas del sismo se muestra las propiedades dinámicas del suelo con un aumento de 98% referente al de las propiedades estáticas.



Gráfico 4 velocidad máxima espectro en “X”. Fuente: elaboración propia

En cuanto a la aceleración del suelo se observa que ante cargas dinámicas aumentan los valores a medida que aumenta la profundidad, igual ocurre al considerar las

propiedades estáticas del suelo con un aumento de 98% referente al de las propiedades estáticas.



Gráfico 5 Aceleración máxima espectro en “X”. Fuente: elaboración propia

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se realizó un análisis de la influencia de las propiedades dinámicas del suelo en puentes de hormigón, aplicado al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas. Se pudo arribar a las siguientes conclusiones:

1. La aplicación del procedimiento permitió realizar la modelación del sistema suelo cimentación, mediante el uso de Midas GTS NX.
2. En el análisis dinámico se demostró que todas las solicitaciones generadas por el programa son mayores cuando se añaden las propiedades dinámicas del suelo en gran medida.
3. El software al añadir las propiedades dinámicas de cada capa nos permite observar la variación las solicitaciones de cada metro de profundidad.
4. Nos demuestra la diferencia de los resultados utilizando propiedades estáticas son menores que otorgándole propiedades dinámicas.
5. Se demostró la capacidad del programa para modelar cualquier tipo de suelo ya sea en 1D hasta 3D.

CONCLUSIONES GENERALES

La realización de la presente investigación reveló una serie de aspectos que ratificaron el cumplimiento del objetivo general planteado en función del problema profesional. Al respecto se realizaron consideraciones a modo de conclusiones:

1. El análisis bibliográfico de la literatura especializada confirmó la existencia de una base teórica, metodológica y práctica sobre incidencia de las propiedades dinámicas y su influencia en estructuras y que en la mayoría de los enfoques estudiados solo tratan el uso de dichas propiedades para la construcción de túneles y estructuras de contención.
2. El procedimiento para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo y su acción en las estructuras, constituye una herramienta metodológica que garantiza un diseño más favorable, ya que permite el análisis desde el punto de vista de un modelo real.
3. La modelación de los cimientos del puente sobre el río Cabañas para la observar la reacción de las propiedades dinámicas del suelo en la estructura del puente, con el uso del software Midas GTS NX, permitió analizar la incidencia de este fenómeno en condiciones más reales.
4. Al evaluar el comportamiento del puente ante la respuesta del Espectro de Diseño, considerando propiedades dinámicas del suelo y de propiedades estáticas, se demuestra un incremento en las solicitaciones al aplicar la primera variante.
5. En cuanto a las solicitaciones generadas en el suelo (velocidad, desplazamiento y aceleración), se observa un incremento significativo cuando se emplea el uso de las propiedades dinámicas lo que demuestra la veracidad de la hipótesis planteada.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de la investigación y de las conclusiones declaradas anteriormente, conviene realizar las recomendaciones siguientes:

1. A las empresas de proyecto: incorporar el procedimiento para el diseño sismo resistente de puentes y estructuras que así lo requieran.
2. Continuar profundizando la incidencia de las propiedades dinámicas del suelo en los diferentes tipos de estructuras.
3. Incluir en el análisis el comportamiento de la estructura utilizando en análisis en 3D.

BIBLIOGRAFÍA.

1. *Arias, D. C. E. D. A. (2017). ESTUDIO DE LA SISMICIDAD DE LA LOCALIDAD DE MOA PARA LA CONSTRUCCION DE PUENTE DE EMPRESA DEL NIQUEL "PEDRO SOTTO ALBA-MOA NIQUEL S.A.". CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES SISMOLOGICAS*
2. *MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE, 26.*
3. *Claudia M. González Blandón , M. P. R. O. (2011). ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS. Revista de Ingeniería Sísmica, 84, 1-23.*
4. *Cornier, L. F. C. (2017). PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL*
5. *SUELO ANTE FUERZAS DINÁMICAS. CASO DE ESTUDIO: EMCOMED UNIVERSIDAD DE ORIENTE].*
6. *Fernández Sola, L. R. (2013). Influencia de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Retrieved mayo 22, from <http://goo.gl/Xd2M7Y>*
7. *Gordillo, N. O. G. (2011). APLICACIONES DE LA DINÁMICA*
8. *DE SUELOS ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA*
9. *UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS].*
10. *Hurtado, D. I. J. E. A. (1993). Dinamica de suelos Universidad nacional de Inenieria]. Peru.*

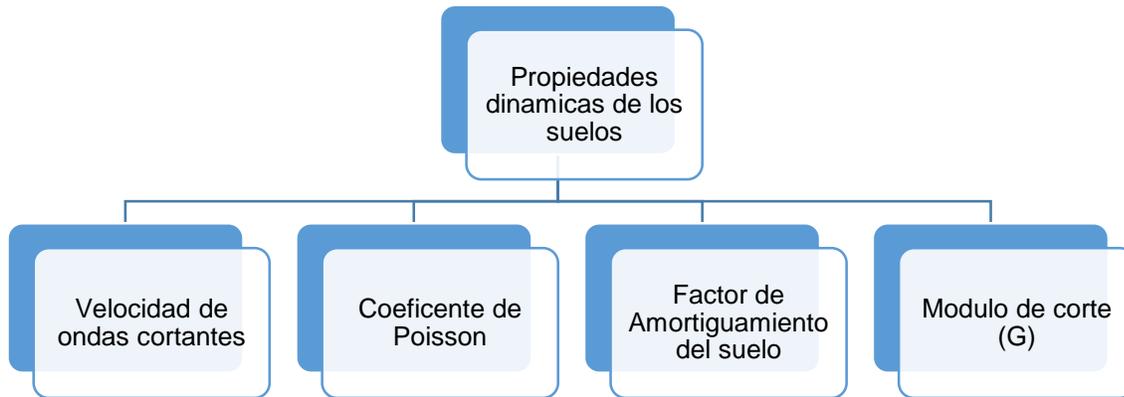
11. Ing. Oscar Valerio Salas, L. (2011). *Ensayos triaxiales para suelos. Métodos y Materiales, 1.*
12. Joffre, G. T. (2016). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN SUELO COHESIVO RECONSTITUIDO, BAJO LA REPRODUCCIÓN EN EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO DE UNA FUENTE SÍSMICA CONOCIDA.*
13. Mestre, F. C. (2006). *Propiedades dinámicas de los suelos.*
14. Rodríguez, M. O. C. (2020). *Características de la actividad sísmica de Cuba. Nexos.*
15. Rodríguez, P. M. (2007, febrero). 2.
16. Sanches, J. G. B. (2009). *MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS DE EL SALVADOR [Ingeniería, Universidad de El Salvador].*
17. Zeevaert-Wiechers, L. (2000). *Importancia del módulo dinámico de rigidez del suelo en el*
18. *análisis de los problemas de estabilidad por la acción de las*
19. *ondas sísmicas. Ingeniería Investigación y Tecnología, 173-179.*
20. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), "Soil Module and Damping Factors for Dynamic Response Analyses," *Earthquake Eng. Rep. Cen. U. of Cal. Berkeley, Cal., Rep. No. EERC 70-10.*

21. Arango A., E. D., & Villaleón S., M. (2017). *Estudio de la sismicidad de la localidad de Moa para la construcción de puente de empresa del Níquel “Pedro Sotto Alba-Moa níquel s.a.”*. Cuba.
22. Aviles, J. (1999). Interaccion Suelo estructura: Conceptos de Diseño. *Revista de Ingenieria Sismica*, 33.
23. Candebat Sánchez, D., Godínez M., G., & Artimes N., A. (2012). CARACTERIZACIÓN DINÁMICA INSTRUMENTAL DE PUENTES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN DE CARRETERAS EN ZONAS SÍSMICAS. *Ciencia en su PC*, núm. 4, septiembre-diciembre, 1-12. Retrieved Marzo 6, 2019, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181325081001>
24. Corbacho, K. Y. (2019). *DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE PARAGUAS*. Cuba, Holguín: 2019.
25. Danna, J., & Pérez, G. (2013). CARACTERIZACION Y EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE PUENTES. *Mecánica Computacional Vol XXXII*, 3379-3401.
26. Díaz Rodríguez, J. A. (HRTH). *CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS – ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO*. MEXICO.
27. Díaz-Rodríguez, J. A. (2222). CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS – ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO . *CURSO DE ACTUALIZACIÓN EN INGENIERÍA SÍSMICA Y DINÁMICA DE SUELOS*, (p. 70). México.
28. ENIA. (2017). *Investigación ingeniero geológica Puente sobre el Río Cabañas. Situación del municipio de Moa*. Informe preliminar, Moa Nickel S.A, Cuba.
29. Estrada, S. O. (2021). *PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES REFORZADOS MEDIANTE EL SOFTWARE GEO - 5*. Cuba, Holguin: 2021.

30. (n.d.). *Eurocódigo - 8*.
31. Fernández Sola, L. R. (2013, mayo 22). *Influencia de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura*. Retrieved from <http://goo.gl/Xd2M7Y>
32. Geostuff. (2002). *Borehole Shear Wave Survey for Engineering Site Investigations*.
33. HERNÁNDEZ, T. (2015). *SISTEMA DE GESTIÓN DE RIESGOS POR FALLOS EN LA PRESA DE COLAS DE LA EMPRESA COMANDANTE PEDRO SOTTO ALBA*. Cuba: FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA DEPARTAMENTO DE MINERÍA, ISMM.
34. Joffre, G. T. (2016). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN SUELO COHESIVO RECONSTITUIDO, BAJO LA REPRODUCCIÓN EN EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO DE UNA FUENTE SÍSMICA CONOCIDA*. BOGOTÁ.
35. Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
36. Luco, J., & Wong, H. (1987). *Seismic response of foundations embedded in a layered half-space*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
37. Mestre, F. C. (2006). *Propiedades dinámicas de los suelos*.
38. Moreno, D. R. (2020). *PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO GEOTÉCNICO DE PILOTES SOMETIDOS A CARGAS LATERALES MEDIANTE EL SOFTWARE GEO - 5*. Cuba, Holguín : 2020.
39. Nuñez, P. M. (2019). *EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICA CON INTERACCION DINAMICA SUELO ESTRUCTURA EN EL PUENTE SOBRE EL RIO CABÑAS MOA*. HOLGUIN.
40. Oliva, G. (1989). *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Instituto de Geografía, ACC. Cuba.

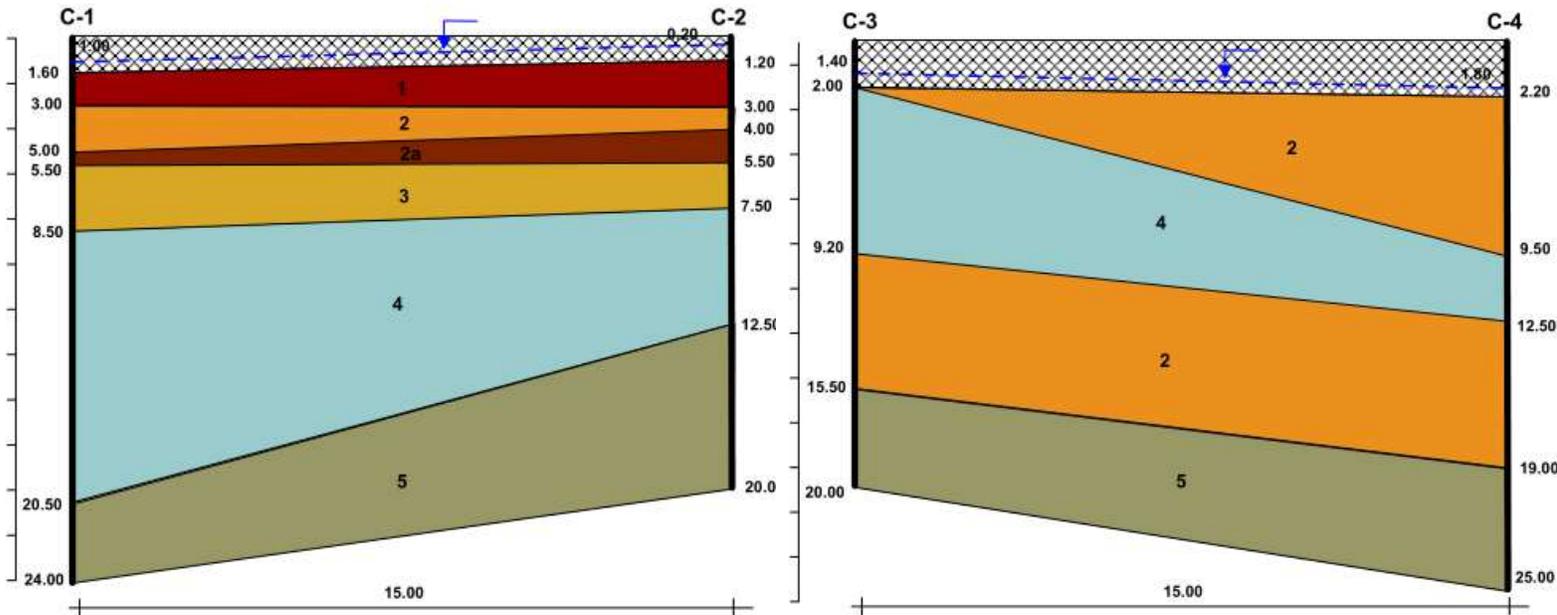
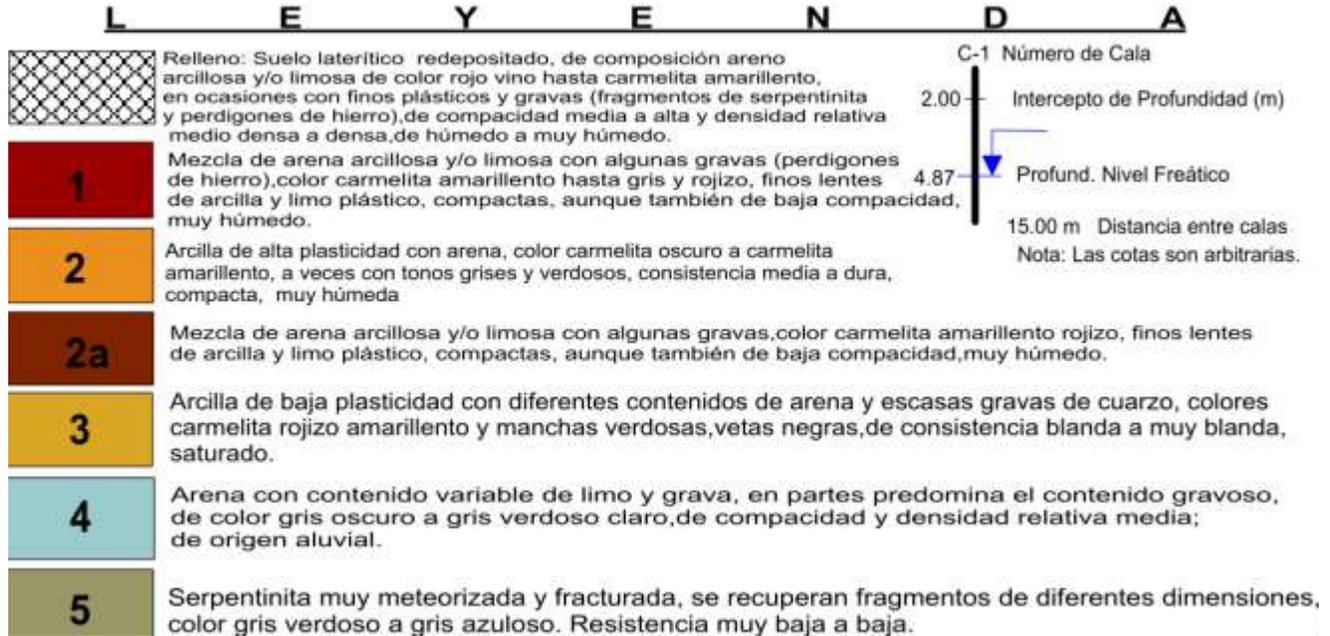
41. Parra Cepeda, T. G. (2016). *MANUAL PARA MODELAR PUENTES DE HORMIGON ARMADO Y MIXTOS (TABLERO DE HORMIGON CON VIGAS METALICAS), EMPLEANDO EL SOFTWARE SAP2000 BRIDGE*. Ecuador: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL.
42. Rodríguez, A. (1998). *Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluacion de riesgos de génesis tectónica*. Cuba: Tesis doctoral. Departamento de geología, ISMM.
43. Rodriguez, P. M. (2007, febrero). 2.
44. Virella Crespo, J., & Wendichansky, D. (n.d.). *EFEECTO DE LA INTERACCIÓN SUELO PILOTE (ISP) LINEAL Y NO-LINEAL EN EL MODELO SÍSMICO DE FUNDACIONES DE PUENTES*. Puerto Rico.

ANEXOS

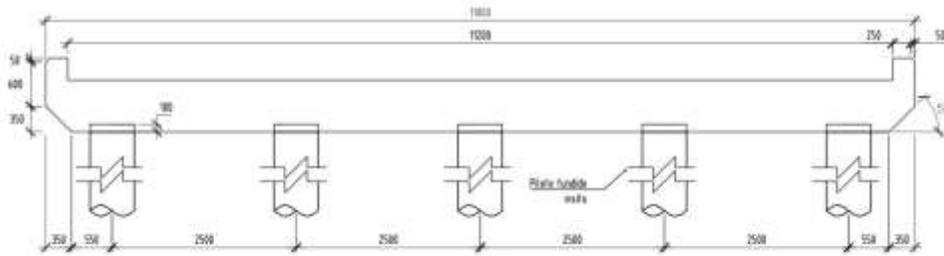


Anexo 2. Propiedades Dinámicas de los suelos. Fuente: Creación propia

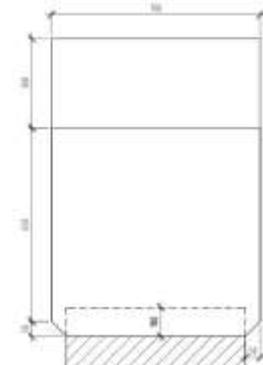
Anexo 3. Perfil Ingeniero Geológico. Fuente: (ENIA, 2017)



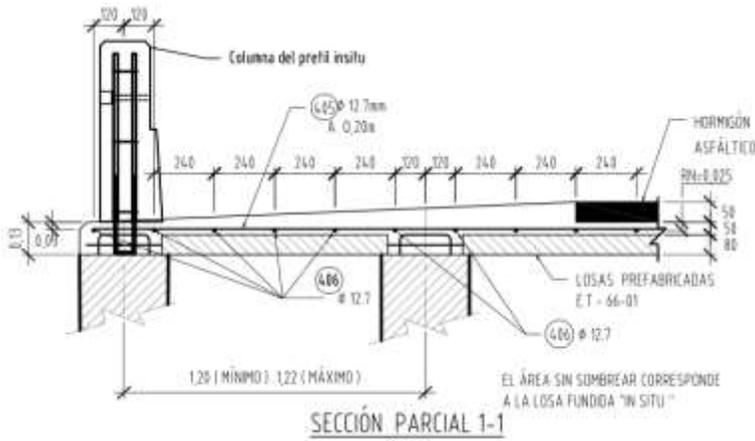
Anexo 4. Detalles de los elementos estructurales del puente sobre el río Cabañas, Moa. Fuente: Proyectos VÉRTICE.



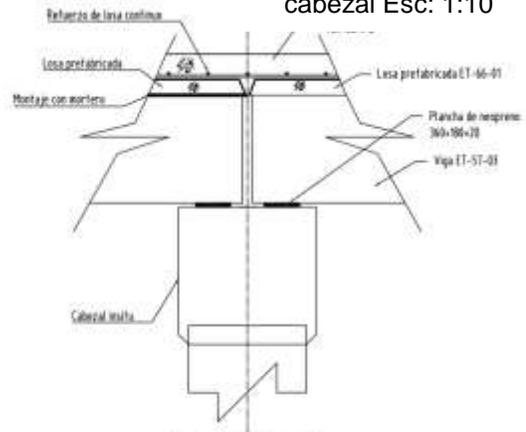
Vista transversal del cabezal Esc: 1:50



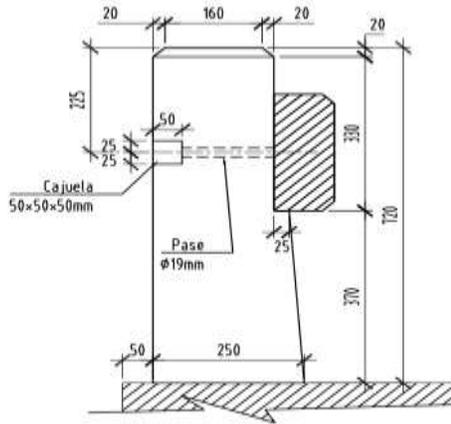
Vista lateral del cabezal Esc: 1:10



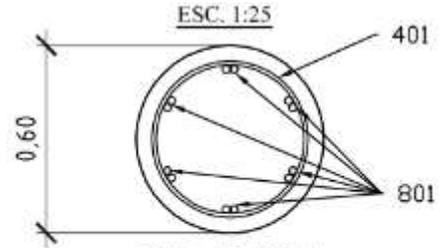
Detalles de la losa Esc: 1:20



Unión vigas con pila Esc: 1:20



Detalles de la columna de pretil Esc: 1:10



Planta de la pila Esc: 1:25

El resto de los elementos son prefabricados consultar el proyecto típico soviético cubano.

Anexo 5. Epicentros de terremotos en el municipio de Moa.

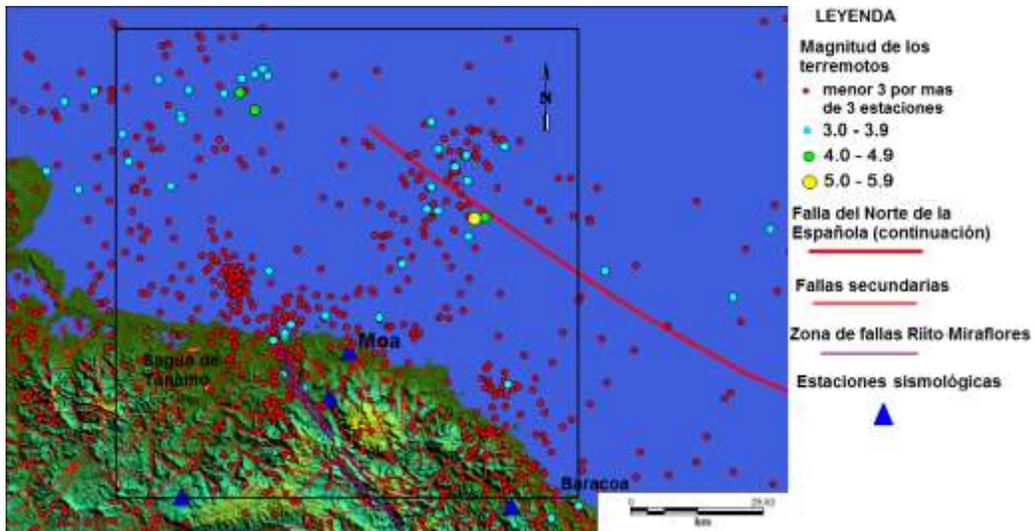


Figura 1. Epicentros de terremotos registrados por más de 3 estaciones en la zona de Moa desde 1998 hasta el 17 de agosto de 2017. Fuente: (Arango A. & Villaleón S., 2017)

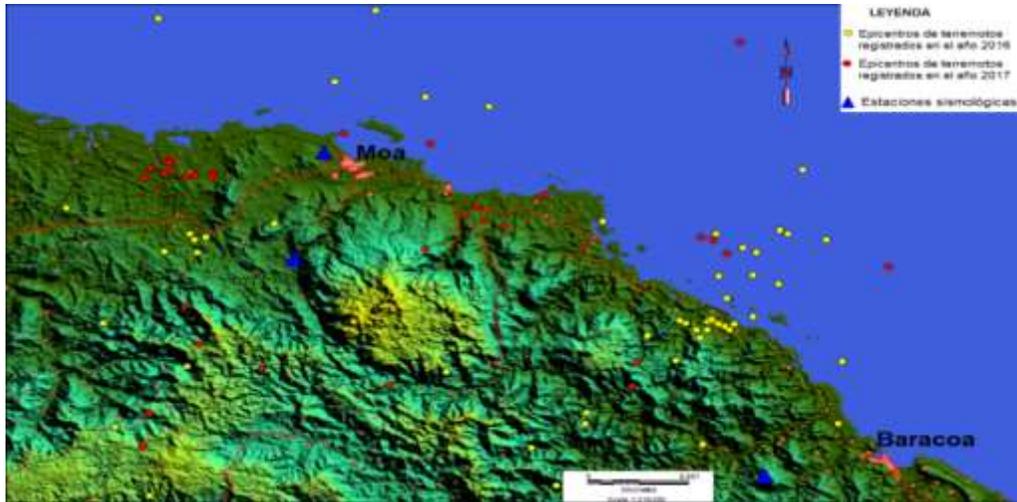


Figura 2. Epicentros de terremotos registrados durante los años 2016 y 2017 en la localidad de Moa y sus alrededores. Fuente: (Arango A. & Villaléon S., 2017)

Anexo 6. Propiedades físicas y mecánicas de los 5 elementos ingenieros geológicos que componen el área de estudio. Fuente: (ENIA, 2017)

Capa 1: Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas (perdigones de hierro), color carmelita amarillento hasta gris y rojizo, finos lentes de arcilla y limo plástico, de baja compacidad, muy húmedo. Por la NC 59: 2000 clasifica como suelos SC. Se pudo definir su presencia en las calas 1 y 2, con espesores que varían entre 1.40 a 1.80 m.

Fino (<Tamiz 200)	40 %	
Arena	56 %	
Grava	4 %	
Límite Líquido (LL)	49 %	
Límite Plástico (LP)	26 %	
Índice Plástico (IP)	23 %	
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.1 kN/m ³	
Humedad Natural (W)	31.2 %	
Peso Específico Húmedo (γf)	18.6 kN/m ³	
Peso Específico Seco (γd)	13.9 kN/m ³	
Índice de Poros (e)	0.96	
Saturación (S)	88 %	
Angulo de fricción interna (φ)	5 ^o	
Cohesión (C)	15 kPa	
Módulo de deformación (E)	0-50	712 kPa
	50-100	2459 kPa
	100-200	3739 kPa
	200-400	5716 kPa
Coefficiente de Poisson (μ) *	0.30 *	

Capa 2: Arcilla de alta plasticidad con arena, color carmelita oscuro a carmelita amarillento, a veces con tonos grises y verdosos, consistencia media a dura, algo compacta, muy húmeda. Según la NC 59: 2000 clasifica como suelo CH. Se pudo definir su presencia en todas las calas, con espesores que varían entre 1.00 a 7.30 m.

Fino (<Tamiz 200)	69 %	
Arena	30 %	
Grava	1 %	
Límite Líquido (LL)	64 %	
Límite Plástico (LP)	30 %	
Índice Plástico (IP)	34 %	
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.2 kN/m ³	
Humedad Natural (W)	34.8 %	
Peso Específico Húmedo (Yf)	18.7 kN/m ³	
Peso Específico Seco (Yd)	13.1 kN/m ³	
Índice de Poros (e)	1.00	
Saturación (S)	89 %	
Angulo de fricción interna (φ)	10 ⁰	
Cohesión (C)	43 kPa	
Índice de Consistencia (Ic)	1.06	
Módulo de deformación (E)	0-50	2040 kPa
	50-100	2872 kPa
	100-200	7127 kPa
	200-400	9423 kPa
Coeficiente de Poisson (μ) *	0.38 *	

Capa 2a: Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas, color carmelita amarillento rojizo, finos lentes de arcilla y limo plástico, de baja compacidad, muy húmedo. Por la NC 59: 2000 clasifica como suelos SC. Se pudo definir su presencia en las calas 1 y 2, la cual aparece como una intercalación entre las capas 2 y 3, con espesor de 0.50 a 1.50 m.

Fino (<Tamiz 200)	38 %
Arena	62 %
Grava	0 %
Límite Líquido (LL)	50 %
Límite Plástico (LP)	27 %
Índice Plástico (IP)	23 %
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.3 kN/m ³
Humedad Natural (W)	25.6 %
Peso Específico Húmedo (Yf)	18.5 kN/m ³
Peso Específico Seco (Yd)	13.6 kN/m ³

Índice de Poros (e)	1.00	
Saturación (S)	70 %	
Angulo de fricción interna (φ)	6 ^o	
Cohesión (C)	11 kPa	
Módulo de deformación (E)	0-50	860 kPa
	50-100	2855 kPa
	100-200	4246 kPa
	200-400	6229 kPa
Coefficiente de Poisson (μ) *	0.30 *	

Capa 3: Arcilla de baja plasticidad con diferentes contenidos de arena y escasas gravas de cuarzo, color carmelita rojizo amarillento y manchas verdosas, vetas negras, de consistencia blanda a muy blanda, saturado. Según la Norma Cubana NC 59:2000 clasifican como un suelo CL. Se pudo definir su presencia en las calas 1 y 2, con espesores que varían entre 2.00 a 3.00 m.

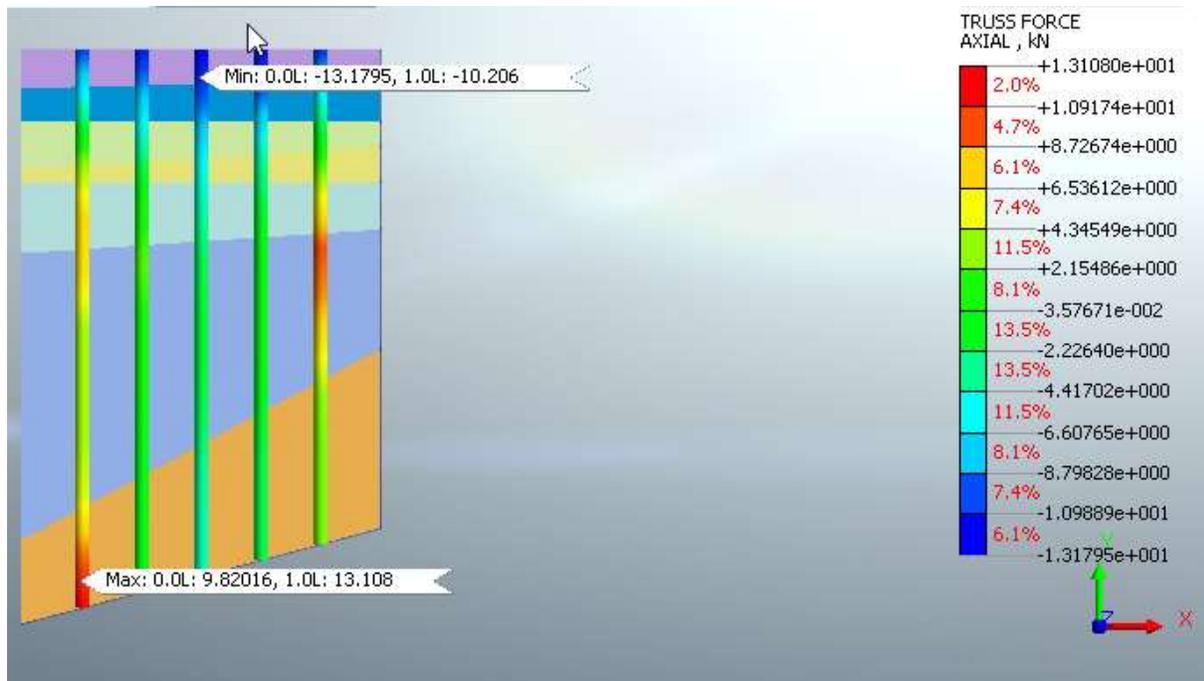
Fino (<Tamiz 200)	53 %	
Arena	47 %	
Grava	0 %	
Límite Líquido (LL)	43 %	
Límite Plástico (LP)	25 %	
Índice Plástico (IP)	19 %	
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.1 kN/m ³	
Humedad Natural (W)	37.8 %	
Peso Específico Húmedo (γf)	18.5 kN/m ³	
Peso Específico Seco (γd)	13.3 kN/m ³	
Índice de Poros (e)	1.03	
Saturación (S)	99 %	
Angulo de fricción interna (φ)	21 ^o	
Cohesión (C)	19 kPa	
Módulo de deformación (E)	0-50	2188 kPa
	50-100	4039 kPa
	100-200	7736 kPa
	200-400	8447 kPa
Coefficiente de Poisson (μ) *	0.41	

Capa 4: Arena con contenido variable de limo y grava, en partes predomina el contenido gravoso, de color gris oscuro a gris verdoso claro, de compacidad muy alta a baja, y densidad relativa muy densa a suelta; de origen aluvial. Clasifica por la NC 59:2000 como un suelo SM-SP (arena mal graduada con limo y grava).

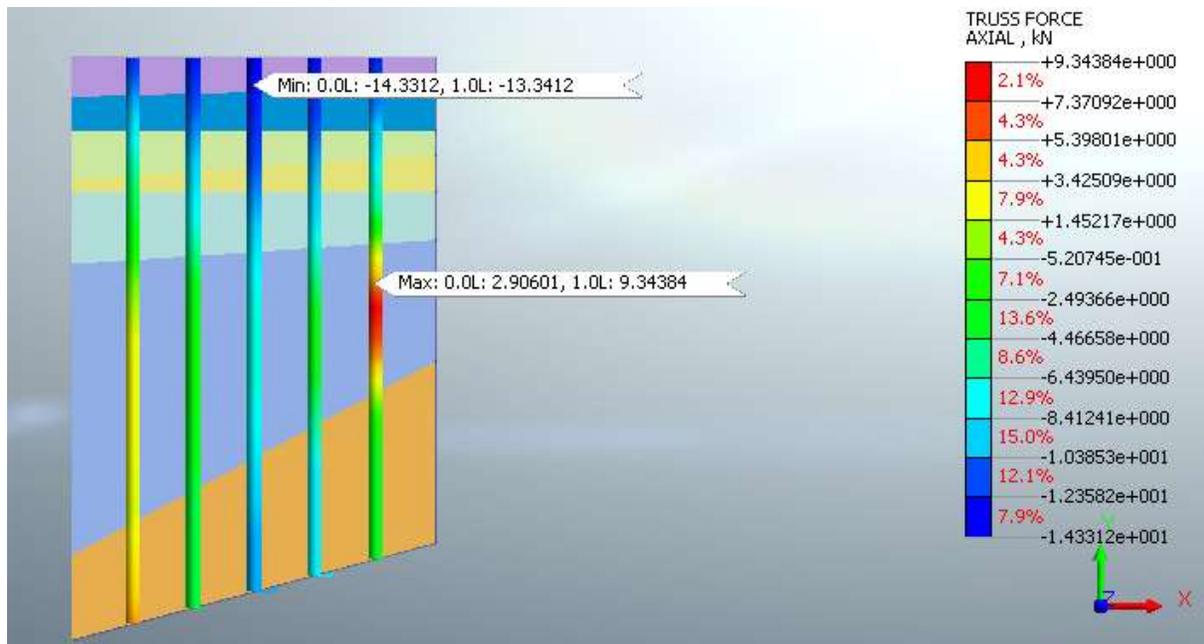
Fino (<Tamiz 200)	13 %
Arena	80 %
Grava	7 %
Límite Líquido (LL)	29 %
Límite Plástico (LP)	27 %
Índice Plástico (IP)	2 %
Peso específico de los sólidos (Gs)	26.9 kN/m ³
Humedad Natural (W)	23.7 %
Angulo de fricción interna (ϕ)	35 ^o
Cohesión (C)	10 kPa

Capa 5: Serpentinita y/o peridotita serpentizada, color gris verdoso a gris azulado, con diferentes grados de meteorización, con grietas en diferentes direcciones y planos de fractura, se recuperan fragmentos de diferentes dimensiones, de resistencia muy baja a baja.

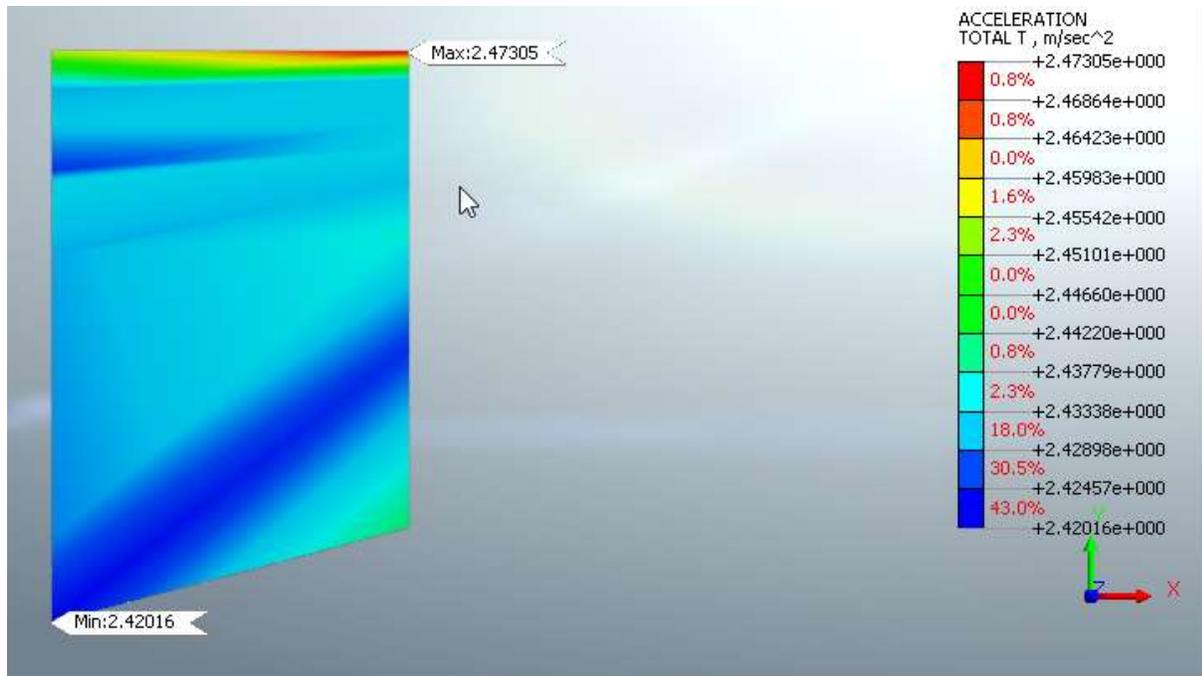
Humedad Natural (W)	1.2 %
Peso específico de los sólidos (Gs)	27.0 kN/m ³
Peso Específico Húmedo (γ_f)	22.3 kN/m ³
Peso Específico Seco (γ_d)	22.0 kN/m ³
Peso Específico Seco (γ_{sat})	23.0 kN/m ³
Porosidad (n)	19 %
Saturación (S)	14 %
Resistencia a la compresión axial simple natural ($q_{u\ nat}$)	6.5 MPa
Resistencia a la compresión axial simple saturada ($q_{u\ sat}$)	4.3 MPa
Coefficiente de Ablandamiento	0.66



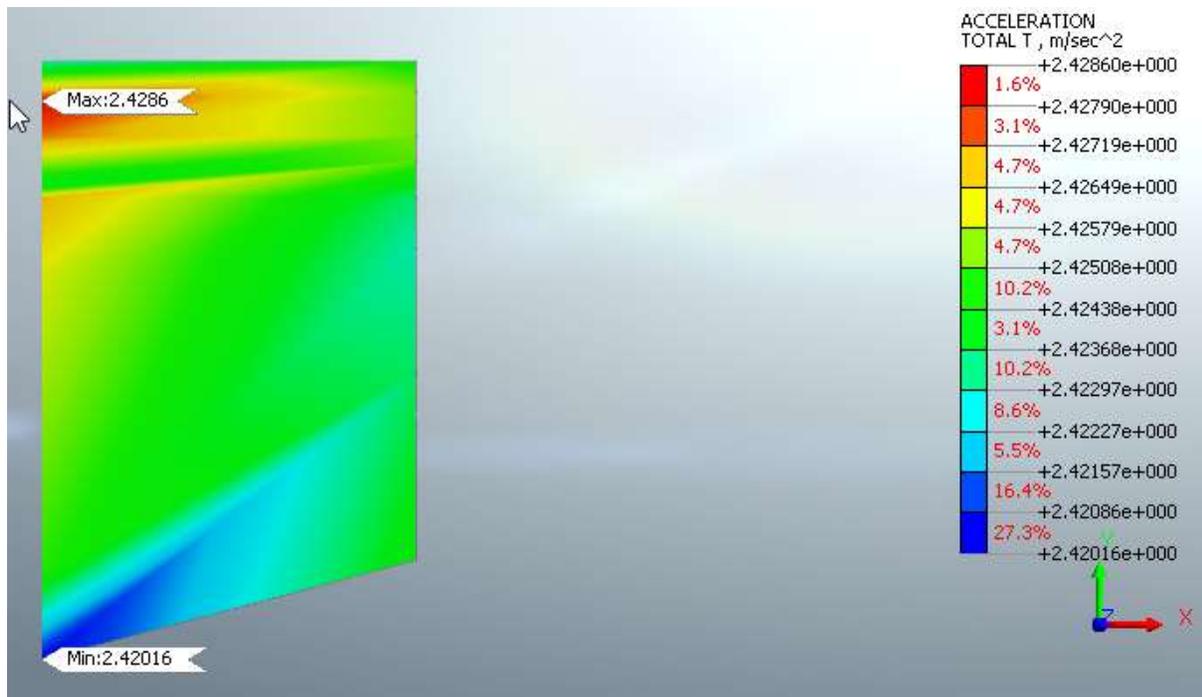
Anexo 6. Axial máximo y mínimo con propiedades dinámicas en la estructura. Fuente Creación propia



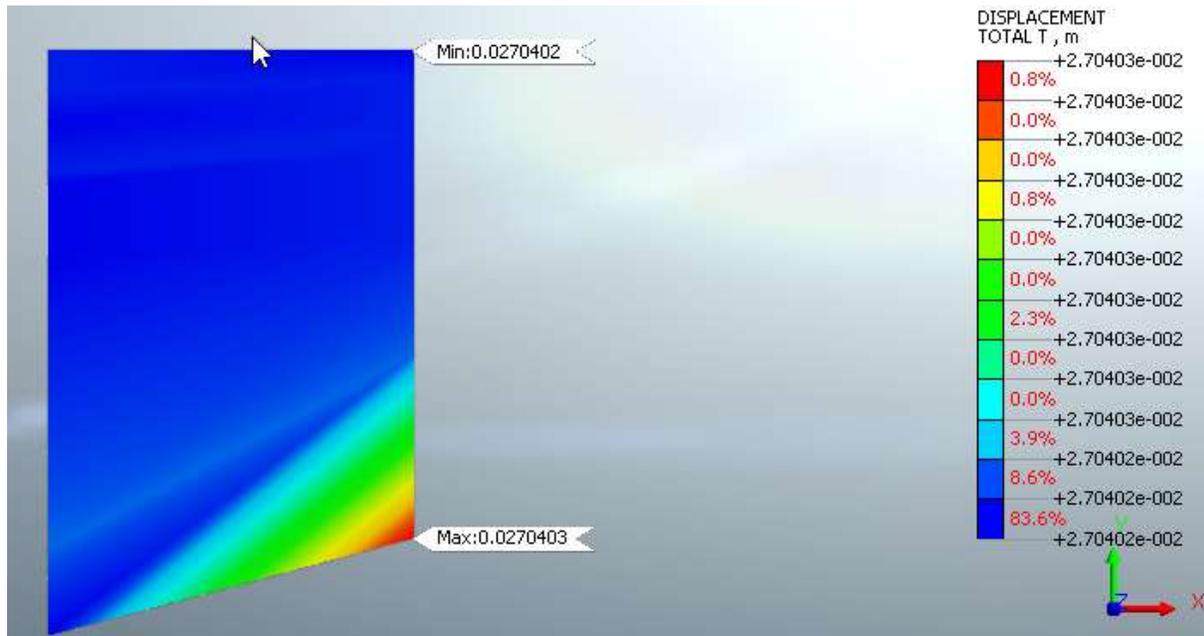
Anexo 7. Axial máximo y mínimo con propiedades estáticas en la estructura. Fuente Creación propia.



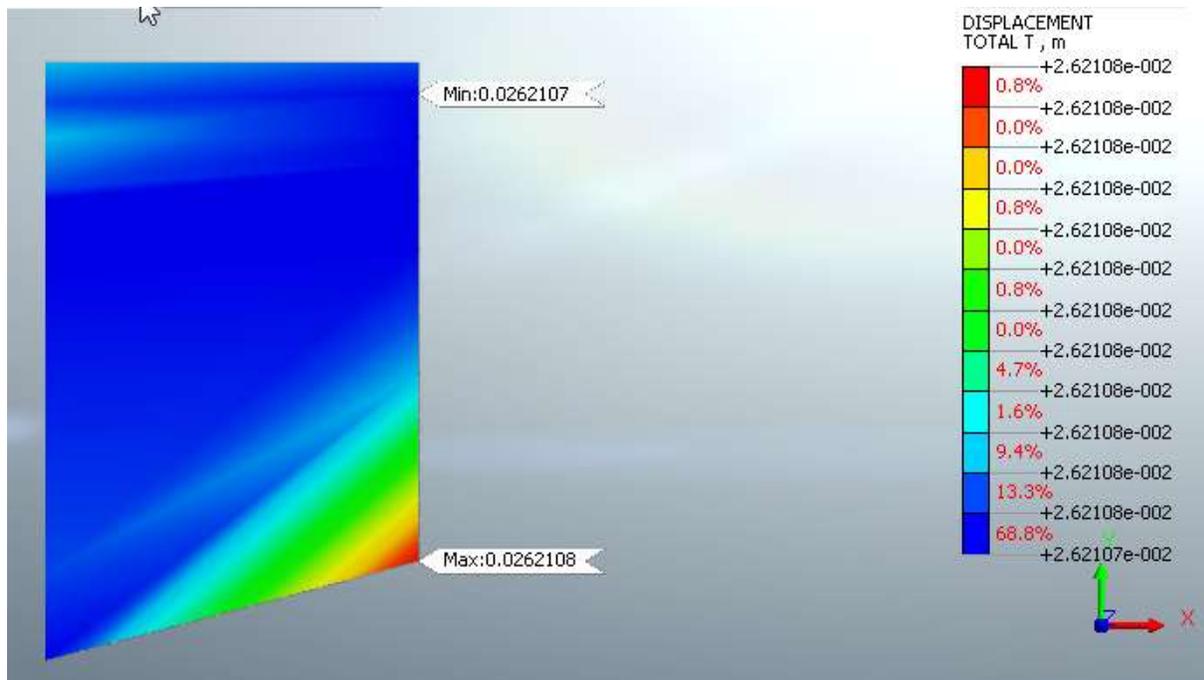
Anexo.8 Aceleración máximo y mínimo con propiedades dinámicas en el suelo. Fuente Creación propia.



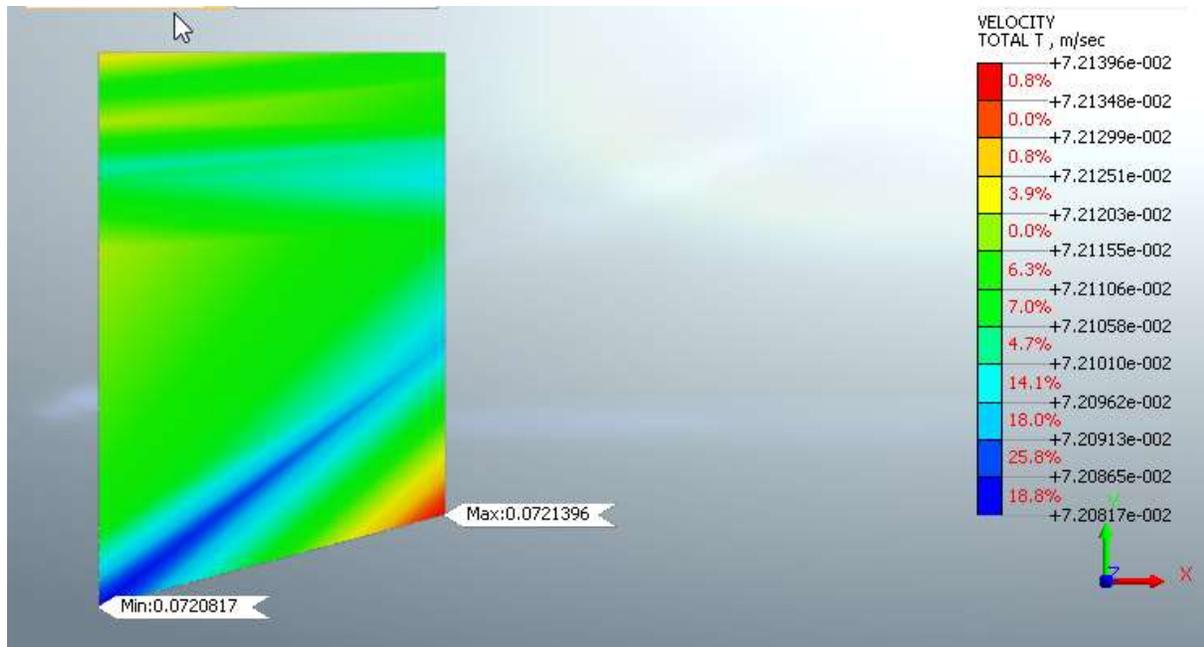
Anexo 9. Aceleración máximo y mínimo con propiedades estáticas en el suelo. Fuente Creación propia.



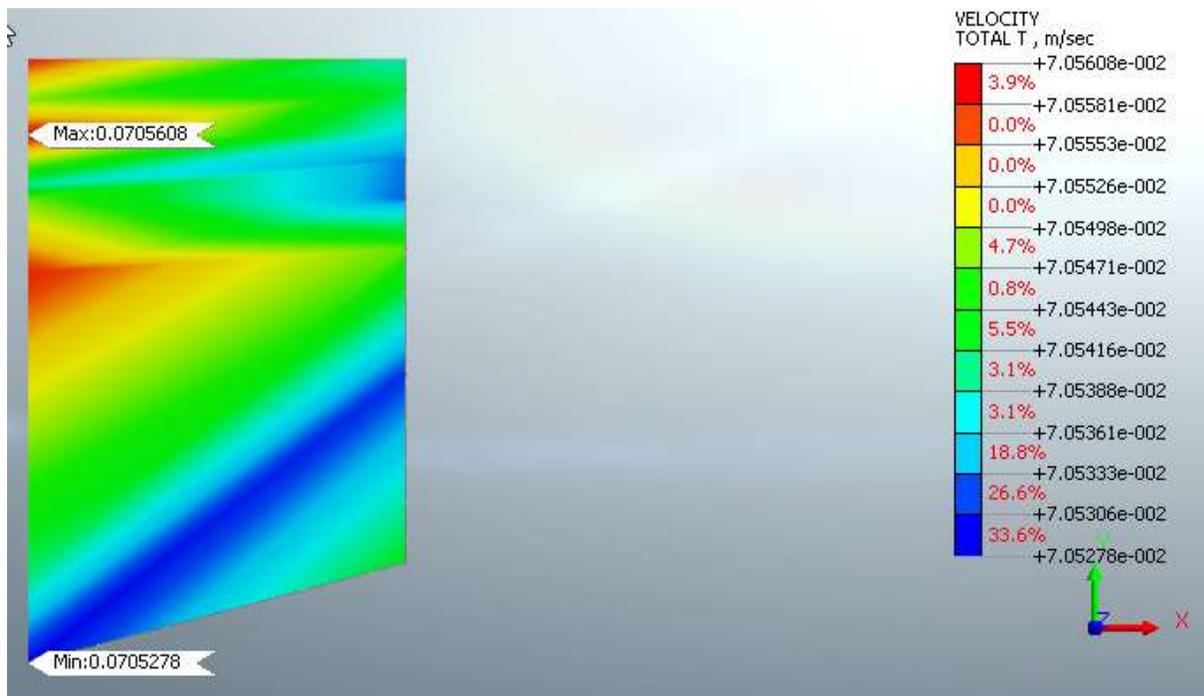
Anexo.10 Desplazamiento máximo y mínimo con propiedades Dinámicas en el suelo.
Fuente Creación propia.



Anexo.11 Desplazamiento máximo y mínimo con propiedades estáticas en el suelo.
Fuente Creación propia.



Anexo.12 Velocidad máximo y mínimo con propiedades dinámicas en el suelo. Fuente Creación propia.



Anexo 13. Velocidad máximo y mínimo con propiedades estáticas en el suelo. Fuente Creación propia.