



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**MODELACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA EXCAVACIÓN CON
INTERACCIÓN SUELO – ELEMENTO DE CONTENCIÓN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA
CARLOS ANDRÉS JIMÉNEZ GARROTE

TUTOR
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
FACULTAD DE INGENIERÍA

COTUTOR
M. EN I. CARMELINO ZEA CONSTANTINO
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE DE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. Agustín Deméneghi Colina
Secretario:	M.I. Germán López Rincón
Vocal:	Dr. Rigoberto Rivera Constantino
1 er. Suplente:	Dr. Eduardo Botero Jaramillo
2 do. Suplente:	M.I. Carmelino Zea Constantino

Lugar donde se realizó la tesis:
Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

TUTOR DE TESIS:

DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO

FIRMA

*Dedico este trabajo a mi madre Ofelia, mi padre Carlos
y a mi hermano Sergio por su paciencia y amor incondicional.*

A mis abuelas Blanca Inés y Lupe por sus enseñanzas y buenos recuerdos.

*A toda mi familia por siempre tener una sonrisa
y ser un apoyo en mi formación.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y permitirme cumplir el sueño de crecer profesionalmente.

Al Consejo Nacional de la Ciencia y la Tecnología de México (CONACYT) por su apoyo económico durante el desarrollo de la maestría.

Al Dr. Rigoberto Rivera Constantino por su invaluable dedicación, conocimiento y compromiso que como docente y tutor incentivó mi deseo en la investigación y la ingeniería.

Al M. en I. Carmelino Zea Constantino por su orientación crítica, sus observaciones y experiencia que permitieron el desarrollo exitoso de esta tesis.

A mis sinodales M.I. Agustín Deméneghi Colina, M.I. Germán López Rincón y al Dr. Eduardo Botero Jaramillo por su tiempo y valiosas observaciones que contribuyeron a la culminación de este trabajo de investigación.

A todos los profesores de la Maestría en Geotecnia por ser ejemplo de la excelencia académica.

A Andrés por su paciencia y apoyo para concluir esta etapa de formación académica.

A mis compañeros de generación por todos los momentos compartidos.



CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	iii
ALCANCES.....	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1 Estado de esfuerzos en el suelo	7
3.1.1. Solución de Boussinesq (1885).....	8
3.1.2. Solución de Mindlin (1936)	13
3.2 Presiones laterales en el suelo	20
3.3 Muros Milán	24
3.4 Metodología de interacción suelo – estructura	27
3.4.1. Modelación del sistema estructural	27
3.4.2. Modelación del suelo	32
4. PROYECTO DE ESTUDIO	37
4.1 Antecedentes del proyecto.....	37
4.2 Características del proyecto.....	37
4.3 Instrumentación de campo.....	38
4.4 Modelo geológico – geotécnico.....	41
4.5 Procedimiento constructivo	47



5.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INTERACCIÓN	54
5.1	Modelo reticular para la estructura de contención.....	55
5.2	Matriz de rigidez del suelo	57
5.2.1.	Archivo de datos para el programa FLEXHO.....	59
5.2.2.	Archivo de módulos de compresibilidad para el programa FLEXHO.....	60
5.3	Matriz de interacción suelo – estructura de contención.	62
5.3.1.	Etapas constructivas de análisis	63
5.3.2.	Ejecución del programa EMISES3D.....	71
5.4	Análisis de interacción suelo – estructura	72
	CONCLUSIONES	80
	REFERENCIAS	83



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 3.1.</i> Solución de Boussinesq para carga puntual.	8
<i>Figura 3.2.</i> Solución de Holl para carga rectangular uniforme vertical.	10
<i>Figura 3.3.</i> Solución de Terzaghi y Carothers para carga rectangular vertical infinita.	12
<i>Figura 3.4.</i> Solución de Mindlin para carga puntual.	14
<i>Figura 3.5.</i> Carga rectangular horizontal uniformemente distribuida.	16
<i>Figura 3.6.</i> Estado de esfuerzos laterales en el suelo para una estructura de retención.	21
<i>Figura 3.7.</i> Círculo de Mohr para estados activos y pasivos del suelo.	22
<i>Figura 3.8.</i> Planos de deslizamiento en la masa del suelo cerca del elemento de contención.	23
<i>Figura 3.9.</i> Proceso constructivo del muro Milán.	26
<i>Figura 3.10.</i> Modelo del muro utilizando una retícula por medio de trabes.	28
<i>Figura 3.11.</i> Equivalencia de sistemas locales a globales.	31
<i>Figura 3.12.</i> Modelo de áreas de placas para la estructura de contención.	32
<i>Figura 3.13.</i> Modelo de carga unitaria para las placas con su influencia por Mindlin.	33
<i>Figura 3.14.</i> Modelo final de interacción para el uso de EMISES3D.	34
<i>Figura 4.1.</i> Vista general de proyecto.	37
<i>Figura 4.2.</i> Elementos de un inclinómetro.	40
<i>Figura 4.3.</i> Estimación del Módulo E_{50} a partir de ensayos triaxiales UU.	45
<i>Figura 4.4.</i> Ubicación en planta de Muro Milán y pilas.	48
<i>Figura 4.5.</i> Construcción de la trabe de coronamiento perimetral de la estructura.	48
<i>Figura 4.6.</i> Plataforma de trabajo con rezaga para la extracción de material.	49
<i>Figura 4.7.</i> Secciones de procesos constructivos para el edificio Torre.	50
<i>Figura 4.8.</i> Ubicación de los inclinómetros dentro del área de construcción.	51
<i>Figura 4.9.</i> Resultados del inclinómetro “INC-01”	52
<i>Figura 4.10.</i> Resultados del inclinómetro “INC-04”	52
<i>Figura 4.11.</i> Resultados del inclinómetro “INC-05”	53
<i>Figura 5.1.</i> Ubicación en planta de las estructuras de contención de estudio (en rojo).	55



<i>Figura 5.2.</i> Modelo reticular de la estructura de contención.	56
<i>Figura 5.3.</i> Modelo reticular con resortes del suelo.	56
<i>Figura 5.4.</i> Hoja de cálculo programada para calcular la matriz de rigidez del suelo.....	57
<i>Figura 5.5.</i> Diagrama de flujo para el programa FLEXHO.....	58
<i>Figura 5.6.</i> Archivo de datos .DAT para el programa FLEXHO.	59
<i>Figura 5.7.</i> Archivo de módulos de compresibilidad .MOD para el programa FLEXHO.	60
<i>Figura 5.8.</i> Inicio del programa FLEXHO.	61
<i>Figura 5.9.</i> Opciones de impresión del programa FLEXHO.....	61
<i>Figura 5.10.</i> Diagrama de flujo para el programa EMISES3D.	62
<i>Figura 5.11.</i> Etapa 1 y 2 del proceso de excavación en la obra.....	64
<i>Figura 5.12.</i> Etapa 3 del proceso de excavación de la obra.....	64
<i>Figura 5.13.</i> Etapa 4 del proceso de excavación de la obra.....	65
<i>Figura 5.14.</i> Definición de propiedades de la retícula en el modelo.	65
<i>Figura 5.15.</i> Etapa 5 del proceso de excavación de la obra.....	66
<i>Figura 5.16.</i> Etapa 6 del proceso de excavación de la obra.....	67
<i>Figura 5.17.</i> Etapa 7 del proceso de excavación de la obra.....	67
<i>Figura 5.18.</i> Etapa 8 del proceso de excavación de la obra.....	68
<i>Figura 5.19.</i> Áreas tributarias para las barras horizontales del modelo.....	70
<i>Figura 5.20.</i> Asignación de cargas distribuidas lineales uniformes en el modelo.....	70
<i>Figura 5.21.</i> Inicio del programa EMISES3D.	71
<i>Figura 5.22.</i> Desplazamientos horizontales para las cuatro etapas de análisis.....	72
<i>Figura 5.23.</i> Desplazamientos horizontales vs reporte del inclinómetro “INC-01”.....	76
<i>Figura 5.24.</i> Análisis paramétrico vs reporte del inclinómetro “INC-01”.	79



LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 4.1.</i> Lecturas de celdas piezométricas.....	42
<i>Tabla 4.2.</i> Resultados del Módulo (Em) para ensayo de Presiómetro.	44
<i>Tabla 4.3.</i> Estimación de módulos E_{50} para el perfil estratigráfico de estudio.	45
<i>Tabla 4.4.</i> Modelo geológico – geotécnico del sitio de estudio.....	46
<i>Tabla 5.1.</i> Datos de la retícula de la estructura de contención para la edificación de estudio. 59	
<i>Tabla 5.2.</i> Módulos M para la estratigrafía en el terreno de análisis.	60
<i>Tabla 5.3.</i> Propiedades de los elementos de contención del modelo de interacción.	69
<i>Tabla 5.4.</i> Propiedades del material de relleno entre la tablestaca y la mega zapata.....	69
<i>Tabla 5.5.</i> Resultados del análisis de interacción por etapas.	73
<i>Tabla 5.6.</i> Resultados del análisis de interacción acumulado por etapas.....	75



RESUMEN

Las grandes obras de infraestructura requieren diseños de ingeniería óptimos y procesos constructivos eficientes que plantean retos en el ámbito geotécnico; en el caso de nuevas edificaciones donde el costo del terreno es muy elevado, se generan alternativas como lo son las estructuras de gran altura con excavaciones a una gran profundidad.

En el diseño de una obra geotécnica se debe analizar el comportamiento mecánico del suelo sometido a diferentes estados de esfuerzo, los efectos de la interacción del suelo con sus elementos de contención y las deformaciones debidas a las excavaciones por medio de cálculos y modelos numéricos que simulen las condiciones reales de estudio.

Para analizar el problema de interacción suelo – elemento de contención de una excavación profunda en suelos lacustres ubicada en la Ciudad de México, se requiere del uso de metodologías analíticas y herramientas computacionales que permitan estimar los cambios producidos en el terreno tomando en cuenta las diferentes etapas del proceso constructivo de la obra.

El análisis de interacción utilizado en este trabajo fue desarrollado por Zeevaert (1973, 1980), en donde la cimentación y los elementos estructurales se modelan por medio de retículas tridimensionales con seis grados de libertad apoyados en una serie de resortes elásticos, los cuales representan al suelo a través del módulo de reacción el cual permite calcular las reacciones y las deformaciones producidas por las cargas aplicadas.

El método de análisis mencionado se complementa incluyendo el cálculo de los cambios en la distribución de esfuerzos del terreno aplicando la solución de Mindlin (1936), la solución de Boussinesq (1885) y Holl (1940) para cada etapa del proceso constructivo.

Se ha planteado como objetivo en este trabajo modelar una excavación profunda ubicada en la Ciudad de México usando las metodologías de interacción suelo – elemento de contención por la teoría matricial de Zeevaert, por medio de software y hojas de cálculo programadas que involucren los aspectos reológicos del suelo, los cambios de estados de esfuerzo y los elementos estructurales utilizados en el proceso de construcción de la edificación.



ABSTRACT

Big infrastructure requires an optimal engineering design and efficient construction processes that pose challenges in the geotechnical field; in the case of new buildings where the cost of the land is expensive, alternatives are generated such as skyscrapers with deep foundations.

In a geotechnical engineer design, the mechanical behavior of soil subjected to different stress states must be analyzed, the effects of soil interaction with structural elements and deformations due to excavations must be studied by calculations and numerical models that simulate the real condition.

To analyze the soil interaction - structural element problem of a deep excavation in lacustrine soils located in Mexico City, the use of theoretical methodologies and computational software is required to estimate the changes produced in the terrain taking into account the different stages of the construction process.

The interaction analysis used in this thesis was developed by Zeevaert (1973, 1980), where the foundation and structural elements are modeled by means of three-dimensional grids with six degrees of freedom supported with a series of elastic springs, which represent the soil through the module reaction, that allows to calculate the reactions and deformations produced by the applied loads.

The mentioned analysis method is complemented by including the calcule of soil distribution stresses applying Mindlin solution (1936), Boussinesq solution (1885) and Holl (1940) for each stage of the construction process.

The main objective of this thesis has been to model a deep excavation located in Mexico City using the soil - structure interaction methodologies by Zeevaert's matrix theory, by means of software and programmed spreadsheets that involve the rheological aspects of soil, changes in stress states and structural elements used in the building construction process.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Analizar los efectos de la interacción suelo – elemento de contención para una excavación profunda que aloja la cimentación de una edificación de gran altura localizada en los suelos lacustres de la Ciudad de México, empleando métodos analíticos que tomen en cuenta las diferentes etapas del proceso constructivo.
- 2) Generar un modelo geotécnico del subsuelo utilizando la información disponible de la zona de estudio obtenida mediante pruebas de campo y laboratorio.
- 3) Calcular las configuraciones de presiones de contacto, deformaciones y elementos mecánicos para las diferentes etapas de excavación derivadas del estudio de la interacción suelo - elemento de contención.
- 4) Generar herramientas computacionales para la estimación de cambios de esfuerzos en el interior de la masa de suelo (Mindlin,1936) e incorporar dichas herramientas en los métodos de interacción suelo – elemento de contención propuestos por Zeevaert (1973).

ALCANCES

Los alcances de la tesis incluyen: la integración de la solución de Mindlin para carga horizontal uniforme en un área rectangular (Mindlin,1936) y su uso en el cálculo de la distribución de esfuerzos horizontales, obteniendo la expresión final en términos de las propiedades elásticas y geométricas del medio analizado; el uso de la solución de Boussinesq (1885) y Holl (1940) debido a carga vertical uniformemente distribuida en un área rectangular; la aplicación de la metodología de interacción suelo – estructura de contención matricial (Zeevaert,1973) modelando el proceso de excavación por etapas constructivas; la programación de las metodologías de análisis de interacción suelo – elemento de contención en lenguaje Fortran y hojas de cálculo, buscando una mayor difusión para su uso dentro del grupo de profesores y estudiantes de la Facultad de Ingeniería, así como expertos de la práctica profesional.



1. INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo de las ciudades plantea nuevos desafíos en la ingeniería civil debido a la construcción de infraestructura que demanda la población, por lo tanto, se requiere de un amplio conocimiento que permita diseñar los proyectos de forma técnica y económicamente viables como son las edificaciones de gran altura y con excavaciones profundas.

Es fundamental el uso de la geotecnia para analizar el comportamiento de los materiales que se encuentran en el subsuelo, los cuales permiten estimar los efectos en cambios de esfuerzos y deformaciones en diferentes etapas constructivas, siendo la etapa de diseño la que requiere una revisión de ingeniería a detalle con el fin de evitar un estado de falla en la obra.

A través de los años se han desarrollado diferentes investigaciones que plantean modelos con mayor precisión, estos van desde métodos analíticos hasta el uso de elemento finito y diferencias finitas que simulan el comportamiento del suelo, los elementos estructurales y su interacción. Sin embargo, algunas metodologías de diseño simplifican el cálculo a modelos bidimensionales, los cuales utilizan modelos numéricos computacionales que requieren de conocimiento técnico para ser aplicados correctamente y están limitados por sus licencias de alto costo.

Al diseñar este tipo de obras en suelos blandos presentes en la Ciudad de México, se requiere de elementos de soporte y estructuras de contención que permitan trabajar a grandes profundidades tanto por estabilidad como por capacidad de carga del suelo frente a cargas impuestas, en donde es obligatorio la elaboración de estudios de ingeniería que involucren las condiciones reales del subsuelo, los niveles piezométricos y abatimiento en la zona, la evaluación de las propiedades mecánicas como es el caso en los depósitos superficiales de baja resistencia y alta compresibilidad, y un análisis de interacción suelo – elementos de contención.

En México, existe una investigación que involucra las propiedades del subsuelo y de la estructura con el fin de evaluar las condiciones de interacción; esta metodología representa el suelo por medio de resortes elásticos utilizando un módulo de reacción variable para calcular la distribución de fuerzas bajo una cimentación (Zeevaert, 1973). El análisis se basa en el cálculo



matricial de una estructura con rigidez finita, la cual incluye los efectos de la compresibilidad del subsuelo obteniendo la condición de compatibilidad de deformaciones entre elementos.

Aplicando la teoría de interacción de Zeevaert (1973), se obtienen las deformaciones de la estructura, las reacciones internas de los elementos y la distribución bajo las áreas tributarias requeridas para el diseño. Para calcular las influencias y los cambios de esfuerzos en el interior de la masa de suelo debido a las etapas de construcción y excavación de la obra, se integró la solución de esfuerzo horizontal para carga puntual en el interior de un semiespacio elástico lineal de Mindlin (1936) y también el caso de carga horizontal uniforme en un área rectangular.

El presente estudio busca generalizar el procedimiento de interacción suelo – elemento de contención para excavaciones profundas en una edificación ubicada en la Avenida Reforma de la Ciudad de México, utilizando las metodologías de análisis de comportamiento y modelado por etapas para calcular las deformaciones que sufre el suelo y los elementos estructurales al compararse con las mediciones de campo de los inclinómetros perimetrales de la obra.

Por tal motivo, en el Capítulo 2 se realiza una revisión de los antecedentes y artículos de investigación que abordan algunas metodologías de solución para el problema de interacción suelo – estructura.

En el Capítulo 3 se describen los fundamentos utilizados para la metodología de interacción, tales como la distribución de esfuerzos en el suelo, la teoría de presiones laterales, el cálculo matricial del suelo, la discretización de la estructura de contención y el uso del muro Milán como sistema constructivo.

En el Capítulo 4 se expone el proyecto de estudio con sus antecedentes, las características del subsuelo, el modelo geológico - geotécnico, la instrumentación en campo y su procedimiento constructivo que son claves para plantear el modelo del subsuelo y la estructura.

En el Capítulo 5, se aplica la metodología de interacción calculando las deformaciones producidas en la obra y siendo comparadas con la instrumentación de campo, en este caso con los reportes de los inclinómetros. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo resaltando las ventajas del uso de esta metodología en la práctica profesional, como así de la importancia de estimar los efectos de interacción en las obras geotécnicas.



2. ANTECEDENTES

Las investigaciones en ingeniería han desarrollado metodologías analíticas y numéricas para estimar los efectos del suelo y los elementos estructurales en una excavación; aun así, los análisis de interacción no son suficientes para representar adecuadamente el comportamiento por las diferentes hipótesis que se utilizan para simplificar los modelos.

Comúnmente se modela una cimentación con rigidez definida sobre una serie de resortes elásticos que representan la respuesta del suelo, en términos de reacciones o desplazamientos. A partir de este análisis, se incluyen en el modelo estructural las deformaciones calculadas y por medio de iteraciones se estima el comportamiento de los elementos hasta que los resultados no presenten grandes variaciones de una a otra iteración y se cumpla la compatibilidad de deformaciones.

Con respecto al estudio de interacción, se reportan en la literatura diversos métodos de análisis en condiciones estáticas y dinámicas para calcular los efectos bidimensionales y tridimensionales del sistema suelo – cimiento (Deméneghi,1992).

En México se tiene un procedimiento de análisis de interacción suelo – estructura para suelos blandos de compresibilidad media a alta, característicos de la Ciudad de México (Zeevaert,1973). Otros referentes de investigaciones en el tema son las desarrolladas por Sánchez-Enríquez (1982) y López (2012), que analizan el comportamiento por medio del método de las rigideces o de los desplazamientos que es equivalente al método de las flexibilidades o de las fuerzas virtuales utilizado por Zeevaert.

Algunas publicaciones similares han estudiado el comportamiento de los elementos de retención y el cálculo de empujes comparando los resultados arrojados por el software PLAXIS contra los métodos analíticos (Kuo-Hsin y Chia-Nan,2010); también se han analizado los empujes horizontales utilizando los resultados obtenidos en PLAXIS aplicando la teoría de Rankine, Coulomb y Boussinesq sin incluir las deformaciones de los elementos de contención (Petersson,2012).



En investigaciones más recientes, se encuentra la aplicación de la metodología de interacción propuesta por Zeevaert por medio de un modelo numérico para el caso de un muro Milán con anclajes ubicado en la zona centro – norte de la Ciudad de México, en donde se calcularon los empujes y se utilizó la teoría matricial incluyendo las propiedades mecánicas del suelo para comparar los resultados con medición de campo y un modelo en PLAXIS por etapas (Arvizu,2017).

La referencia en México es el Manual de Diseño de Obras Civiles en su capítulo B.2.6 de Estructuras de retención (CFE,2014); en este documento se analiza la teoría de empuje de tierras, como también los sistemas de retención para excavaciones con la limitante que considera los modelos del subsuelo como resortes aislados sin incluir directamente los efectos de interacción suelo – estructura para una obra de diseño.

El desarrollo de metodologías de análisis más pragmático se encuentra un poco abandonado por las ventajas que presentan los modelos computacionales, sin embargo, estos métodos pueden ser fuente de diversos errores si no se seleccionan bien los parámetros y propiedades del suelo, corriendo el riesgo que se confíe ciegamente en los resultados. En los programas de análisis estructural se representa al suelo por medio de resortes equivalentes, no obstante, aún no permiten modelar la interacción suelo – estructura sin recurrir a cálculos iterativos para encontrar la solución.

El método que se plantea en este trabajo involucra la utilización de elementos reticulares en tres dimensiones como representación de la estructura de diseño, incluyendo los seis grados de libertad para cada uno de los nudos que conecta la estructura definida por elementos tipo viga. Para la aplicación del método se actualiza el programa EMISES3D compilado en lenguaje QBASIC, generando una versión en lenguaje FORTRAN que incluye el aumento de la capacidad de cálculo de los elementos y nudos, como también las dimensiones de las matrices de interacción para la estructura que se desea modelar.

En el análisis de interacción suelo – elemento de contención se requiere del uso de los resultados de las pruebas de laboratorio, las campañas de exploración y la instrumentación instalada para medir desplazamientos horizontales (inclinómetros) y niveles piezométricos, con el objetivo de plantear un modelo geotécnico del subsuelo que represente el estado de esfuerzos del terreno para cada etapa en la obra.



Las etapas de modelado del procedimiento de excavación implican cambios de esfuerzos en la masa del suelo, cuya determinación es fundamental para la comprensión del fenómeno de interacción con la estructura; por lo tanto, se requiere analizar los elementos de contención como lo son: el muro Milán, la tablestaca de acero y una mega zapata perimetral que estarán sometidos a variaciones de esfuerzos calculados a partir de la teoría de Mindlin y de Boussinesq para los casos de cargas uniformes en áreas rectangulares asumiendo que el suelo está en el rango elástico.

Por el alto costo de las licencias oficiales del software de modelado y el tiempo requerido de aprendizaje, se debe enfatizar en la creación de software gratuito para la comunidad como herramienta práctica que utilice las metodologías analíticas e investigaciones actuales, incluyendo los efectos de interacción para un análisis eficiente del comportamiento geotécnico – estructural.



3. MARCO TEÓRICO

El análisis de los problemas geotécnicos en edificaciones de gran altura ha sido fundamental para el desarrollo de nuevas metodologías tanto de construcción como de diseño. El elemento de contención de 50 metros de profundidad utilizado para la excavación de la edificación de estudio es el muro Milán, definido como un muro perimetral unido por medio de tableros colados in situ en ocasiones troquelados o anclados según sea el caso.

Por medio de esta propuesta de cálculo se busca implementar de manera eficiente los efectos de deformación del suelo sometido a cambio de esfuerzos y la estructura que se desea incorporar en el terreno. Para realizar el análisis de interacción se considera un sistema suelo – elemento de contención que incorpora en una matriz global la rigidez de la estructura con la rigidez del suelo utilizando retículas que simulan el elemento de contención que está en contacto directo con el suelo.

El procedimiento constructivo es primordial para describir cada una de las etapas a las cuales se ve sometido el suelo y la estructura de contención, que equivale a cambios de estado de esfuerzos internos que generaron deformaciones del suelo y que fueron registradas por los inclinómetros instalados en el muro Milán.

La condición de estado de esfuerzos inicial de la masa de suelo es fundamental y debe ser conocida ya que normalmente corresponde al estado de reposo, el cual se ve afectado por el alivio de esfuerzos que genera la excavación del volumen de suelo determinado. En el momento que se cuela el muro dentro del suelo se producen esfuerzos laterales que afectan nuevamente la condición de esfuerzos en reposo, pero se considera como un efecto temporal mientras dura el fraguado.

Una vez construido el muro Milán perimetral las etapas de excavación se desarrollan a distintas profundidades. Para el caso de la primera etapa que se excava y se generan alivios de esfuerzos y expansiones, se estima el cambio de esfuerzos aplicando la teoría de Mindlin y Boussinesq considerando el suelo como un medio continuo y el muro como una estructura de retículas conectadas lateralmente.



La determinación de las presiones de contacto y los desplazamientos horizontales en los elementos de contención de una excavación se deben a la rigidez de la estructura, a las propiedades de compresibilidad del suelo, a las cargas aplicadas (incrementos o decrementos) y a la secuencia constructiva que se siga para la realización de la obra.

En definitiva, se requiere obtener la matriz de rigidez global de los elementos por medio de la interacción suelo – elemento de contención aplicando la metodología de Zeevaert detallada más adelante y las presiones de contacto activas y pasivas. Este procedimiento se repite para cada una de las profundidades de excavación hasta que se alcance el nivel definido de diseño.

3.1 Estado de esfuerzos en el suelo

El análisis del estado de esfuerzos en el suelo durante el procedimiento constructivo es fundamental para evitar un estado de falla al rebasar la resistencia del suelo; los incrementos de esfuerzos dependen de la magnitud de la carga, la geometría y forma de la estructura, la profundidad de desplante, entre otros factores principales que son definidos a partir de la obra de ingeniería a construir.

La aplicación de la teoría de la elasticidad para el cálculo de la distribución esfuerzos en el suelo es útil para dar solución a problemas en ingeniería; esta teoría tiene diversas hipótesis como el considerar al suelo como un medio continuo, homogéneo e isótropo, y plantea una relación lineal entre esfuerzos y deformaciones, condiciones que no son siempre válidas en el terreno.

Mientras que la teoría de la elasticidad llega a ser válida en las estructuras por su homogeneidad, en el caso de los suelos puede presentar inexactitudes debido a las hipótesis que se plantean y las condiciones reales que son simplificadas en el cálculo; sin embargo, para los alcances de diseño de una obra de ingeniería las soluciones aproximadas obtenidas por las teorías adoptadas en este trabajo llegan a ser suficientes para estimar resultados razonables desde el punto de vista de la práctica profesional.

Por lo tanto, se han desarrollado teorías por diversos autores que proponen la distribución de esfuerzos considerando las hipótesis ya mencionadas para cargas puntuales, rectangulares, circulares, dentro de la masa del suelo, entre otros casos mencionados.

Una propuesta para el cálculo de la distribución de esfuerzos es la de J. V. Boussinesq (1885) la cual considera un medio continuo, elástico, homogéneo e isótropo sometido a una carga puntual en su superficie. Acorde con los problemas en ingeniería (cimientos profundos, suelos estratificados, suelos colapsables, etc.) han sido desarrolladas soluciones para estimar la influencia de las cargas aplicadas dentro del medio (Mindlin, 1936), la solución de Westergaard (1938) para el caso de un suelo fuertemente estratificado y la solución de Fröhlich (1942) que incluye un coeficiente de rigidez para el cálculo de los esfuerzos en la masa de suelo.

A continuación, se detallan las metodologías utilizadas para el modelo de interacción suelo – estructura aplicando la solución de Boussinesq (1885) y Holl (1940) debido a una carga vertical uniformemente distribuida en un área rectangular y la integración de la solución de Mindlin (1936) para carga horizontal uniformemente distribuida en un área rectangular, entre otras.

3.1.1. Solución de Boussinesq (1885)

Para determinar la distribución de esfuerzos propuesta por Boussinesq (1885), se plantea una solución para una carga puntual de magnitud “ Q ” aplicada en la superficie del medio semi-infinito, homogéneo, isótropo y elástico-lineal producida a una profundidad “ z ” respecto a la superficie en un punto “ P ” con coordenadas “ x, y, z ” como se indica en la Figura 3.1.

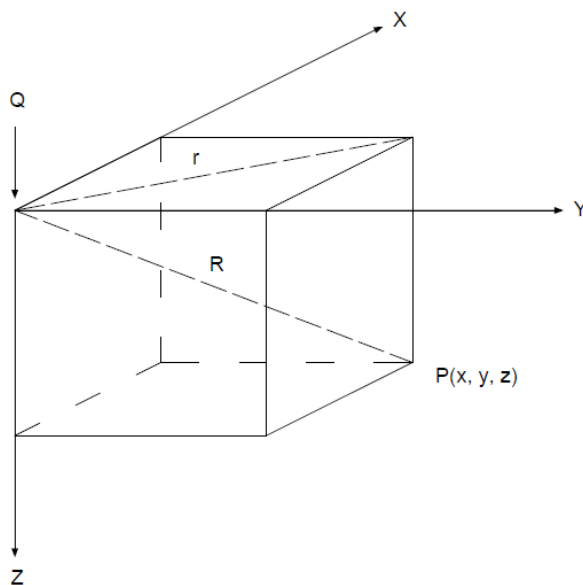


Figura 3.1. Solución de Boussinesq para carga puntual.



En coordenadas cartesianas se expresan las Ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) para la obtención de los esfuerzos en las tres direcciones del sistema.

$$\Delta\sigma_x = \frac{3Q}{2\pi} \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{R^3(R+z)^2} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (3.1)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{3Q}{2\pi} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{R^3(R+z)^2} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (3.2)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} \quad (3.3)$$

Las Ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6) permiten obtener los esfuerzos cortantes actuantes.

$$\Delta\tau_{xy} = \frac{3Q}{2\pi} \left[\frac{xyz}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \frac{(2R+z)xy}{R^3(R+z)^2} \right] \quad (3.4)$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{3Qxz^2}{2\pi R^5} \quad (3.5)$$

$$\Delta\tau_{yz} = \frac{3Qyz^2}{2\pi R^5} \quad (3.6)$$

Para una carga unitaria y utilizando la relación geométrica $r^2 = x^2 + y^2$ y $R^2 = z^2 + r^2$ se determina el valor I_{Bq} como el valor de influencia de Boussinesq indicado en la Ecuación (3.7).

$$I_{Bq} = \frac{3}{2\pi} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2} \right]^{5/2} \quad (3.7)$$

Al reescribir la Ecuación (3.3) para esfuerzo en dirección z a partir del valor de influencia I_{Bq} se obtiene la Ecuación (3.8) simplificada.

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} [I_{Bq}] \quad (3.8)$$

- **Solución para determinar el cambio de esfuerzo producido por una carga uniforme vertical en un área rectangular para un coeficiente de Poisson $\nu = 0.5$**

Holl (1940) propone una solución para calcular la distribución de esfuerzos en un medio semi-infinito con $\nu = 0.5$ debido a la aplicación de una carga rectangular uniforme vertical “Q” en un punto “P” con coordenadas “x,y,z” a una profundidad “z_p” como se muestra en la Figura 3.2.

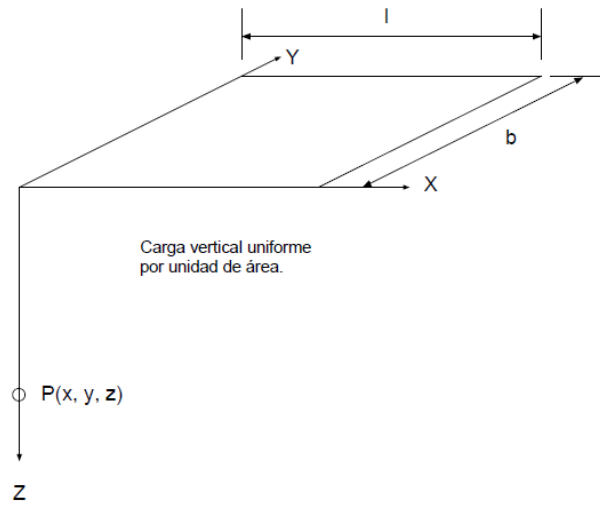


Figura 3.2. Solución de Holl para carga rectangular uniforme vertical.

Para el cálculo de la distribución de esfuerzos normales y cortantes se aplican las Ecuaciones del número (3.9) a la (3.14).

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{2\pi} \left[\text{ArcTan} \frac{lb}{zR_3} + \frac{lbz}{R_3} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{Q}{2\pi} \left[\text{ArcTan} \frac{lb}{zR_3} - \frac{lbz}{R_1^2 R_3} \right] \quad (3.10)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{Q}{2\pi} \left[\text{ArcTan} \frac{lb}{zR_3} - \frac{lbz}{R_2^2 R_3} \right] \quad (3.11)$$

$$\tau_{xz} = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{b}{R_2} - \frac{z^2 b}{R_1^2 R_3} \right] \quad (3.12)$$



$$\tau_{yz} = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{l}{R_1} - \frac{z^2 l}{R_2^2 R_3} \right] \quad (3.13)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{2\pi} \left[1 + \frac{z}{R_3} - z \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right] \quad (3.14)$$

Por geometría se obtiene:

$$R_1^2 = l^2 + z^2$$

$$R_2^2 = b^2 + z^2$$

$$R_3^2 = l^2 + b^2 + z^2$$

- **Solución para determinar el cambio de esfuerzo producido por una carga uniforme vertical en un área rectangular para un coeficiente de Poisson “ ν ” diferente de 0.5**

Para calcular los esfuerzos normales en suelos se aplica la Ecuación (3.15) y (3.16) planteada por Dashkó y Kagán (1980) que involucra la variación del coeficiente de Poisson “ ν ”.

$$\sigma_x = \frac{q}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{xyz}{(y^2 + z^2)B} - \tan^{-1} \frac{zB}{xy} + (1 - 2\nu) \left(\tan^{-1} \frac{x}{y} - \tan^{-1} \frac{xB}{yz} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$\sigma_y = \frac{q}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{xyz}{(x^2 + z^2)B} - \tan^{-1} \frac{zB}{xy} + (1 - 2\nu) \left(\tan^{-1} \frac{y}{x} - \tan^{-1} \frac{yB}{xz} \right) \right] \quad (3.16)$$

Por geometría se obtiene:

$$B = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

- **Solución para determinar el cambio de esfuerzo producido por una carga rectangular vertical de longitud infinita.**

Para el cálculo de la distribución de esfuerzos debido a una carga rectangular de longitud infinita “Q” en un punto “P” con coordenadas “x,y,z” a una profundidad “z_p” se propone la solución de Terzaghi y Carothers (1934) como se indica en la Figura 3.3.

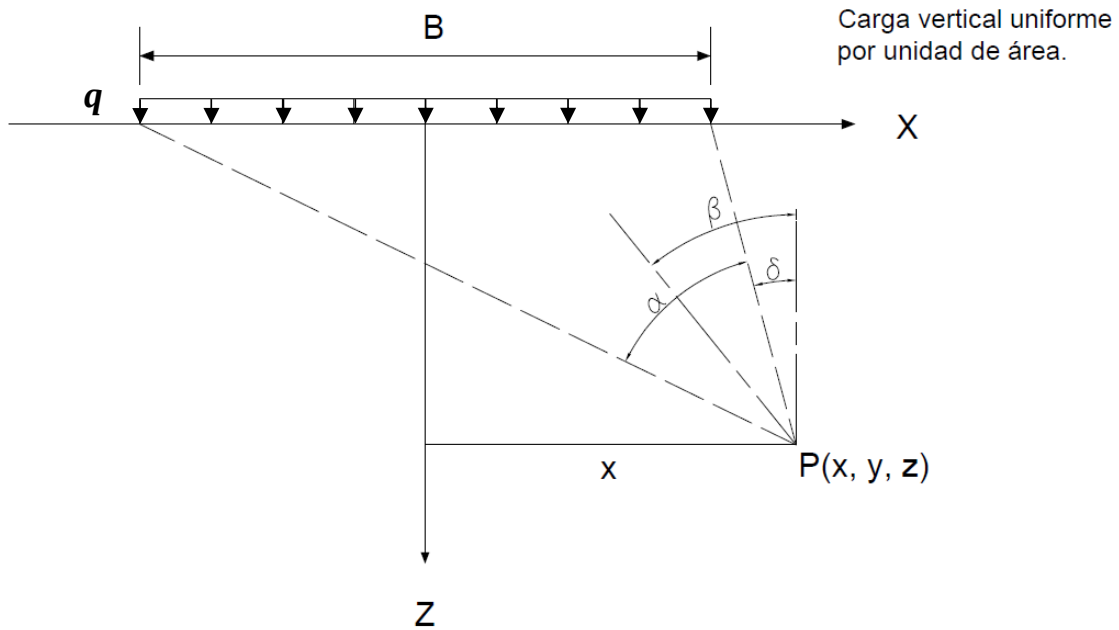


Figura 3.3. Solución de Terzaghi y Carothers para carga rectangular vertical infinita.

Al considerar una franja de carga de ancho dB , la carga por longitud unitaria es equivalente a

$$dQ = q dB$$

La franja por longitud de área se analiza como una carga lineal y el cálculo del incremento del esfuerzo vertical en el punto “P” se integra para todo el ancho B de la carga. En las Ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) se presenta la solución para carga rectangular vertical de longitud infinita.

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos 2\beta) \quad (3.17)$$



$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}(\alpha - \text{sen } \alpha \cos 2\beta) \quad (3.18)$$

$$\tau_{xz} = \frac{q}{\pi} \text{sen } \alpha \text{ sen } 2\beta \quad (3.19)$$

Para calcular los esfuerzos principales y el cortante máximo en el punto “P” se presentan las Ecuaciones (3.20), (3.21) y (3.22).

$$\sigma_1 = \frac{q}{\pi}(\alpha + \text{sen } \alpha) \quad (3.20)$$

$$\sigma_3 = \frac{q}{\pi}(\alpha - \text{sen } \alpha) \quad (3.21)$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{q}{\pi} \text{sen } \alpha \quad (3.22)$$

3.1.2. Solución de Mindlin (1936)

Esta solución permite determinar el cambio de los esfuerzos que actúan en una partícula dentro de una masa del suelo debido a efectos de carga tanto horizontal como vertical en un medio semi-infinito, homogéneo e isótropo a una profundidad “Zi” como se indica a continuación.

- Solución para determinar el esfuerzo vertical producido por una carga vertical Qv.

Para calcular el cambio de esfuerzo vertical $\Delta\sigma_z$ en un punto “P” con coordenadas “x,y,z”, que produce una carga puntual vertical de magnitud “Qv”, que se aplica dentro de un medio con las hipótesis de elasticidad ya mencionadas, a una profundidad “Zc” respecto a la superficie como se muestra en la Figura 3.4 se utiliza la Ecuación (3.23).

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q_v}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)(z-z_c)}{R_1^3} - \frac{3(3-4\nu)z(z+z_c)^2 - 3z_c(z+z_c)(5z-z_c)}{R_2^5} - \frac{30z z_c (z+z_c)^3}{R_2^7} - \frac{(1-2\nu)(z-z_c)}{R_1^3} - \frac{3(z-z_c)^3}{R_1^5} \right] \quad (3.23)$$

- Solución para determinar el esfuerzo horizontal producido por una carga horizontal Q_H .

Para calcular el cambio de esfuerzo horizontal $\Delta\sigma_H$ en un punto “P” con coordenadas “ x,y,z ”, que produce una carga puntual horizontal de magnitud “ Q_H ”, que se aplica dentro de un medio con las hipótesis de elasticidad ya mencionadas, a una profundidad “ Z_c ” respecto a la superficie como se muestra en la Figura 3.4 se requiere utilizar la Ecuación (3.24).

$$\Delta\sigma_x = \frac{Q_H}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)(5-4\nu)}{R_2^3} - \frac{3(3-4\nu)x^2}{R_2^5} - \frac{3x}{R_1^5} - \frac{(1-2\nu)}{R_1^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+z_c)^2} \left(3 - \frac{x^2(3R_2+z+z_c)}{R_2^2(R_2+z+z_c)} \right) + \frac{6z_c}{R_2^5} \left(3z_c - (3-2\nu)(z+z_c) + \frac{5x^2z}{R_2^2} \right) \right] \quad (3.24)$$

Por geometría se obtiene:

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$R_1^2 = r^2 + (z_p - z_c)^2$$

$$R_2^2 = r^2 + (z_p + z_c)^2$$

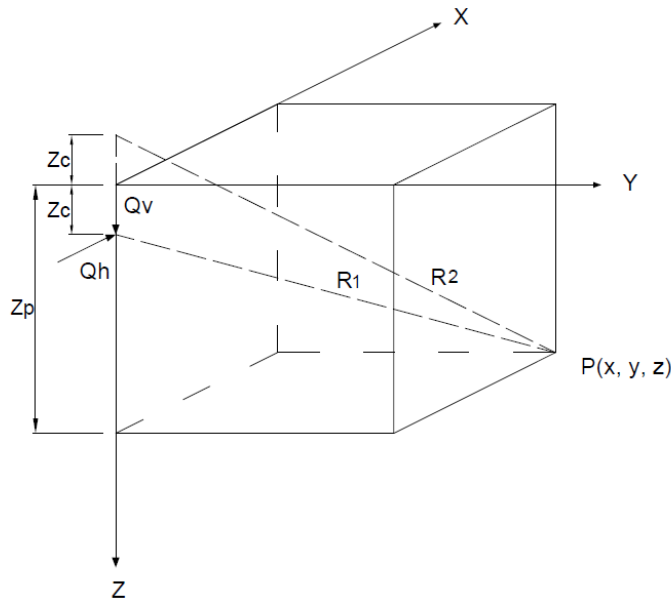


Figura 3.4. Solución de Mindlin para carga puntual.



- **Integración de la distribución de esfuerzos para carga horizontal rectangular.**

Ya definidas las expresiones para calcular los cambios de esfuerzo en dirección horizontal y vertical para carga puntual propuestas por Mindlin (1936), se realiza la integración de la Ecuación (3.24) para estimar el incremento de esfuerzos laterales debido a una carga rectangular horizontal dentro de un medio semi-infinito, homogéneo e isótropo.

El punto “P” con coordenadas “ x, y, z ” donde se quiere calcular el cambio de esfuerzo horizontal $\Delta\sigma_H$ se encuentra a una profundidad “ z_p ” con respecto a la superficie horizontal. El sistema de referencia se ubica en el punto “P” de estudio, por lo tanto, se modifica el sistema coordenado de los vértices del rectángulo de la carga uniforme aplicada siendo: $V_1(x, y_{\min}, z_{\min})$, $V_2(x, y_{\min}, z_{\max})$, $V_3(x, y_{\max}, z_{\min})$ y $V_4(x, y_{\max}, z_{\max})$ como se indica en la Figura 3.5.

Se requiere realizar un cambio de variable para obtener la integral en términos directos de las coordenadas del punto “P” de la siguiente forma:

$$z = z_p - z_c$$

$$z_c = z_p - z \quad (3.25)$$

$$z_p + z_c = z + 2 z_c \quad (3.26)$$

Sustituyendo la Ecuación (3.25) en la Ecuación (3.26), se obtiene:

$$z_p + z_c = z + 2(z_p - z)$$

$$z_p + z_c = z + 2z_p - 2z$$

$$z_p + z_c = 2z_p - z \quad (3.27)$$

$$z_p - z_c = z_p - (z_p - z)$$

$$z_p - z_c = z \quad (3.28)$$

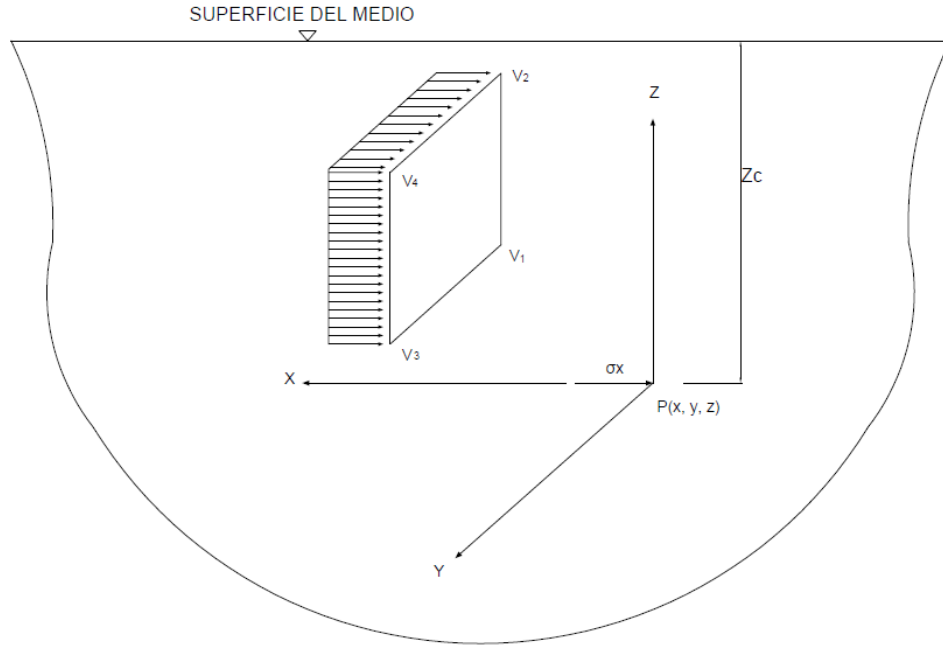


Figura 3.5. Carga rectangular horizontal uniformemente distribuida.

A partir de la Ecuación (3.27) y (3.28) se expresan las variables R_1 y R_2 de la forma:

$$R_1^2 = r^2 + z^2 \quad (3.29)$$

$$R_2^2 = r^2 + (2z_p - z)^2 \quad (3.30)$$

Se reescriben las variables geométricas iniciales para simplificar la integración de la ecuación principal, obteniendo los siguientes términos:

$$R^2 = x_c^2 + y^2 + z^2$$

$$R_a^2 = x_c^2 + y^2$$

$$R_b^2 = x_c^2 + z^2$$

$$R_c = z - 2z_p$$

$$R_{cz}^2 = x_c^2 + y^2 + R_c^2$$



Si “ ν ” es la relación de Poisson del medio semi-infinito y “ w ” es la presión lateral aplicada, se obtiene la Ecuación (3.31) para el cálculo del incremento de esfuerzo lateral debido a una carga horizontal uniforme en un área rectangular de la siguiente manera:

$$\Delta\sigma_x = \left(a \sum_{i=1}^9 a_i I_i \right) w \quad (3.31)$$

Los factores I_i y a_i para la solución de la Ecuación (3.31) se describen a continuación:

$$a = -\frac{x}{8\pi(1-\nu)}$$

$$a_1 = 2\nu - 1$$

$$a_2 = (2\nu - 1)(4\nu - 5)$$

$$a_3 = -3x^2$$

$$a_4 = 3(4\nu - 3)x^2$$

$$a_5 = 12(1-\nu)(2\nu - 1)$$

$$a_6 = 4(\nu - 1)(2\nu - 1)x^2$$

$$a_7 = 18$$

$$a_8 = 6(2\nu - 3)$$

$$a_9 = 30x^2 z_p$$

$$I_1 = \iint \frac{1}{R_1^3} dydz$$

$$I_2 = \iint \frac{1}{R_2^3} dydz$$

$$I_3 = \iint \frac{1}{R_1^5} dydz$$

$$I_4 = \iint \frac{1}{R_2^5} dydz$$

$$I_5 = \iint \frac{1}{R_2(R_2 + 2z_p - z)^2} dydz$$

$$I_6 = \iint \frac{3R_2 + 2z_p - z}{R_2^3(R_2 + 2z_p - z)^3} dydz$$

$$I_7 = \iint \frac{(z_p - z)^2}{R_2^5} dydz$$

$$I_8 = \iint \frac{(2z_p - z)(z_p - z)}{R_2^5} dydz$$

$$I_9 = \iint \frac{z_p - z}{R_2^7} dydz$$



La integración de cada una de los factores I_i descritos anteriormente se puede obtener por medio del uso de funciones equivalentes F_i aplicando la Ecuación (3.32).

$$I_i = F_i(y_{m\acute{a}x}, z_{m\acute{a}x}) - F_i(y_{m\acute{i}n}, z_{m\acute{a}x}) - F_i(y_{m\acute{a}x}, z_{m\acute{i}n}) + F_i(y_{m\acute{i}n}, z_{m\acute{i}n}) \quad (3.32)$$

Finalmente, las funciones F_i se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$F_1 = \frac{\text{ArcTan}\left[\frac{yz}{x_c R}\right]}{x_c}$$

$$F_2 = \frac{\text{ArcTan}\left[\frac{yR_c}{x_c R_{cz}}\right]}{x_c}$$

$$F_3 = z \frac{\left(\frac{x_c y (x_c^2 + R^2)}{R_a^2 R_b^2 R} + \frac{\text{ArcTan}\left[\frac{yz}{x_c R}\right]}{z} \right)}{3 x_c^3}$$

$$F_4 = \frac{1}{3} R_c \left(\frac{y(2x_c^2 + y^2 + R_c^2)}{x_c^2 R_a^2 (x_c^2 + R_c^2) R_{cz}} + \frac{\text{ArcTan}\left[\frac{yR_c}{x_c R_{cz}}\right]}{x_c^3 R_c} \right)$$

$$F_5 = \frac{1}{2x_c^3} \left(\frac{x_c y R_{cz} R_c}{R_a^2} + \frac{x_c y R_c^2}{R_a^2} + (x_c^2 + R_c^2) \text{ArcTan}\left[\frac{y}{x_c}\right] \right. \\ \left. + (x_c^2 + R_c^2) \text{ArcTan}\left[\frac{y R_c}{x_c R_{cz}}\right] \right)$$



$$F_6 = \frac{1}{2x_c^5} R_c \left(\frac{x_c y (5x_c^2 + 3y^2) R_{cz}}{R_a^4} + \frac{2x_c^3 y R_c}{R_a^4} + \frac{3x_c y R_c}{R_a^2} \right. \\ \left. + 3R_c \operatorname{ArcTan} \left[\frac{y}{x_c} \right] + \frac{(x_c^2 + 3R_c^2) \operatorname{ArcTan} \left[\frac{yR_c}{xR_{cz}} \right]}{R_c} \right)$$

$$F_7 = \frac{1}{3} \left(- \frac{y (x_c^4 z - (y^2 + R_c^2) R_c z_p^2 + x_c^2 (y^2 z - 2R_c z_p^2))}{x_c^2 R_a^2 (x_c^2 + R_c^2) R_{cz}} \right. \\ \left. + \frac{(x_c^2 + z_p^2) \operatorname{ArcTan} \left[\frac{yR_c}{x_c R_{cz}} \right]}{x_c^3} \right)$$

$$F_8 = \frac{1}{3} \left(\frac{y(z_p - z)}{(x_c^2 + R_c^2) R_{cz}} + \frac{\operatorname{ArcTan} \left[\frac{yR_c}{x_c R_{cz}} \right]}{x_c} \right)$$

$$F_9 = \frac{1}{15} z_p \left(\frac{1}{R_c^3} y R_{cz} \left(\frac{R_c^2 (z - z_p)}{(x_c^2 + R_c^2) R_{cz}^2} + \frac{(x_c^2 - 3R_c^2) z_p}{x_c^4 R_a^2} - \frac{2R_c^2 z_p}{x_c^2 R_a^4} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2z^3 - 11z^2 z_p + 20z z_p^2 - z_p (x_c^2 + 12z_p^2)}{(x_c^2 + R_c^2)^2 R_{cz}^2} \right) \right. \\ \left. - \frac{3 z_p \operatorname{ArcTan} \left[\frac{yR_c}{x_c R_{cz}} \right]}{x_c^5} \right)$$



3.2 Presiones laterales en el suelo

Para realizar excavaciones a profundidad en una obra se debe hacer uso de elementos de contención que garanticen la estabilidad del suelo debido al cambio en los estados de esfuerzos; estos cambios se traducen en presiones horizontales que deben ser calculados para evitar un estado de falla o deformaciones considerables en el terreno.

Los desplazamientos en la masa del suelo generan una nueva distribución de esfuerzos, lo cual produce presiones laterales que se transmiten a los elementos de contención existentes en la obra. Por lo tanto, para estimar estas presiones se deben conocer las propiedades de resistencia del suelo, los esfuerzos iniciales, las cargas actuantes y las condiciones hidráulicas para hacer uso de una metodología que involucre el comportamiento de los materiales existentes.

Cuando la masa de suelo no ha sido sometida a cambios de estado de esfuerzo, los esfuerzos verticales y los horizontales guardan una relación conocida como *coeficiente de empuje de tierras en reposo* K_0 , dado por la Ecuación (3.33).

$$K_0 = \frac{\sigma'_x}{\sigma'_y} \quad (3.33)$$

La condición que representa el coeficiente de empujes de tierras en reposo es equivalente a una estructura de retención en equilibrio con el terreno, es decir, la estructura soporta adecuadamente las cargas y los empujes laterales transmitidos sin afectaciones.

Al momento de producirse un cambio en el estado de esfuerzos en el suelo, la estructura de retención debe estar diseñada para soportar adecuadamente las variaciones en las presiones laterales que se generan. Si la estructura cede o se desplaza, los esfuerzos horizontales van a disminuir, por lo tanto, el coeficiente de presión de tierra K_0 cambia y la relación entre esfuerzos horizontales y verticales para la condición mencionada se conoce como *coeficiente de empuje de tierras activo* K_a que se indica en la Ecuación (3.34).

$$K_a = \frac{\sigma'_{xa}}{\sigma'_{ya}} \quad (3.34)$$

En el caso que la estructura de retención empuje hacia el suelo los esfuerzos horizontales aumentan, en donde la relación de esfuerzos para esta condición se define como *coeficiente de empuje de tierras pasivo* K_p dado por la Ecuación (3.35).

$$K_p = \frac{\sigma'_{xp}}{\sigma'_{yp}} \quad (3.35)$$

Se representa el estado de equilibrio del suelo, el estado pasivo y activo generados por variaciones en el terreno en la Figura 3.6. Tanto el estado activo como el pasivo equivalen a condiciones de falla en el suelo que deben ser calculadas adecuadamente para estimar los efectos de las deformaciones.

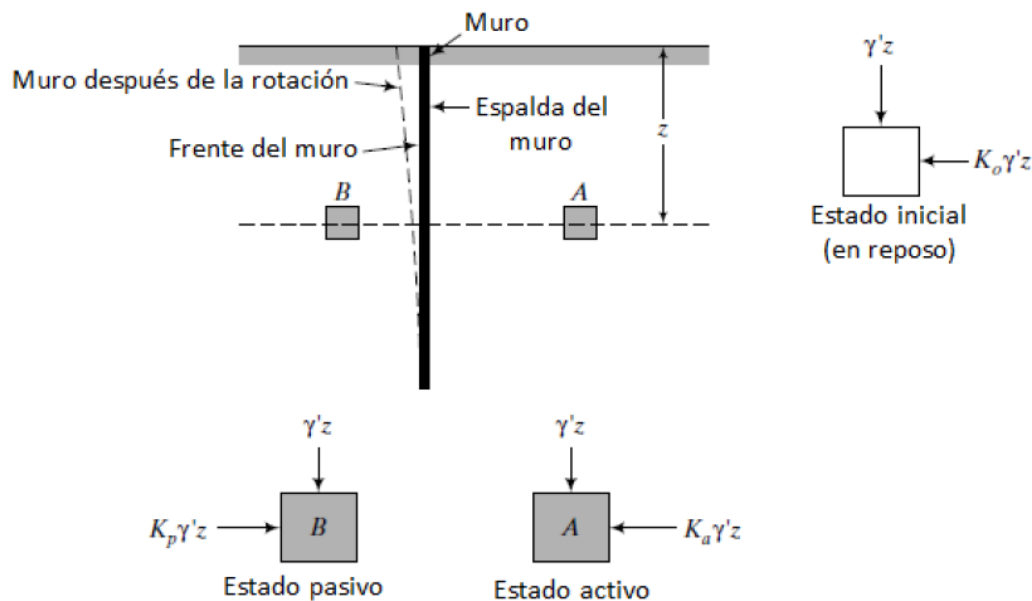


Figura 3.6. Estado de esfuerzos laterales en el suelo para una estructura de retención.
(Budhu, 2011)

Por medio del Círculo de Mohr se pueden identificar los estados a los cuales se somete el suelo debido a los cambios en la distribución de esfuerzos. En la Figura 3.7 se define en términos de esfuerzos efectivos el estado inicial de reposo y dos círculos adicionales que representan los estados activos y pasivos en el terreno; la línea superior identifica los esfuerzos máximos a los cuales se puede someter la masa del suelo antes de producirse la falla en la obra.

La envolvente de falla de Mohr-Coulomb se define por la siguiente ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Aplicando la ley de resistencia para la envolvente de falla en el caso de la *presión activa de Rankine* se forma un ángulo en el suelo de $\pm 45^\circ + \frac{\phi'}{2}$ con la horizontal. Para que exista la condición de presión activa debe ceder el muro y los desplazamientos ser de aproximadamente 0.001H a 0.004H en suelos granulares o 0.01H a 0.04H en suelos cohesivos.

Para calcular la distribución de presiones en el suelo a cualquier profundidad del elemento de retención se hace uso de la Ecuación (3.36) que involucra los parámetros de resistencia.

$$\sigma_a' = \sigma_o' K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad (3.36)$$

A la profundidad $z = 0$ la presión activa equivale a $\sigma_a' = -2c' \sqrt{K_a}$ lo que indica que existen esfuerzos de tensión en el suelo que disminuyen hasta cierta profundidad z_c , la cual se puede calcular al despejar la Ecuación (3.36).

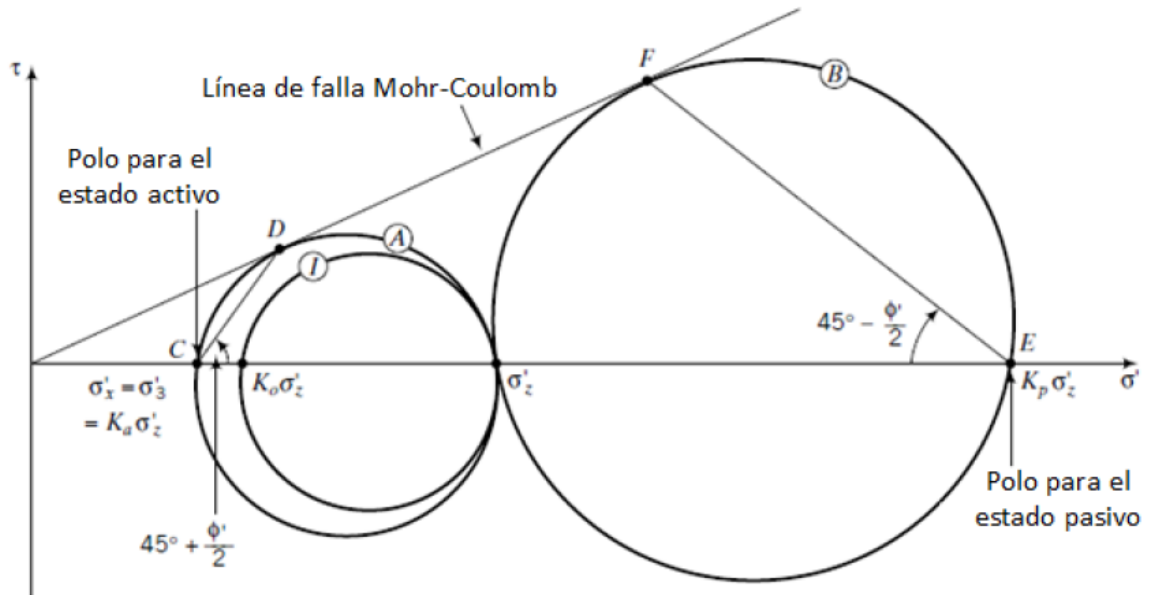


Figura 3.7. Círculo de Mohr para estados activos y pasivos del suelo.
(Budhu, 2011)

Para que exista la condición de presión pasiva debe movilizarse el muro contra la masa del suelo y los desplazamientos ser de aproximadamente $0.005H$ para arena densa, $0.01H$ para arena suelta y firme, y $0.05H$ para arcilla blanda como se muestra en la Figura 3.8.

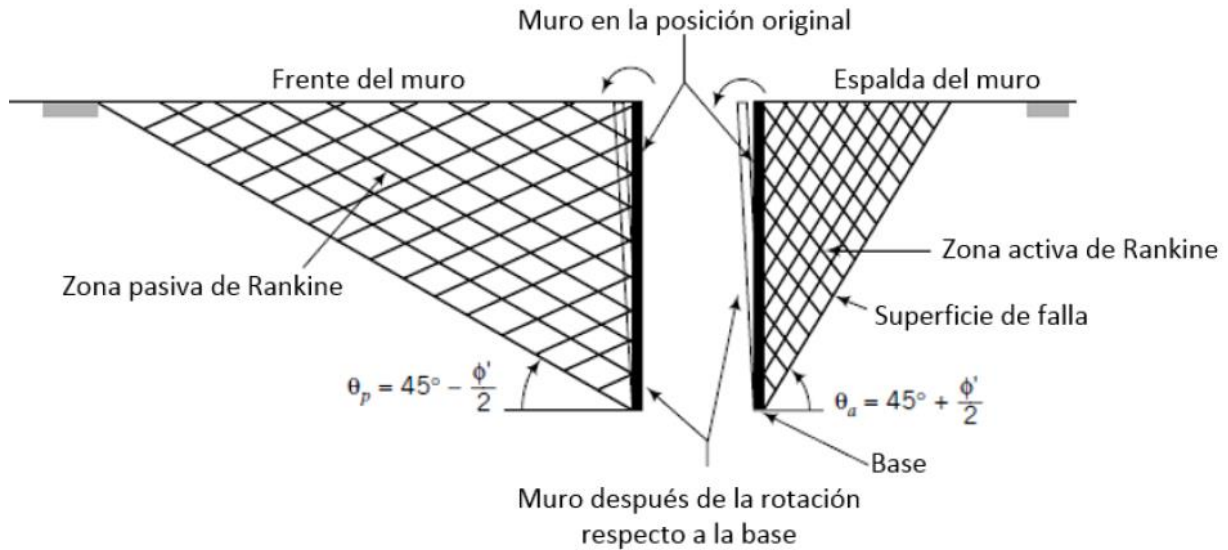


Figura 3.8. Planos de deslizamiento en la masa del suelo cerca del elemento de contención.
(Budhu, 2011)

La envolvente de falla en el caso de la *presión pasiva de Rankine* forma un ángulo en el suelo de $\pm 45^\circ - \frac{\phi'}{2}$ con la horizontal.

Para calcular la distribución de presiones en el suelo a cualquier profundidad del elemento de retención se hace uso de la Ecuación (3.37) que involucra los parámetros de resistencia.

$$\sigma_p' = \sigma_o' K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad (3.37)$$

A la profundidad $z = 0$ la presión pasiva equivale a $\sigma_p' = 2c' \sqrt{K_p}$ en donde existen esfuerzos de compresión en el suelo que se incrementan hasta la profundidad $z = H$ equivalente a una presión de $\sigma_p' = \gamma H K_p + 2c' \sqrt{K_p}$.



3.3 Muros Milán

Un sistema de retención estructural utilizado comúnmente en las obras de construcción es el muro Milán; esta estructura de contención en concreto reforzado, según sea el diseño de la obra, llega a ser temporal o definitivo y tiene por objetivo el resistir los empujes laterales del terreno. La aplicación de este tipo de muro en México se remonta al año 1967 para la construcción del metro en las arcillas blandas estudiadas por el Ing. Enrique Tamez.

El muro Milán se usa en excavaciones a cielo abierto acompañado de troqueles y/o anclas dependiendo del diseño de la edificación; este tipo de muro facilita la implementación de procedimientos como el sistema “Top-Down” muy común en edificaciones de grandes dimensiones para la construcción de estructuras subterráneas como los sótanos.

Dentro de las ventajas de este tipo de muro se conocen las siguientes: puede ser aplicado en distintos tipos de suelo, al momento de la construcción se producen pocas vibraciones debido a la maquinaria de almeja reduciendo los efectos indirectos en las colindancias del terreno, se reducen los tiempos de la obra al utilizarse elementos prefabricados y en términos económicos, resulta más viable que el uso de tablestacas de concreto o de acero.

A continuación, se describe el procedimiento constructivo para un muro Milán y las generalidades para su correcta ejecución referido a la Figura 3.9.

Para iniciar la construcción se requiere realizar una zanja en el suelo de longitud de 6.0 m excavando con el uso de una almeja y verificando la verticalidad como se identifica en la Figura 3.9 (1). Se debe estar atento ante la presencia de aguas freáticas cercanas a la superficie o fugas dentro del terreno, las cuales generan inestabilidad en el material; por lo tanto, debe existir un control sobre las condiciones hidráulicas con el fin de proteger la obra.

Al momento de ejecutar la excavación de la zanja se utiliza lodo bentonítico o polímeros para estabilizar las paredes internas. El empleo de este tipo de lodo se remonta a 1910 en Italia utilizado para las excavaciones realizadas en un subsuelo aluvial con presencia de limos y arenas saturadas que generaba problemas en las construcciones; esta técnica de estabilización se difunde debido al desarrollo de infraestructura para la reconstrucción de los daños de la segunda guerra mundial.



El lodo bentonítico debe ir reemplazando al material excavado con la precaución de mantener la carga hidrostática sobre las paredes del terreno como se indica en la Figura 3.9 (2). Dentro de la programación de obra, debe contarse con la cantidad de lodo necesario para la construcción de cada uno de los paneles al momento de su ejecución en donde, según criterio, se puede reutilizar para los demás módulos.

Las paredes de la zanja excavada deben ser estables durante toda la etapa de construcción, ya que pueden generarse derrumbes de las paredes y oquedades lo cual se traduce en deficiencias del elemento de contención. Con respecto al suelo acumulado en el fondo es fundamental su remoción con el fin de evitar la contaminación de la mezcla de concreto y su lechada.

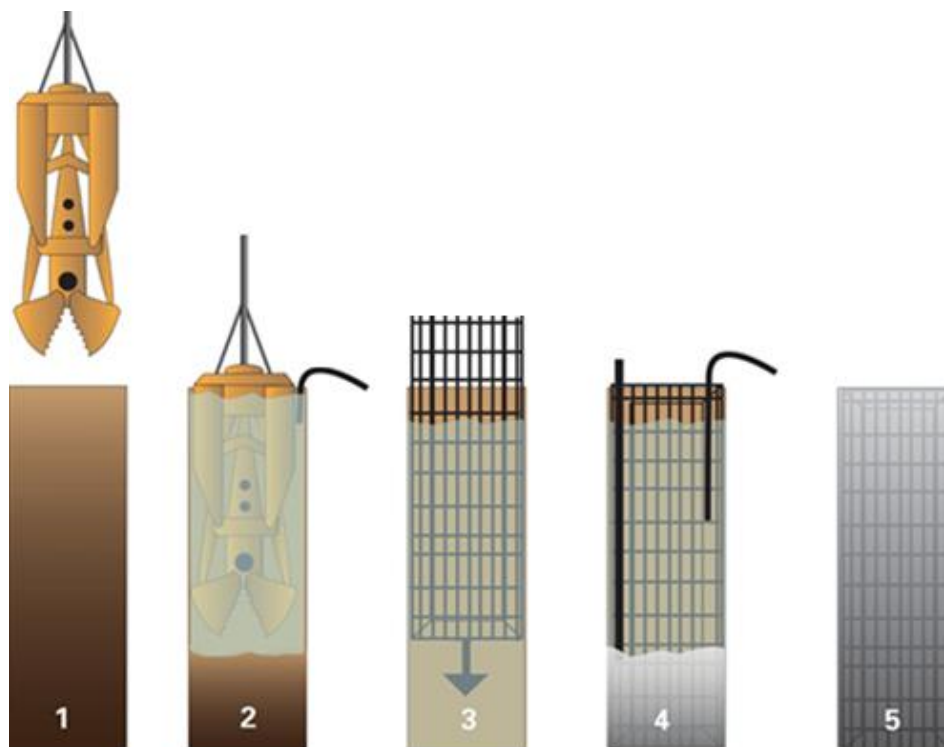
Al terminar la excavación de cada módulo se necesita extraer del fondo de la zanja el material desprendido derivado de esta actividad; el lodo del fondo se extrae con material suelto aplicando aire a presión o una bomba eléctrica sumergible que permita realizar este procedimiento para continuar con la instalación del refuerzo.

Para la instalación del acero de refuerzo dentro de la zanja se utilizan balancines con puntos de izaje y centradores para su ubicación como se muestra en la Figura 3.9 (3); la estructura de acero debe descender lentamente evitando se generen deformaciones por peso propio y a la vez controlando la verticalidad verificando coincidan los elementos con los puntos topográficos dentro de la zanja.

Finalizada la ubicación del refuerzo se procede al colado del muro utilizando una tubería tipo Tremie como se presenta en la Figura 3.9 (4) y (5); esta tubería debe tener un diámetro interno por lo menos seis veces del tamaño máximo del agregado de la mezcla de concreto para ser utilizado y se integra por tramos unidos de 3.0 m que alcancen la longitud del muro. Se recomienda el uso de tuberías de 10” de diámetro con un espesor de 8 mm para que el concreto fluya sin problema dentro de la zanja ya que requiere estar embebido hasta el fondo, realizando un desplazamiento continuo y en el menor tiempo posible.

Con respecto al diseño de un muro Milán, es fundamental conocer el estado de esfuerzo del suelo y los cambios a los cuales se someterá debido a los procesos constructivos para estimar su respuesta.

Siendo así, el proceso de excavación y las sobrecargas aplicadas en el terreno producen cambios en la distribución de esfuerzos que se traducen en deformaciones, las cuales deben ser controladas para evitar estados de falla y problemas en estructuras cercanas a la obra.



*Figura 3.9. Proceso constructivo del muro Milán.
(Zigurat, 2017)*

Dentro de los factores que influyen en la respuesta del suelo y los efectos de deformación en la estructura de contención se encuentran: las propiedades de resistencia del subsuelo, la dimensión de la excavación, el nivel freático y el abatimiento, las etapas constructivas definidas en la obra, las edificaciones colindantes al terreno y las sobrecargas del tráfico o de las plataformas de trabajo.

Por lo tanto, para la elaboración de un diseño eficiente de un muro Milán se requiere de un amplio conocimiento del terreno y las propiedades del suelo por medio de campañas exploratorias, como también la realización de un análisis geotécnico y estructural del muro en donde se calculen los empujes laterales del terreno e hidrostáticos, la resistencia de los materiales, los efectos estáticos y sísmicos para generar un modelo de interacción que permita estimar las deformaciones debidas a los cambios de esfuerzo en el terreno.



3.4 Metodología de interacción suelo – estructura

En el análisis de interacción suelo – muro Milán aplicando la teoría de Zeevaert (1973), se requiere calcular la matriz de rigidez de la estructura de contención y del suelo para luego incorporarlas en una matriz global que permita obtener las reacciones y deformaciones del sistema.

Para evitar la divergencia en el cálculo y problemas al momento de ensamblar la matriz de rigidez global, se debe iniciar la numeración con los nodos de los elementos de la estructura que tienen directa influencia con el suelo de estudio.

A continuación, se presenta la metodología de análisis para la estructura y para el suelo con sus respectivas ecuaciones de cálculo y de interacción.

3.4.1. Modelación del sistema estructural

El modelo de la estructura se basa en el diseño de una retícula segmentada por medio de trabes; la intersección de cada una de las trabes se analiza como un nodo y es en éste en donde se calculan los desplazamientos que sufre la estructura por medio del módulo de reacción. Este módulo es equivalente al cociente de la magnitud de la reacción R_i y la constante del resorte K que representa al suelo como se denota en la Ecuación (3.38).

$$\delta = \frac{R_i}{K} \quad (3.38)$$

Una de las ventajas del modelo de interacción está en que los nodos de los elementos poseen seis grados de libertad, los cuales son los tres giros alrededor de los ejes X , Y , Z y los desplazamientos en cada uno de estos. En la Figura 3.10 se representa el modelo de interacción de la estructura del muro Milán que incluye a la vez los resortes equivalentes del suelo analizado.

Se precisa que las deformaciones de cada nodo dependan directamente de la rigidez de la estructura como también de la constante de resorte del suelo, mientras que la resistencia al giro depende solamente de la rigidez de las trabes con el objetivo de simplificar los cálculos dentro del modelo de interacción.

Al plantear el equilibrio del suelo y la estructura se genera un sistema matricial de $6 \times n$ ecuaciones, definido por el número de nodos del modelo, que equivale al número de incógnitas para obtener los desplazamientos y los giros de los nodos como se indica en la Ecuación (3.39).

$$([K'_e] + [K'_s]) \{\delta'_i\} + \{\bar{F}'_{it}\} = \{\bar{F}'_{et}\} \quad (3.39)$$

En donde:

$[K'_e]$	Matriz de rigidez del sistema estructura - muro
$[K'_s]$	Matriz de rigidez del sistema interdependiente de resortes del suelo
$\{\delta'_i\}$	Vector de desplazamientos y giros de los nudos.
$\{\bar{F}'_{it}\}$	Vector de fuerzas internas o de empotramiento.
$\{\bar{F}'_{et}\}$	Vector de fuerzas externas aplicadas en los nodos de la estructura.

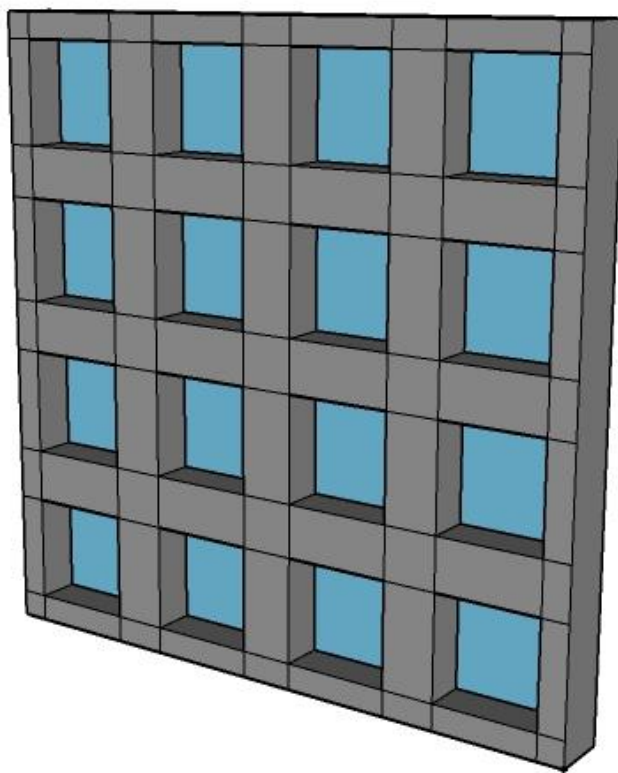


Figura 3.10. Modelo del muro utilizando una retícula por medio de trabes.



Actualmente, este método de interacción suelo – estructura permite modelar por medio de una retícula tridimensional definida, sin embargo, se encuentra en desarrollo un modelo de interacción que utilice elementos placa para su análisis.

La matriz de rigidez para una barra sin resorte con apoyos fijos con sus nodos de inicio y fin conocidos y con los seis grados de libertad se expresa como se indica en la Ecuación (3.40).

$$[K_{ei}] = \begin{bmatrix} [K_{aa}] & [K_{ab}] \\ [K_{ba}] & [K_{bb}] \end{bmatrix}_i \quad (3.40)$$

En donde:

$$[K_{aa}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

$$[K_{ab}] = [K_{ba}]$$

$$[K_{ab}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \end{bmatrix}$$



$$[K_{bb}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

Para un sistema local de ejes coordenados, se debe recurrir a una transformación del sistema de referencia a uno global que sea paralelo al eje local de la barra, por lo cual la transformación de ejes se define mediante la expresión matricial en la Ecuación (3.41) y la Ecuación (3.42).

$$[K'_{ei}] = [T_{oi}]^T [K_{ei}] [T_{oi}] \quad (3.41)$$

En donde:

$[K'_{ei}]$ Matriz de rigidez de una barra en el sistema global.

$[T_{oi}]$ Matriz de transformación de ejes.

$$[T_{oi}] = \begin{bmatrix} [T] : [0] \\ [0] : [T] \end{bmatrix}_i \quad ; \quad [T_{oi}]^T = \begin{bmatrix} [0] : [T] \\ [T] : [0] \end{bmatrix}_i \quad (3.42)$$

En donde:

$$[T] = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & 0 & 0 & 0 \\ l_y & m_y & n_y & 0 & 0 & 0 \\ l_z & m_z & n_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_x & m_x & n_x \\ 0 & 0 & 0 & l_y & m_y & n_y \\ 0 & 0 & 0 & l_z & m_z & n_z \end{bmatrix}$$

Los componentes de los vectores unitarios l , m y n son los cosenos directores que representan las direcciones locales de las barras sobre las direcciones globales como se indica en la Figura 3.11.

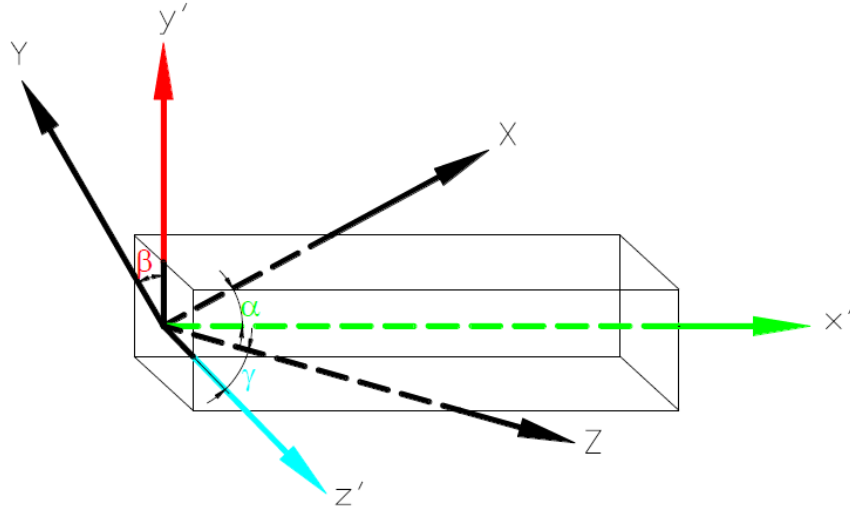


Figura 3.11. Equivalencia de sistemas locales a globales.
(López, 2012)

En el caso de las fuerzas internas o de empotramiento del sistema, se considera la fuerza axial, la fuerza cortante, los momentos flexionantes y torsionantes generados por peso propio y debido a las cargas aplicadas en los elementos de la retícula; para analizar el modelo se debe recurrir al ensamble de los vectores de fuerzas de empotramiento de cada una de las barras proyectadas en el sistema de ejes globales.

El vector correspondiente de una barra definida por los nodos de origen y de destino en su sistema de ejes local se presenta en la Ecuación (3.43).

$$\{F_{it}\} = \{F_{xi} \ F_{yi} \ F_{zi} \ M_{xi} \ M_{yi} \ M_{zi} \ F_{xj} \ F_{yj} \ F_{zj} \ M_{xj} \ M_{yj} \ M_{zj}\}^T \quad (3.43)$$

Para un sistema de ejes global se realiza la transformación como se indica en la Ecuación (3.44).

$$\{F'_{it}\} = [T_o]^T \{F_{it}\} \quad (3.44)$$

En el caso de las fuerzas externas, se construye el vector $\{F'_{et}\}$ con las cargas y momentos puntuales aplicados directamente a los nodos específicos de la retícula del sistema de estudio.

3.4.2. Modelación del suelo

El modelo del suelo considera un medio continuo con una serie de resortes elásticos de rigidez definida K_i que están interrelacionados entre sí y en contacto con el elemento estructural; por otra parte, la estructura de contención se discretiza en un número finito de dovelas con áreas definidas como se indica en la Figura 3.12.

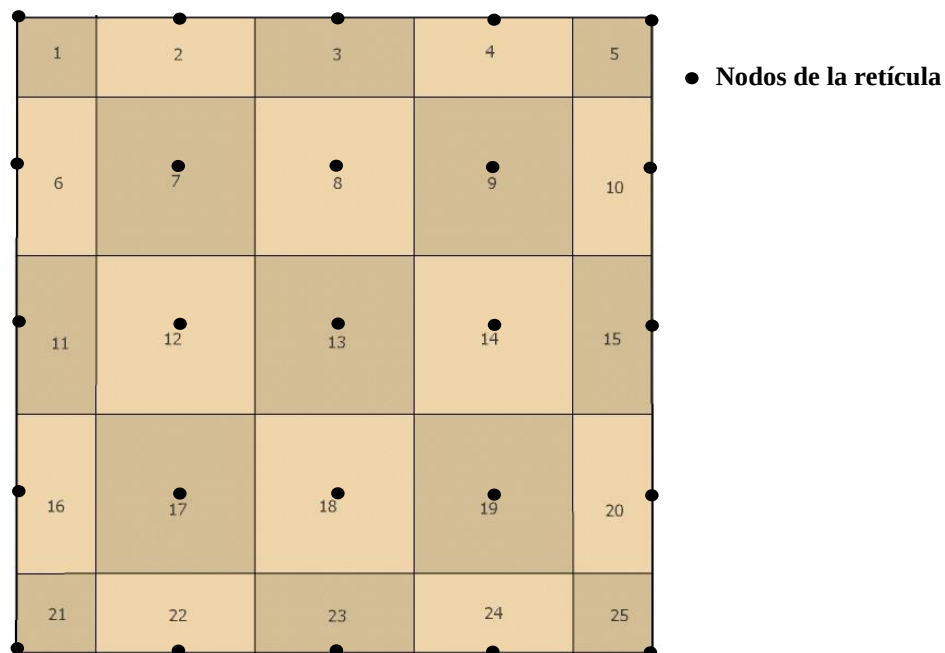


Figura 3.12. Modelo de áreas de placas para la estructura de contención

Para el cálculo de los módulos de reacción de los resortes equivalentes en el suelo, se define la expresión denominada Ecuación Matricial de Asentamientos EMA propuesta por Zeevaert (1983) como se indica en la Ecuación (3.45).

$$\{\delta_i\} = [\overline{\delta}_{ji}] \{q_i\} \quad (3.45)$$

En donde:

- $\{\delta_i\}$ Vector de desplazamientos de orden.
- $[\overline{\delta}_{ji}]$ Matriz de desplazamientos por carga unitaria.
- $\{q_i\}$ Vector de cargas, correspondiente a la presión de contacto en el área tributaria a_i .

Cada columna de la matriz $[\overline{\delta}_{ji}]$ de la Ecuación (3.45) se obtiene aplicando las propiedades del suelo y la influencia como se define en la Ecuación (3.46).

$$\{\overline{\delta}_{ji}\} = [I_{ji}]^T [\alpha_N] \quad (3.46)$$

En donde:

$[I_{ji}]$ Matriz de influencias por carga unitaria aplicada en el área a_i obtenida por la distribución de esfuerzos de Mindlin sobre los nodos al medio de cada Δx .

$[\alpha_N] = [M_{hzn} d_n]$ Matriz de compresibilidades para los diferentes estratos de suelo involucrados en el análisis con su módulo de deformación M_{hzi} y espesor d_i .

Se deben calcular las influencias en los nodos para la carga unitaria aplicada en la placa 1 del modelo al medio de cada tramo horizontal Δx hasta que el valor sea despreciable; luego de este cálculo, se debe sumar algebraicamente en una matriz global las influencias totales de cada nodo debido a la carga unitaria aplicada en la primera placa como se indica en la Figura 3.13.

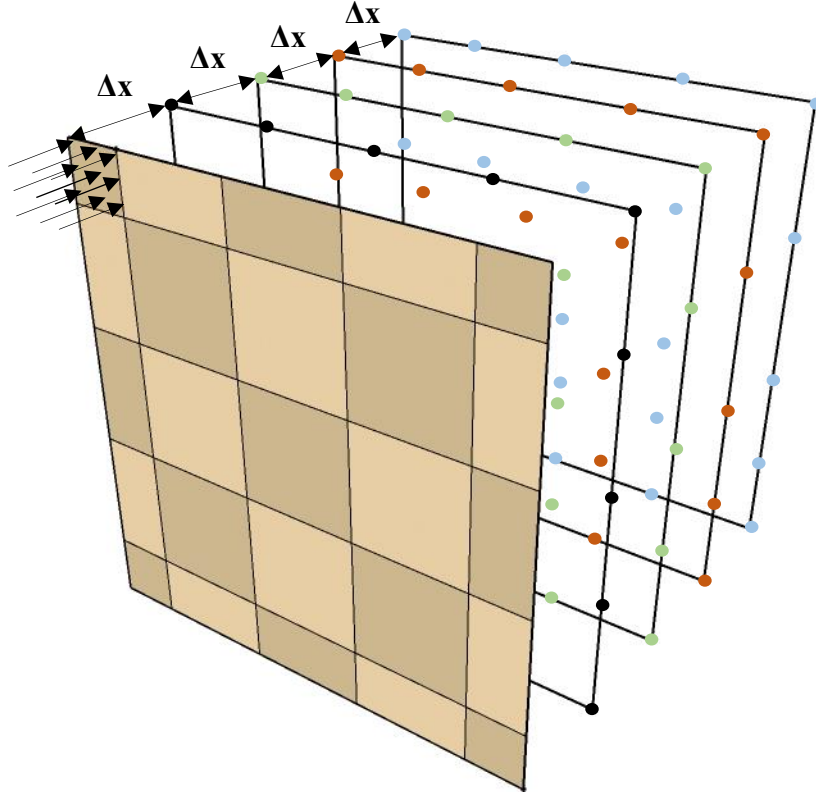


Figura 3.13. Modelo de carga unitaria para las placas con su influencia por Mindlin.

El procedimiento anterior se debe repetir moviendo la carga unitaria a cada una de las placas de diseño para obtener la matriz de deformaciones del suelo $\{\overline{\delta}_{jl}\}$. El cálculo de influencias emplea la solución de Mindlin (1936) para carga rectangular horizontal uniforme que fue obtenida de la integración de la ecuación de carga puntual presentada en los capítulos anteriores.

En la Figura 3.14 se indica esquemáticamente el modelo de interacción de la estructura de contención representada por medio de la retícula y la estratigrafía definida geotécnicamente para el sitio de estudio.

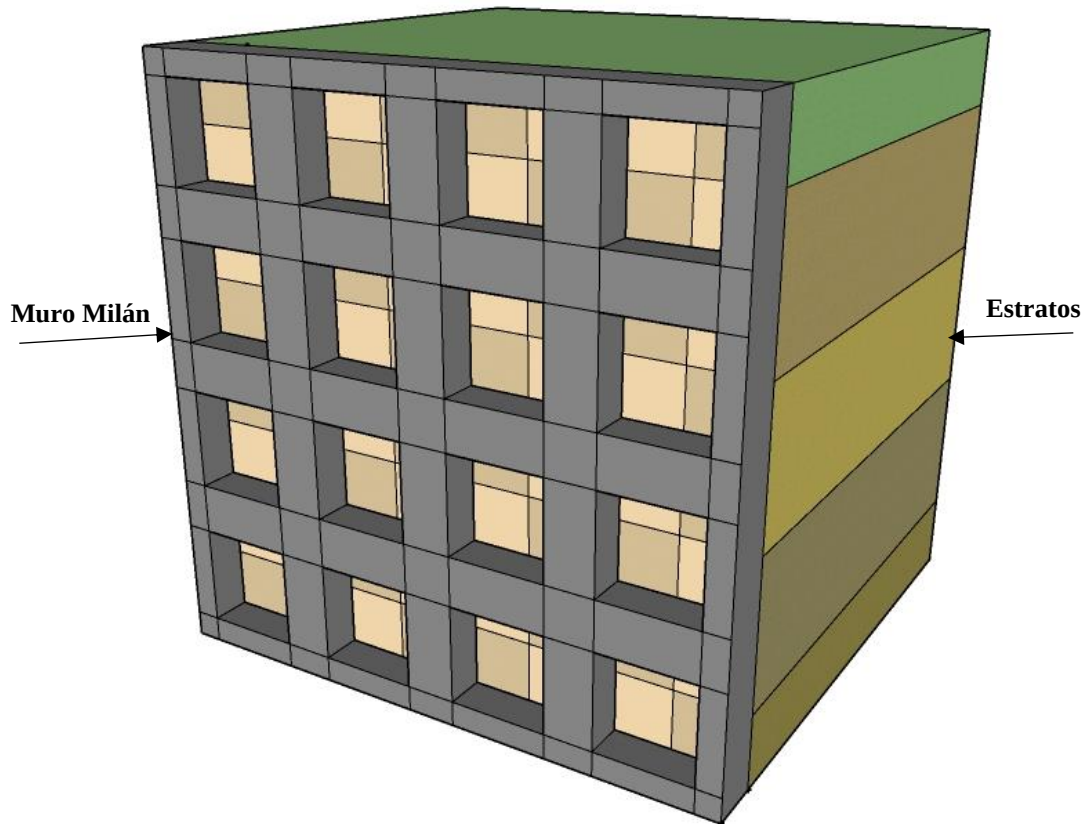


Figura 3.14. Modelo final de interacción para el uso de EMISES3D.

Se sustituye la presión de contacto $\{q_i\}$ por su equivalente como el cociente entre las reacciones R_i y el área de cada placa a_i , como se indica en las Ecuaciones (3.47) y (3.48).

$$\{\delta_i\} = [\overline{\delta}_{jl}] \left\{ \frac{R_i}{a_i} \right\} \quad (3.47)$$



O bien.

$$\{\delta_i\} = [F_{ji}] \{R_i\} \quad (3.48)$$

En donde:

$\{R_i\}$ Vector de reacciones en las placas.

$[F_{ji}] = [\overline{\delta_{ji}}] \left[\frac{1}{a_i} \right]$ Matriz de flexibilidades del suelo y el área de la placa a_i

Despejando el vector $\{R_i\}$ de la Ecuación (3.48) se obtiene la inversa de la matriz de flexibilidades del suelo multiplicada por el vector de deformaciones unitarias como se presenta en la Ecuación (3.49).

$$\{R_i\} = [F_{ji}]^{-1} \{\delta_i\} \quad (3.49)$$

A la vez, la inversa de la matriz de flexibilidades es equivalente a la matriz de rigidez que representa los resortes del suelo para calcular las deformaciones del suelo.

$$[F_{ji}]^{-1} = [K'_s]$$

Una de las ventajas del modelo de interacción está en que, si los resortes del suelo se encuentran ubicados en la misma posición de los nodos de la estructura, se puede hacer la suma matricial de rigidez por medio de la Ecuación (3.50) y evitar iteraciones.

$$[K_{es}] = [K'_e] + [K'_s] \quad (3.50)$$

La solución del modelo de interacción obtiene los desplazamientos y giros, los cuales son útiles para el cálculo de los elementos mecánicos de las barras de la estructura. Sin embargo, es necesario transformar los resultados a los ejes locales de cada elemento aplicando la Ecuación (3.51) y (3.52).

$$\{\delta_i\} = [T_{oi}] \{\delta'_i\} \quad (3.51)$$

$$\{F_i\} = [K_{ei}] \{\delta_i\} + \{F_{it}\} \quad (3.52)$$



Las reacciones horizontales en los nodos de la estructura se obtienen usando la Ecuación (3.53).

$$\{R_i\} = [K_s] \{\delta_{hi}\} \quad (3.53)$$

Las reacciones horizontales distribuidas en cada una de las placas entre las cuales se divide la estructura de contención son equivalentes a la Ecuación (3.54).

$$\{q_i\} = \left\{ \frac{R_i}{a_i} \right\} \quad (3.54)$$

Finalmente, al aplicar la Ecuación (3.39) de interacción se forma el sistema de ecuaciones matriciales que al resolverse permite obtener los desplazamientos y giros de los nodos definidos de la estructura. Dentro del modelo, se pueden incluir restricciones al desplazamiento o giro de los nodos según sean las condiciones reales de la estructura y de diseño.

El análisis del fenómeno de compresibilidad del suelo de contacto con la estructura de contención requiere de parámetros de compresibilidad confiables y criterio del geotecnista para el cálculo de desplazamientos. Se puede hacer uso del módulo de deformación M_v para estimar el comportamiento a corto plazo, como lo es en suelos granulares o a largo plazo como es el caso de los suelos finos cohesivos donde el tiempo es una variable muy importante; para el alcance de esta tesis se plantea un análisis de interacción a corto plazo, ya que se modela el comportamiento de los elementos de contención durante el proceso de excavación.

Adicionalmente, la estimación del estado de esfuerzos al cual se somete el sistema genera alivios o compresiones debidos a la excavación, la construcción y el colado del concreto del muro Milán, los soportes laterales de las losas de cimentación, entre otros efectos, por lo tanto, es fundamental el cálculo de estos cambios por medio de la teoría de Boussinesq y Mindlin que depende de las etapas constructivas y que deben ser incluidos en el modelo de interacción suelo – estructura para la estimación de deformaciones del sistema.

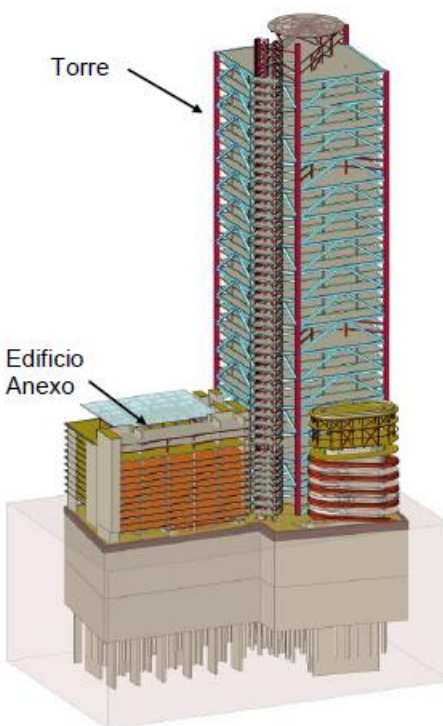
4. PROYECTO DE ESTUDIO

4.1 Antecedentes del proyecto

Debido al desarrollo económico y urbano en la Ciudad de México se plantea la construcción de una torre de oficinas de 52 niveles con siete sótanos de estacionamientos y un edificio anexo de 15 niveles con 7 sótanos para estacionamientos, que se ubica en la Avenida Paseo de la Reforma y la Calle Lieja dentro de la Zona de Lago.

4.2 Características del proyecto

Este proyecto consiste en la construcción de una torre de oficinas y un edificio anexo que cubren un área estimada de 6.200 m² como se muestra en la Figura 4.1 aplicando el procedimiento “Top Down”. El proceso de excavación para los 7 sótanos de la edificación principal es el caso de estudio con el fin de aplicar la metodología de interacción del suelo – estructura de contención.



*Figura 4.1. Vista general de proyecto.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)*



El nivel del piso terminado del último sótano se encuentra ubicado a los -23.3 m, incluyendo el peralte de la losa de cimentación de 2.0 m se alcanzan los -25.30 m de excavación; las losas de los sótanos son macizas y en concreto reforzado con un peralte de 0.40 m, excluyendo a las plataformas de trabajo que tienen una dimensión de 0.60 m de peralte.

El procedimiento “Top Down” consiste en la utilización de muros y losas como elementos de contención dentro del proceso constructivo de los sótanos brindando un soporte lateral. Por tal motivo, se requiere la construcción preliminar de muros, en este caso muros Milán, que soporten los empujes y que puedan conectar estructuralmente a las losas del proyecto buscando la transferencia de carga lateral y generar diafragmas en la edificación.

Se debe realizar un análisis de presiones laterales del suelo y el uso respectivo de los elementos de contención para la construcción de las losas de cimentación, contemplando una secuencia que involucre desde el nivel de la superficie hasta la profundidad máxima indicada. La primera losa debe tener capacidad estructural para soportar las cargas laterales, el almacenamiento de material y la maquinaria de trabajo; en el caso de las losas inferiores, se utilizan columnas temporales y otras definitivas que transmiten las cargas directamente a las pilas de la cimentación.

La utilización del método “Top-Down” se ha empleado con éxito en diversos proyectos dentro de la Zona de Lago en la Ciudad de México, por lo cual se considera que para las excavaciones a gran profundidad es una metodología adecuada si se diseña analizando las propiedades de comportamiento del suelo y acompañadas de una buena exploración de campo.

4.3 Instrumentación de campo

El uso de instrumentación permite verificar el comportamiento geotécnico en una obra debido a diferentes procesos constructivos; uno de los instrumentos más utilizados es el inclinómetro, este es un equipo de medición que registra los desplazamientos horizontales producidos en la estructura y en el suelo por medio de señales eléctricas.

La instrumentación con inclinómetros consta de dos etapas importantes, la primera es la selección de la ubicación e instalación de los elementos, y la segunda es la frecuencia y el proceso de medición dentro de la obra.



Con respecto a la primera etapa, se requiere de una tubería metálica o de plástico disponible en tramos de 1.5 o 3.0 m de longitud; estos tramos se unen mediante coples para alcanzar la profundidad de lectura deseada y definida por la campaña de instrumentación. Este tipo de tubería tiene ranuras horizontales y perpendiculares entre sí que se convierten en la guía de la sonda eléctrica que obtiene los datos de la medición.

Para ejecutar la lectura se utiliza un cable graduado conectado a un equipo de medición portátil y una sonda con sensores de inclinación y profundidad como se indica en la Figura 4.2 ; éstos poseen un elemento guía que transmite una señal eléctrica en los distintos niveles de medición la cual debe ser procesada para su interpretación.

La campaña de instrumentación en la obra de estudio contó con inclinómetros dentro del muro Milán y se describe brevemente el procedimiento de instalación para este caso.

- Se incluye en el armado del muro Milán la tubería de diseño y se amarra mediante el uso de abrazaderas de acero. Para los coples de cada tramo de tubería se necesita pegamento PVC de alta resistencia y neopreno con el fin de evitar problemas al momento del fraguado del concreto de la estructura de contención.
- En la parte superior e inferior del armado del muro Milán se debe acoplar una parrilla de protección para evitar el movimiento de la tubería y conservar la verticalidad.
- Antes de realizar el colado del muro se debe llenar la tubería con agua limpia evitando la falla por presiones debido al concreto de la estructura. Ya que fragüe el concreto se debe proceder a la limpieza con una broca tricónica y agua.
- Se procede a verificar la profundidad de la tubería y que no existan obstáculos internos; con ayuda de topografía se alinean las ranuras interiores y se verifica la verticalidad de ésta. En caso de presentar desviaciones angulares se registran para realizar las respectivas correcciones de las mediciones.
- Es necesario la utilización de mortero fluido de alta resistencia y luego de 24 horas que fragüe la mezcla, se pueden iniciar las lecturas de los inclinómetros.



Figura 4.2. Elementos de un inclinómetro.
Arvizu, M. (2017)

La tubería de PVC debe ser almacenada en una superficie plana que no se encuentre en contacto con la humedad o químicos abrasivos; se debe verificar que la tubería no haya sufrido presiones o cargas con el fin de evitar pandeos o deformaciones inducidas.

El efecto de la flotación se presenta en la instalación de la tubería, pero es importante contrarrestarlo por medio del lastrado con agua limpia su interior. A pesar que la opción de asegurar la parte superior de la tubería sea la más fácil, se debe evitar esta práctica ya que se genera un empuje hacia arriba lo que produce una deformación de la tubería en forma de “S”.



Para evitar este efecto se sugieren tres procedimientos: la suspensión del tubo en 1" por debajo del fondo lo que asegura que se mantenga su forma inicial, la segunda es la preinstalación de un anclaje conectado al tramo de tubería en la parte inferior y finalmente, el uso de un peso amarrado al fondo que contrarreste las presiones ejercidas por la perforación realizada.

En la segunda etapa se requiere definir la frecuencia de lectura y el correcto procedimiento para la obtención de las mediciones en los instrumentos. Para realizar la lectura se utiliza el equipo portátil conectado por medio del cable y se baja la sonda a distintas profundidades obteniendo las respuestas eléctricas traducidas en cambios de la posición inicial de instalación.

El equipo de medición debe estar en buen estado verificando que la constante de calibración se mantenga en las lecturas con el fin de evitar errores inducidos al procesar los datos; cada medición debe repetirse girando la sonda 180° ya que la equivalencia entre lecturas es un valor constante.

Para finalizar, una campaña de instrumentación es una herramienta que facilita la identificación de condiciones críticas de desplazamientos en la obra y permite evitar un estado de falla general; además, una buena toma de lecturas de inclinometría permite comparar los efectos reales a los cuales se sometió el suelo y los cálculos obtenidos por las metodologías de diseño.

4.4 Modelo geológico – geotécnico

La geología de la Ciudad de México se desarrolla a partir del estudio de la cuenca del Valle de México, que forma parte de la fisiografía de la Altiplanicie Neovolcánica que atraviesa el país de oriente a occidente. La ciudad se sitúa a más de 200 m.s.n.m. en donde sobresalen diversas formaciones volcánicas y llanuras extensas de material piroclástico.

La cuenca de México tiene una forma alargada de dirección NNE – SSE, con una longitud de aproximadamente 100 km y un ancho de 30 km; esta cuenca se delimita en el norte por la Sierra de Pachuca, en el oriente por la Sierra de Río Frío y la Sierra Nevada, en el sur por la Sierra Chichinautzin y en el poniente por la Sierra de las cruces. La formación del lago fue propiciada por su misma topografía, en donde, los espesores de relleno aumentan del norte al sur alcanzando en la parte central de la cuenca unos 200 m, mientras que en sur se definen espesores de 500 a 600 m; el relleno es



conformado por material volcánico, interestratificado con tobas volcánicas y depósitos lacustres especialmente al centro de la cuenca.

Con base en la estratigrafía que presenta la cuenca de la Ciudad de México se establece que el predio de estudio se ubica en el límite occidental de lo que fue el Lago de México, dentro de la zona denominada de Lago Centro I. Esta zona surgió debido al desarrollo urbano y al crecimiento residencial, por lo cual, el subsuelo ha estado sometido a sobrecargas de estructuras pequeñas y medianas.

La investigación del subsuelo es fundamental para realizar los estudios geotécnicos de la zona, los cuales permiten definir la estratigrafía que va a ser utilizada en los diseños de la obra; la caracterización de los materiales se realizó a partir de los sondeos exploratorios con ensayos SPT con muestras alteradas e inalteradas, sondeos de cono eléctrico, ensayos de laboratorio tales como contenidos de humedad, límites de consistencia, clasificación de suelos SUCS, resistencia al esfuerzo cortante por ensayos triaxiales UU y compresiones simples, entre otros, para plantear un modelo adecuado a la zona.

Como parte de los trabajos en campo se instaló una estación piezométrica que permitía conocer la distribución de las presiones de poro en los estratos permeables, y adicionalmente, se realizó un pozo de observación en la zona. El tipo de piezómetro utilizado para las mediciones fue abierto o Casagrande.

A partir de los sondeos realizados y el pozo de observación instalado a 13.60 m de profundidad, se identificó que el nivel de aguas freáticas estaba a los 6.6 m de profundidad. En la Tabla 4.1 se presenta la instalación de las celdas piezométricas, su lectura y su respectiva pérdida con referencia al nivel de la banqueta 0.00 m.

Tabla 4.1. Lecturas de celdas piezométricas

Celda	Profundidad (m)	Lectura (m)	Pérdida (t/m²)
1	19.9	7.3	0.7
2	28	20.8	14.2
3	38.4	18.24	11.64
4	53.4	16.45	9.85

(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)



Superficialmente y hasta una profundidad de 2.75 m se encuentra una arcilla de consistencia media con presencia de arenas y gravas; subyace hasta los 18 m una arcilla lacustre de alta plasticidad, de color gris verdoso, café claro y rojo, de consistencia muy blanda a blanda. Se identifican diferentes lentes de arcilla arenosos, arena arcillosa y vidrio volcánico con una resistencia de cono eléctrico de 4 a 10 kg/cm² a las profundidades de: 3.0 a 4.0 m, 10.2 a 10.4 m, 12.0 a 12.6 m, 16.0 a 16.60 m y 17.20 a 18.0 m. Las muestras analizadas del estrato poseen un contenido de humedad que varía de 30 a 280%, LL de 43 a 360%, LP de 19 a 76%, IP de 24 a 295%, densidad de sólidos de 2.12 a 2.49, peso volumétrico húmedo de 1.180 a 1.729 t/m³, peso volumétrico seco de 0.267 a 1.20 t/m³, cohesión de 1.0 a 6.0 t/m² y ángulo de fricción de 2 a 14°.

Prosigue un estrato hasta los 26.0 de profundidad de arcilla lacustre de alta y baja plasticidad, de color gris verdoso, café claro y rojizo, cuya resistencia varía de blanda a muy firme, con presencia de lentes de arcilla arenosa, arena arcillosa y vidrio volcánico. La resistencia en la punta del cono eléctrico varía de 10 a 15 kg/cm² a las profundidades de 21.0 a 22.0, 22.5 a 23.0 y 24.20 a 25.50. Las muestras analizadas de este estrato poseen un contenido de humedad que varía de 24 a 287%, LL de 36 a 219%, LP de 14 a 69%, IP de 17 a 159%, densidad de sólidos de 2.29 a 2.61, peso volumétrico húmedo de 1.24 a 1.83 t/m³, peso volumétrico seco de 0.44 a 1.53 t/m³, cohesión de 4.5 a 12.0 t/m² y ángulo de fricción de 1 a 17°.

De 26.0 a 33.0 m de profundidad se detectó una arcilla arenosa de alta y baja plasticidad, de color gris verdoso, de consistencia media a dura, con presencia de lentes de arcilla, ceniza volcánica, vidrio volcánico y arena arcillosa de muy alta compacidad, con un número de golpes a partir del ensayo de SPT de 4 a más de 50.

De 33.0 a 77.0 m de profundidad, se identificó una serie de intercalaciones de estratos constituidos por arcilla arenosa de baja plasticidad, de color gris verdoso, de consistencia dura, con pocas gravas de forma subredondeada, y arena arcillosa de color gris y café verdoso de muy alta compacidad con gravas.

De 77.0 a 99.0 m de profundidad, se presentan estratos intercalados constituidos por arenas limosas y limos arenosos de color gris oscuro, de compacidad muy alta y consistencia dura con presencia de gravas y gravillas.



Considerando la información presentada por la Gerencia de Aguas del Valle de México sobre las curvas de hundimiento anual con referencia al periodo de 1985 – 1995, la zona de estudio presentaría un hundimiento estimado de 2.0 cm/año.

Los ensayos presiométricos se realizaron a una profundidad entre 32 y 60 m; cada ensayo fue interpretado por medio de los parámetros siguientes: el módulo de Menard (Em), los incrementos de volumen, la presión de fluencia (pf) y la presión límite (pl). En la Tabla 4.2 se presentan los resultados del módulo (Em) obtenidos a partir del presiómetro.

Tabla 4.2. Resultados del Módulo (Em) para ensayo de Presiómetro.

Prof. (m)	Em (kg/cm ²)	Prof. (m)	Em (kg/cm ²)
32	1446	47	1333
33	1503	48	1594
34	1511	49	846
36	913	50	372
38	839	52	914
40	66	54	245
41	742	55	354
42	923	56	1013
43	1088	57	1373
44	268	58	719
45	774	59	561
46	974	60	521

(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

La solución geotécnica propuesta por el estudio de mecánica de suelos para cimentar la edificación de estudio fue: pilotes de concreto y un muro Milán perimetral construidos a 50 m de profundidad, por lo tanto, no se programaron ensayos de consolidación en las muestras arcillosas.

No obstante, se ejecutaron más de 71 ensayos de compresión triaxial UU en las muestras recuperadas a una profundidad de 3 m hasta los 24 m, de los seis sondeos realizados en el terreno de estudio. Luego se agrupan los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales UU según la profundidad de la muestra ensayada y se calcula el módulo tangente de deformación del suelo (E_{50}) correspondiente al 50% del esfuerzo desviador de falla alcanzado en cada prueba.



Por lo tanto, se obtienen los valores del módulo E_{50} para cada profundidad y cada esfuerzo confinante y se presentan los resultados en la Figura 4.3.

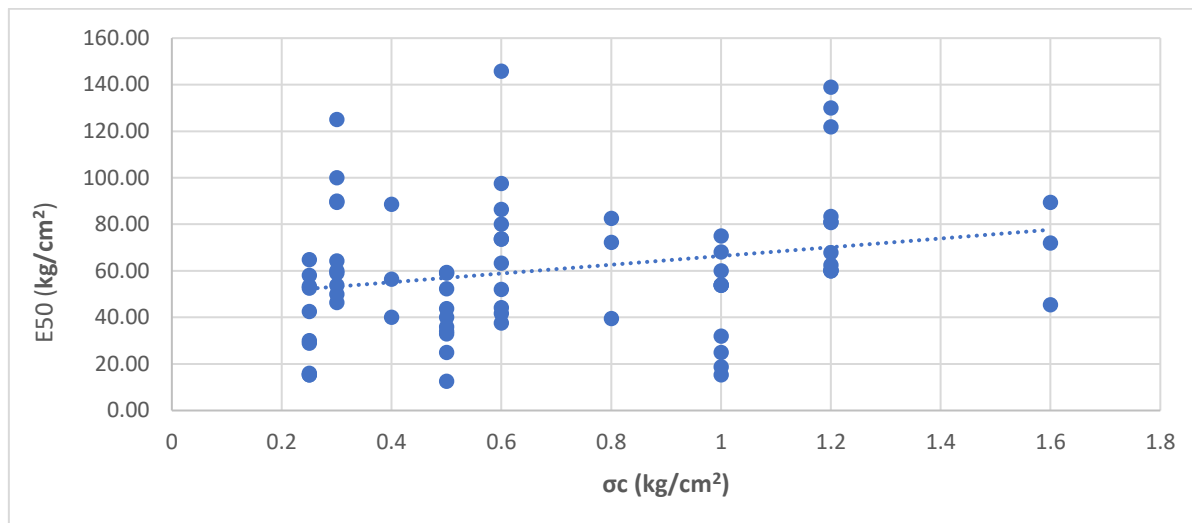


Figura 4.3. Estimación del Módulo E_{50} a partir de ensayos triaxiales UU.

Ya que se desea modelar la interacción suelo – elemento de contención durante el proceso de excavación, se considera que el análisis corresponde a corto plazo. Por lo tanto, se promedian los resultados del módulo E_{50} para cada profundidad con el fin de establecer los parámetros de la estratigrafía que requiere el modelo, como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Estimación de módulos E_{50} para el perfil estratigráfico de estudio.

Estrato	d_i (m)	D_i (m)	E (t/m ²)	Estrato	d_i (m)	D_i (m)	E (t/m ²)	Estrato	d_i (m)	D_i (m)	E (t/m ²)
1	0.63	0.63	1000.0	15	1.25	18.13	570.0	29	1.25	35.63	610.0
2	1.25	1.88	1000.0	16	1.25	19.38	500.0	30	1.25	36.88	610.0
3	1.25	3.13	800.0	17	1.25	20.63	940.0	31	1.25	38.13	710.0
4	1.25	4.38	600.0	18	1.25	21.88	650.0	32	1.25	39.38	710.0
5	1.25	5.63	430.0	19	1.25	23.13	670.0	33	1.25	40.63	710.0
6	1.25	6.88	520.0	20	1.25	24.38	410.0	34	1.25	41.88	710.0
7	1.25	8.13	530.0	21	1.25	25.63	510.0	35	1.25	43.13	710.0
8	1.25	9.38	390.0	22	1.25	26.88	510.0	36	1.25	44.38	710.0
9	1.25	10.63	680.0	23	1.25	28.13	510.0	37	1.25	45.63	710.0
10	1.25	11.88	680.0	24	1.25	29.38	510.0	38	1.25	46.88	710.0
11	1.25	13.13	640.0	25	1.25	30.63	610.0	39	1.25	48.13	710.0
12	1.25	14.38	520.0	26	1.25	31.88	610.0	40	1.25	49.38	710.0
13	1.25	15.63	520.0	27	1.25	33.13	610.0	41	0.63	50.00	710.0
14	1.25	16.88	860.0	28	1.25	34.38	610.0				



Por medio de la caracterización geotécnica de la zona y los posibles efectos en el terreno se planteó el procedimiento constructivo “Top – Down” para el cálculo de losas de entrepiso y las plataformas de trabajo de construcción; adicionalmente, se propuso el uso del muro Milán, la tablestaca metálica y la mega zapata como elementos de contención de la excavación.

Derivado de la interpretación de las pruebas de laboratorio, las perforaciones directas e indirectas, estudios previos y la caracterización geológica de la zona, se genera un modelo geotécnico para la obra segmentado por unidades identificadas con sus respectivas propiedades mecánicas y de resistencia como se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Modelo geológico – geotécnico del sitio de estudio.

Prof. (m)	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	Φ (°)	Estratigrafía
0.0 - 2.0	1.57	2.1	10	Arcilla de consistencia media con presencia de arena y gravas.
2.0 - 6.0	1.57	1.9	4	Arcilla lacustre de consistencia blanda a media, con presencia de arena de color gris verdoso y rojizo.
6.0 - 9.0	1.18	2.9	9	Arcilla lacustre de consistencia muy blanda a blanda con presencia de arenas, con intercalaciones de lentes de arena volcánica pumítica y basáltica.
9.0 - 16.0	1.26	4.3	5.5	Arcilla de alta plasticidad de consistencia blanda a media de color café y gris verdoso.
16.0 - 17.5	1.74	4.5	16	Arena arcillosa de compacidad media con lente de vidrio volcánico.
17.5 - 22.0	1.24	8.3	7	Arcilla lacustre de consistencia media
22.0 - 23.0	1.69	4.5	16	Arena arcillosa con lente de vidrio volcánico.
23.0 - 25.0	1.35	9.6	2.5	Arcilla lacustre con arena de consistencia media
25.0 - 28.0	1.67	11.6	2.5	Arcilla arenosa de consistencia muy firme a dura con lente de vidrio volcánico e intercalaciones de arcilla lacustre.
28.0 - 33.0	1.67	18.2	9	Arcilla lacustre con intercalación de suelo de consistencia media con lentes de arena o limo.
33.0 - 46.0	1.67	-	37	Arena arcillosa de color gris verdoso y rojizo, de muy alta compacidad con presencia de gravas; presenta intercalaciones de lentes de arcilla arenosa con gravas.
46.0 - 55.0	1.67	-	37	Arena arcillosa de color gris verdoso de alta compacidad con gravas.
55.0 - 60.0	1.67	-	37	Arena limosa, limo arenoso de compacidad muy alta y consistencia dura con presencia de gravas y gravillas.

(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)



4.5 Procedimiento constructivo

Para analizar la edificación de estudio se requiere describir de manera detallada las actividades que componen la secuencia constructiva “Top – Down”, con el fin de llevar a cabo con éxito la construcción y la excavación a grandes profundidades al estar realizándose una cimentación en la zona lacustre de la Ciudad de México.

Como solución a las características de la estructura, se propone la construcción de un muro Milán perimetral desplantado a 50.0 m y pilas desplantadas a la misma profundidad, adicionalmente, se hace uso de espigas metálicas precimentadas con el objetivo de soportar las losas de entrepiso y de trabajo frente a las solicitaciones de carga.

Con respecto al muro Milán, se construye en el perímetro de la obra y adicionalmente en una sección cuadrada dentro del área de construcción. Para la realización de la excavación del muro, se utilizó una almeja hidráulica con el fin de controlar las deformaciones laterales debidas a la construcción y al mismo tiempo se fueron instalando las pilas circulares de 1.4 de diámetro y rectangulares en el interior del edificio de 6.0 x 0.8 m como se identifica en la Figura 4.4.

Para soportar las cargas transmitidas de la estructura al terreno, se hace uso de una trabe de coronamiento exterior que se apoya sobre el muro Milán construido con anterioridad. Esta estructura de concreto armado tiene 8.0 m de altura y un ancho de 1.5 m que cuenta con elementos metálicos embebidos de hasta 100 t de peso y con espesor de 4’’ como se muestra en la Figura 4.5.

Esta trabe de coronamiento debe ser colada en totalidad antes de iniciar cualquier excavación de los sótanos, por lo cual fue necesario la excavación de una zanja de 8 m de profundidad soportada con dos tablestacas perimetrales utilizando troqueles metálicos.

Al finalizar la construcción de la trabe de coronamiento se construye la losa de plataforma para la torre principal como en el edificio anexo. Esta losa se habilita para el paso de camiones, equipos constructivos, almacenamiento de materiales, por lo cual deben ser capaces de soportar una sobrecarga estimada de 2 t/m².

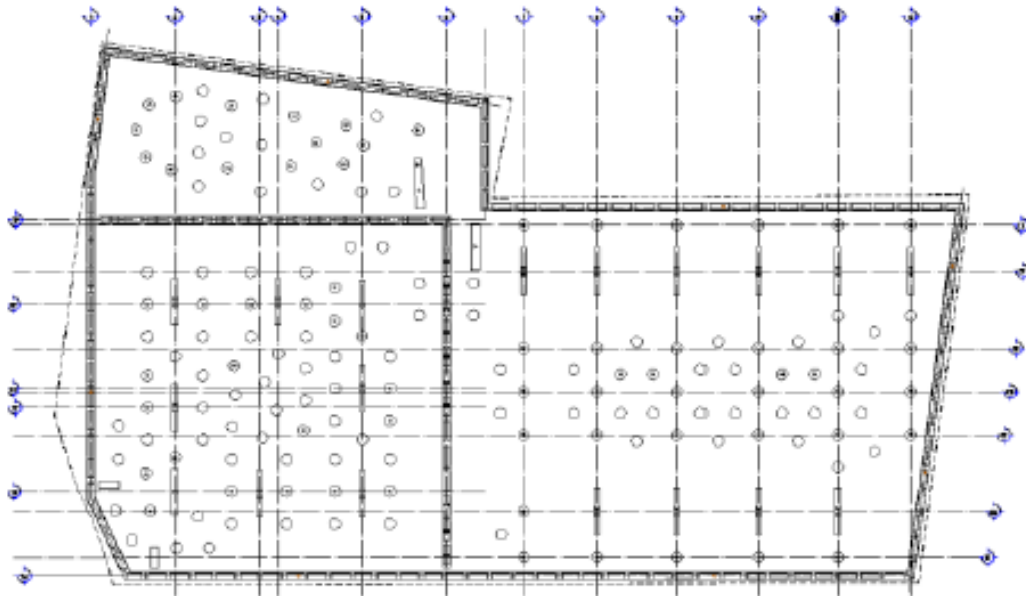


Figura 4.4. Ubicación en planta de Muro Milán y pilas.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)



Figura 4.5. Construcción de la trabe de coronamiento perimetral de la estructura.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

Esta losa se construye de 0.60 m de espesor apoyada sobre espigas metálicas precimentadas en el colado de los tramos iniciales y la colocación de refuerzo adicional con placas de acero para evitar la penetración: en la plataforma de trabajo se dejan ventanas que permiten la extracción de material debido a la excavación y el paso de materiales como se evidencia en la Figura 4.6.

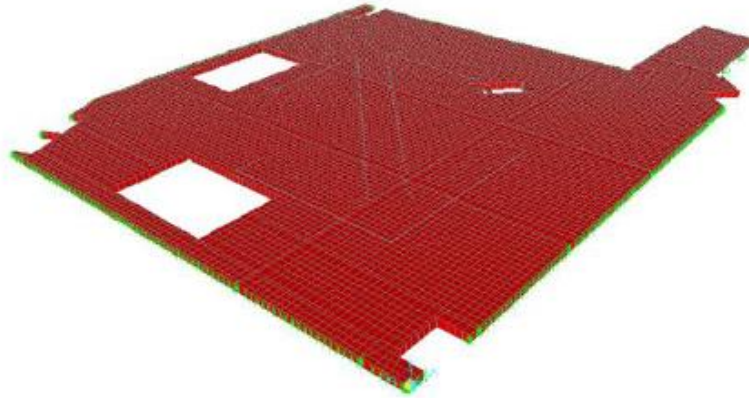


Figura 4.6. Plataforma de trabajo con rezaga para la extracción de material.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

Antes de realizar la excavación, se realiza la construcción de sistemas de bombeo profundo perimetrales conformados por 12 pozos de 0.60 m de diámetro a una profundidad de 32 m y con bombas sumergibles que utilizan electroniveles. El objetivo de este procedimiento es extraer el agua en el interior del muro y ejecutar una excavación en seco buscando mayores niveles de rendimiento.

- **Secuencia de excavación – construcción de las losas**

La secuencia de excavación es esencial para el éxito de la obra, por lo cual se pretende detallar cada una de las etapas que permitan modelar la interacción entre elementos estructurales como lo son: el muro Milán, la tablestaca, las pilas instaladas a profundidad y la trabe de coronamiento estructural que transmite las cargas de la edificación al terreno.

En la Figura 4.7 se muestra la estructura en planta que indica la secuencia de las distintas etapas constructivas en la torre principal y el edificio anexo. Para el análisis del modelo de interacción se revisa la sección A-B que corresponde al Edificio Torre.

Sección A-B

1. Construcción de muro Milán
2. Excavación a -8.45 m en zonas T1 y T2.
3. Construcción de trabe de coronamiento, losa de sótano S1 en secciones T1, T2.
4. Construcción de losa de sótano S2 en secciones T1, T2 y colocación de troqueles en zona de rampas helicoidales.
5. Excavación a -14.65 m, en zonas T1 y T2.
6. Construcción de losa de sótano S4 en secciones T1, T2 y colocación de troqueles en zona de rampas helicoidales.
7. Excavación a -21.65 m, en zonas T1 y T2.
8. Construcción de losa de sótano S6 secciones T1, T2 y colocación de troqueles en zona de rampas helicoidales.
9. Excavación a -25.20 m, en zonas T1 y T2.
10. Construcción de losa de fondo.
11. Construcción de losas

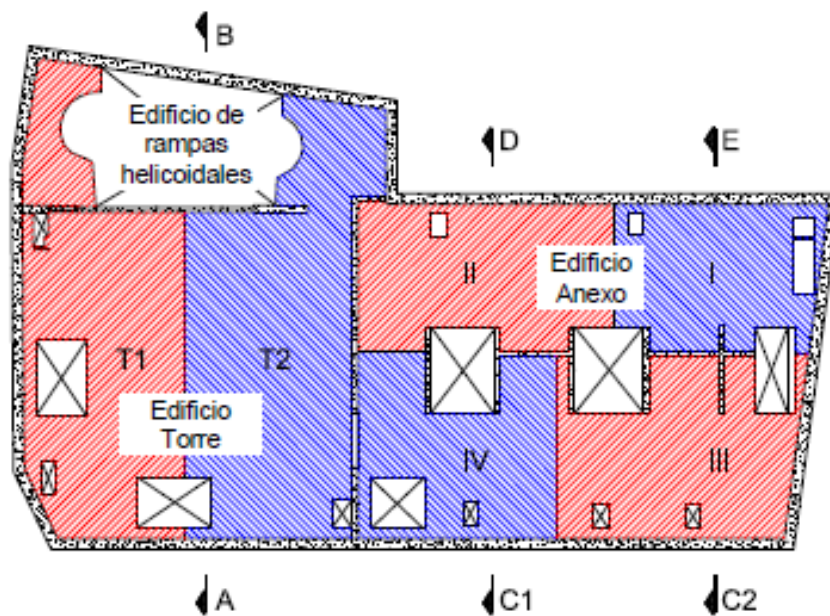


Figura 4.7. Secciones de procesos constructivos para el edificio Torre.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

Para verificar el comportamiento real en cada una de las etapas constructivas derivadas de la excavación se hizo uso de la instrumentación geotécnica; se instalaron 8 inclinómetros en el muro Milán y 3 inclinómetros en la banquetta que alcanzaron una profundidad de 50.0 m.

En la Figura 4.8 se presenta la ubicación de los inclinómetros instalados en el proyecto; se muestran las lecturas de tres inclinómetros con énfasis en el “INC-01”, ya que en el caso de los otros instrumentos se afectaron y se encontraron dañados debido a los distintos procesos constructivos de la obra.

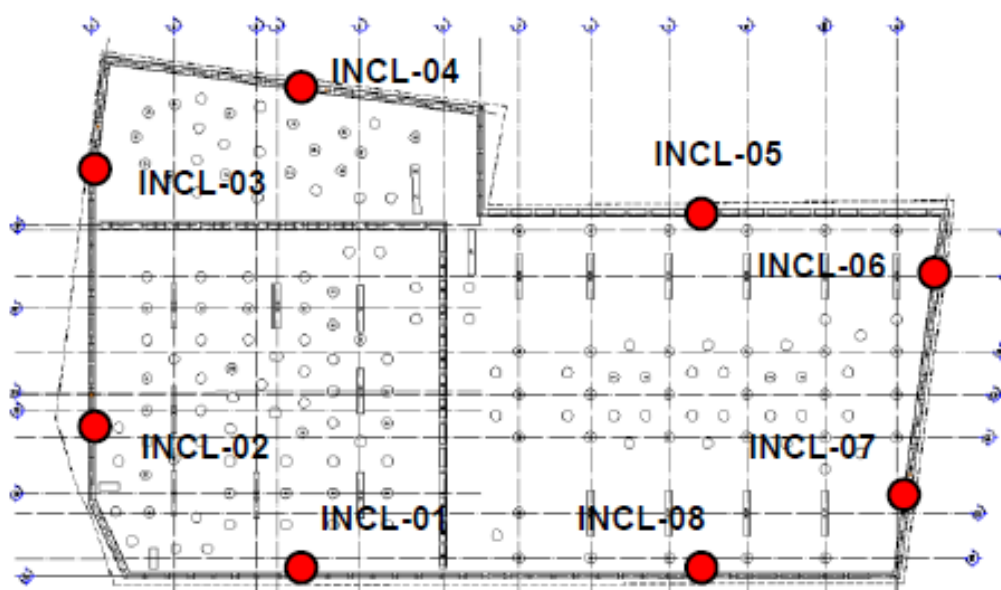


Figura 4.8. Ubicación de los inclinómetros dentro del área de construcción.
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

De la Figura 4.9 a la Figura 4.11 se presentan las lecturas de los inclinómetros “INC-01”, “INC-04” e “INC-05” reportadas por el constructor. Las lecturas se realizaron semanalmente y los resultados mostrados en las figuras son las deformaciones acumuladas desde la condición inicial hasta la excavación al nivel -14.30 m y la construcción del sótano S4.

Adicionalmente, en la Figura 4.9 a la Figura 4.11 se muestra el resultado del comportamiento teórico calculado por medio de un análisis de deformación del terreno; estos resultados se obtuvieron a partir de un software exclusivo de la empresa constructora para analizar el comportamiento de las excavaciones.

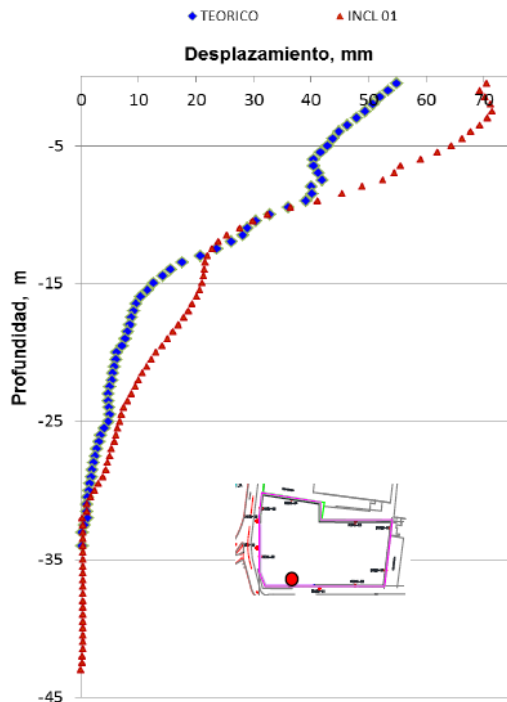


Figura 4.9. Resultados del inclinómetro “INC-01”
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

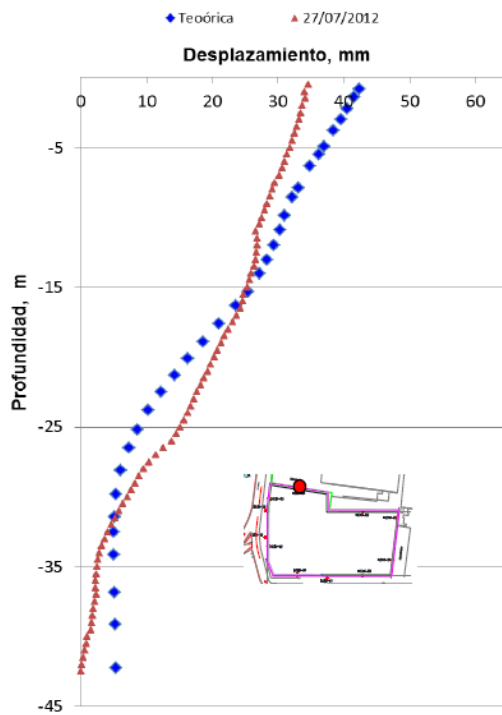


Figura 4.10. Resultados del inclinómetro “INC-04”
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

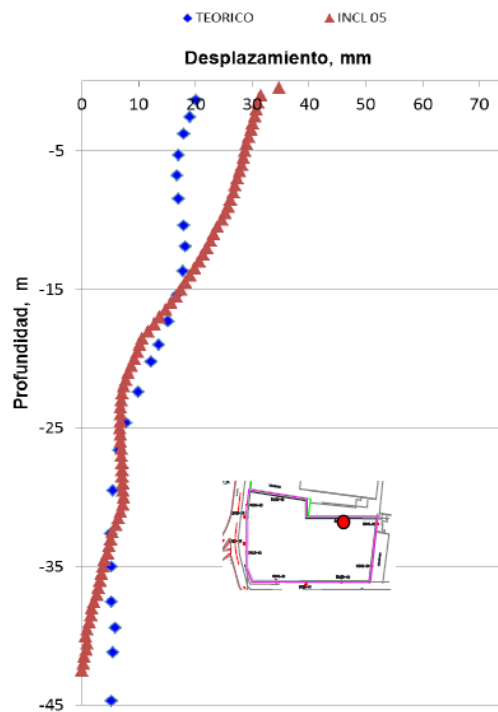


Figura 4.11. Resultados del inclinómetro “INC-05”
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

La selección del inclinómetro “INC-01” como elemento de control se debe a que éste es el instrumento que reporta las mayores deformaciones laterales alcanzadas hasta realizar la excavación al nivel -14.30 m y la construcción del sótano S4. Además, se observa en la Figura 4.9 que las deformaciones alcanzadas hasta los -10 m de profundidad son de gran magnitud, por lo cual, se busca analizar la interacción suelo – estructura para definir la etapa crítica que genere tales desplazamientos horizontales.



5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INTERACCIÓN

Para resolver el problema de interacción suelo – estructura de contención de la edificación de estudio se utiliza la metodología matricial propuesta por Zeewaert (1980) por medio de la aplicación de software y hojas de cálculo programadas que involucran el comportamiento esfuerzo – deformación del suelo, los cambios de estados de esfuerzos y los elementos estructurales en el proceso de construcción de la edificación.

De esta forma, se presentan los procedimientos aplicados en el cálculo en cada una de las etapas para la obtención de los resultados del análisis de interacción. Inicialmente para este análisis se requiere del uso de las pruebas de laboratorio, la exploración en campo y la instrumentación tanto inclinómetros como piezómetros con el fin de plantear un modelo geotécnico que represente adecuadamente el subsuelo y poder calcular los estados de esfuerzos del terreno en las etapas constructivas de la edificación.

Para aplicar la metodología propuesta en este documento, se debe conocer la geometría del muro a modelar ya que debe ser representado por medio de elementos barra y nodos conectados entre sí. Por lo tanto, el muro Milán va a ser modelado como si fuese una retícula tridimensional con seis grados de libertad apoyada en una serie de resortes que representan al suelo utilizando el módulo de reacción que permite calcular las fuerzas y las deformaciones producidas.

En cada una de las etapas de modelado del procedimiento de excavación se requiere conocer las cargas actuantes y los cambios de esfuerzos en la masa del suelo, los cuales influyen directamente en el análisis de interacción. Por medio de las hojas de cálculo y el software se calculan los cambios en la distribución de esfuerzos del terreno aplicando las soluciones de Mindlin (1936), Boussinesq (1885) y Holl (1940) por etapas.

Para realizar el cálculo de interacción se actualiza el programa EMISES3D compilado en lenguaje QBASIC y se genera una versión en lenguaje FORTRAN; esta actualización favorece al aumento de la capacidad de barras y nodos, como también en los tiempos de cálculo matricial para la estructura que se desea modelar que se describe de manera detallada más adelante.

5.1 Modelo reticular para la estructura de contención

Como característica de la excavación de estudio está la construcción de un muro Milán perimetral de 42 m de profundidad con 1 m de espesor, una trabe de coronamiento exterior en concreto armado de 8.0 m de altura con un ancho de 1.5 m que cuenta con elementos metálicos embebidos de hasta 100 t de peso que se apoya sobre el muro para transmitir las cargas estructurales, y una tablestaca metálica tipo XZ95 ($f_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$) de 12 m de longitud.

Se conoce que el muro Milán a analizar tiene una longitud de 132 m con secciones definidas constructivas de 6 m como se observa en la Figura 5.1, y 42 m de profundidad ubicados a partir del nivel -8.00 m desde el nivel de referencia de la banquetta. Adicionalmente, del nivel de banquetta 0.00 m al -12.00 m se instala la tablestaca metálica ya mencionada paralela al muro Milán.

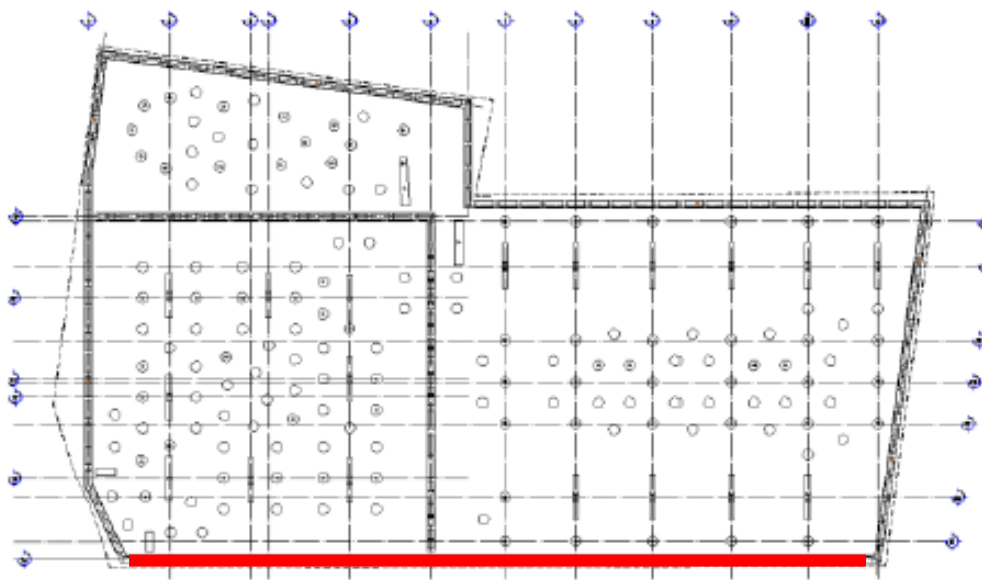


Figura 5.1. Ubicación en planta de las estructuras de contención de estudio (en rojo).
(CIMESA - Soletanche-Bachy, 2012)

Por lo tanto, para representar la tablestaca metálica XZ95, el muro Milán y la mega zapata perimetral que va a ser construida posteriormente, se genera un único modelo reticular para la estructura de contención utilizando barras y nodos que posean las propiedades de resistencia y comportamiento de cada uno de los elementos estructurales mencionados.

Se propone un modelo reticular para representar los elementos estructurales utilizados en la edificación de 132 m de largo por 50 m de profundidad que equivale a 1822 nodos y 943 vigas numerados de izquierda a derecha y de arriba a abajo como se indica en la Figura 5.2 y en el Anexo 4; cada uno de los resortes ubicados en los nodos de la retícula de la Figura 5.3 equivalen a la rigidez propia del suelo obtenida a partir del cálculo de influencias obtenido por Mindlin para carga horizontal.

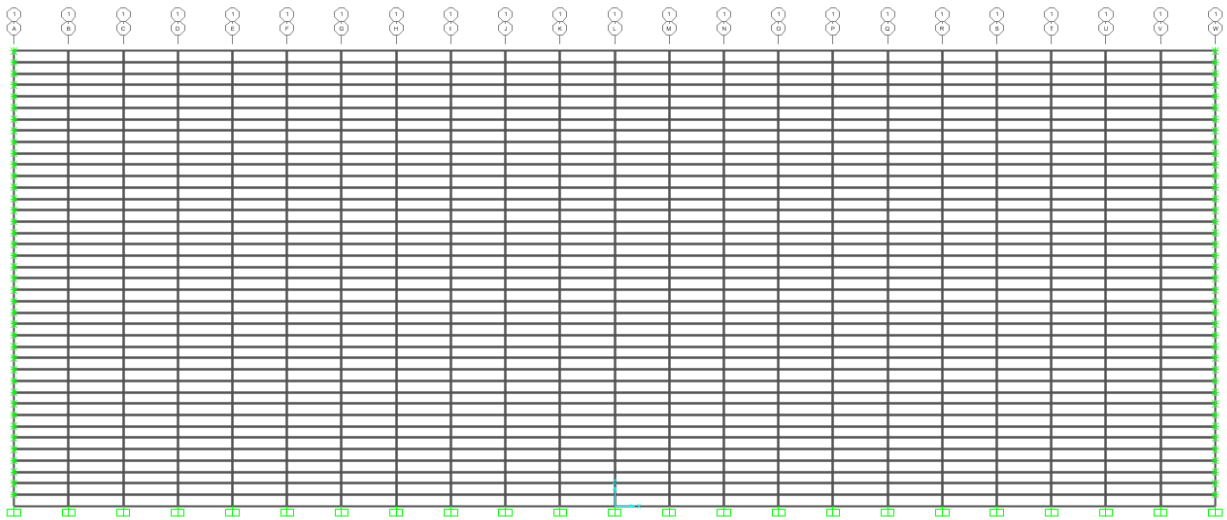


Figura 5.2. Modelo reticular de la estructura de contención.

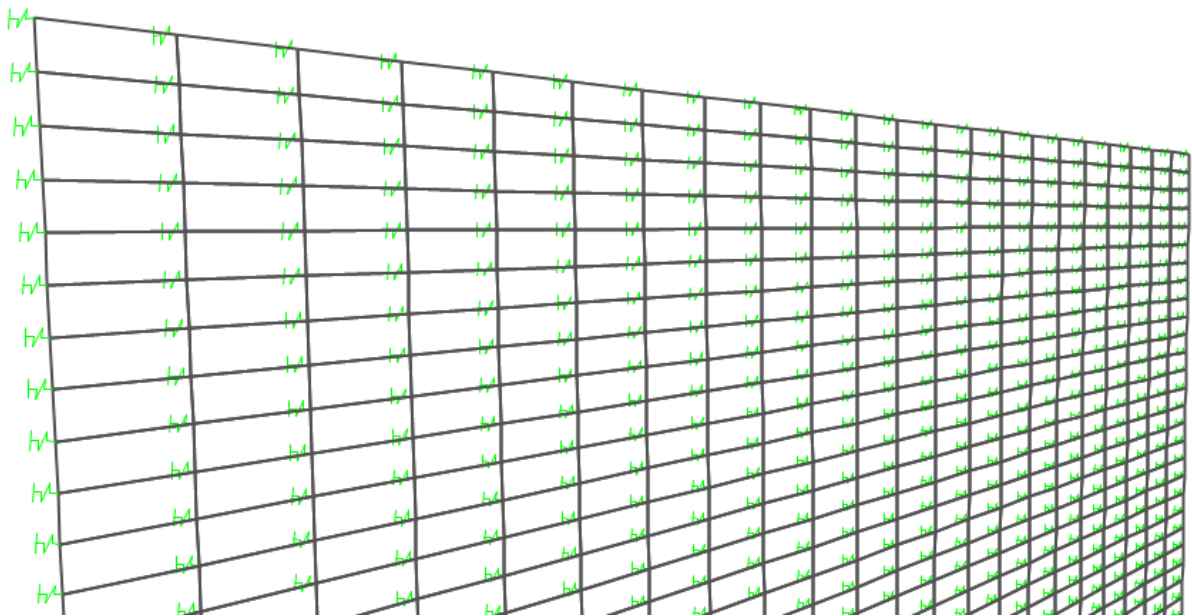


Figura 5.3. Modelo reticular con resortes del suelo.



5.2 Matriz de rigidez del suelo

El procedimiento para generar la matriz de rigidez del suelo requiere del uso del software FLEXHO o las hojas de cálculo programadas que incluyen las ecuaciones obtenidas de la integración y sus respectivos factores. Estas herramientas permiten calcular el cambio de esfuerzo aplicando la metodología de Mindlin para una carga rectangular uniforme horizontal en un punto o en una malla rectangular de nodos definidos como se muestra en la Figura 5.4.

Las limitantes que posee la hoja de cálculo son la capacidad de memoria y de procesamiento para retículas de grandes dimensiones, lo cual se traduce en tiempo y errores de sobreescritura.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS NORMALES HORIZONTALES PARA
CARGA HORIZONTAL RECTANGULAR UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA DE MINDLIN

W	1.000	t/m ²	Magnitud de la carga uniformemente distribuida (Va de izquierda a derecha).
V	0.250		Relación de Poisson.
X ₀	0.000	m	Coordenada x de los vértices de la carga constante.

VÉRTICES DE LA CARGA (SISTEMA DE REFERENCIA CON ORIGEN EN LA SUPERFICIE DEL MEDIO)

Nota: las Zs deben ser siempre positivas.

	V ₁		V ₂		
Y _{max}	50.001	m	Y _{min}	47.501	m
Z _{max}	132.001	m	Z _{min}	129.001	m

OK
OK

COORDENADAS DEL PUNTO DONDE SE QUIERE DETERMINAR EL ESFUERZO (SISTEMA DE REFERENCIA CON ORIGEN EN LA SUPERFICIE)

X ₀	1.0000	m	L	1.0000	m		Muro
Y ₀	50.0001	m	Δx	1.0000	m	Largo	132.0000
Z ₀	132.0001	m	Y	50.0000	m	Profundidad	50.0000
			Δy	5.0000	m		
			Z	132.0000	m		
			Δz	6.0000	m		

I ₁	1.079155	a ₀	-0.053
I ₂	0.000000	a ₁	-0.500
I ₃	0.507942	a ₂	2.000
I ₄	0.000000	a ₃	-3.000
I ₅	0.000000	a ₄	-6.000
I ₆	0.000000	a ₅	-4.500
I ₇	0.000000	a ₆	1.500
I ₈	0.000000	a ₇	18.000
I ₉	0.000000000000	a ₈	-15.000
		a ₉	3960.003

σ _x	0.1094670	t/m ²
----------------	-----------	------------------

Figura 5.4. Hoja de cálculo programada para calcular la matriz de rigidez del suelo.



En los anexos se presentan las hojas de cálculo actualizadas para Mindlin en un punto, Mindlin en una retícula basados en la versión de Arvizu (2017) y la codificación en FORTRAN.

Por lo tanto, la opción óptima es el uso del programa FLEXHO que permite calcular de forma eficiente la matriz de influencia, de coordenadas, de áreas tributarias, de flexibilidad y de rigidez del suelo a partir de las dimensiones de la retícula y sus respectivos ΔX , ΔY y ΔZ de análisis.

En la Figura 5.5 se presenta el diagrama de flujo para el uso del programa, los archivos requeridos de inicio y los archivos de resultado para aplicar la metodología de interacción.

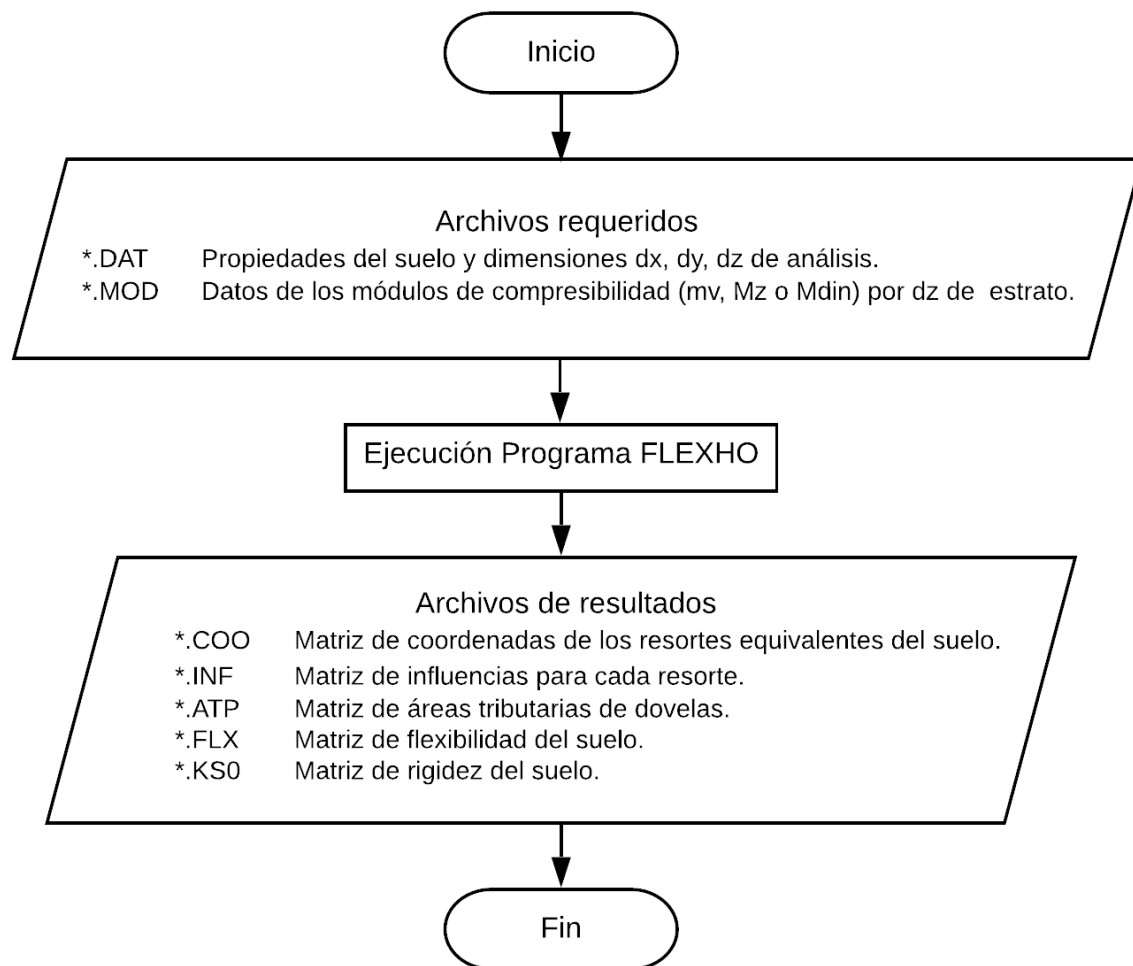


Figura 5.5. Diagrama de flujo para el programa FLEXHO.



Dentro de las principales ventajas del uso del programa se encuentran: los tiempos reducidos de procesamiento para matrices de grandes dimensiones, el uso de parámetros requeridos para el cálculo y la generación automática de una malla reticular rectangular que evita la necesidad de ingresar las coordenadas nodo por nodo.

Para aplicar la metodología de interacción es necesario calcular la matriz de rigidez del suelo por medio del programa FLEXHO. El programa como se indica en el diagrama de flujo requiere de dos archivos de inicio: el archivo de datos de propiedades básicas del modelo y el archivo de los módulos de compresibilidad del suelo.

5.2.1. Archivo de datos para el programa FLEXHO.

El archivo de datos con extensión .DAT debe contener el título del proyecto y las variables para la solución de Mindlin tales como la magnitud de la carga uniformemente distribuida w , el coeficiente de Poisson ν y la coordenada x_o de la aplicación de la carga; adicionalmente, se definen las dimensiones de la retícula y los ΔX , ΔY y ΔZ de análisis como se observa en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Datos de la retícula de la estructura de contención para la edificación de estudio.

Dimensión	Longitud (m)	Δ (m)
X	132.00	6.00
Y	20.00	1.00
Z	50.00	1.25

En la Figura 5.6 se muestra la captura del archivo de datos del programa para el caso de estudio.

```
TES-MMIL15.DAT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
"ANALISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX"
1.0000 0.2500 0.0000
132.0000 6.0000
50.0000 1.2500
20.0000 1.0000
```

Figura 5.6. Archivo de datos .DAT para el programa FLEXHO.



5.2.2. Archivo de módulos de compresibilidad para el programa FLEXHO.

Los módulos de compresibilidad M para la estratigrafía del terreno se obtienen a partir de más de 71 ensayos de compresión triaxial UU de los 6 sondeos ejecutados. Se calcula el módulo E_{50} y su inverso promedio equivale al módulo de compresibilidad M como se indica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Módulos M para la estratigrafía en el terreno de análisis.

Estrato	d_i (m)	E (t/m ²)	M_{ej} (m ² /t)	Estrato	d_i (m)	E (t/m ²)	M_{ej} (m ² /t)	Estrato	d_i (m)	E (t/m ²)	M_{ej} (m ² /t)
1	0.63	1050.0	0.00095238	15	1.25	18.13	570.0	0.00175439	29	1.25	35.63
2	1.25	950.0	0.00105263	16	1.25	19.38	500.0	0.00200000	30	1.25	36.88
3	1.25	850.0	0.00117647	17	1.25	20.63	940.0	0.00106383	31	1.25	38.13
4	1.25	850.0	0.00117647	18	1.25	21.88	650.0	0.00153846	32	1.25	39.38
5	1.25	430.0	0.00232558	19	1.25	23.13	670.0	0.00149254	33	1.25	40.63
6	1.25	520.0	0.00192308	20	1.25	24.38	410.0	0.00243902	34	1.25	41.88
7	1.25	530.0	0.00188679	21	1.25	25.63	510.0	0.00196078	35	1.25	43.13
8	1.25	390.0	0.00256410	22	1.25	26.88	510.0	0.00196078	36	1.25	44.38
9	1.25	680.0	0.00147059	23	1.25	28.13	510.0	0.00196078	37	1.25	45.63
10	1.25	680.0	0.00147059	24	1.25	29.38	510.0	0.00196078	38	1.25	46.88
11	1.25	640.0	0.00156250	25	1.25	30.63	610.0	0.00163934	39	1.25	48.13
12	1.25	520.0	0.00192308	26	1.25	31.88	610.0	0.00163934	40	1.25	49.38
13	1.25	520.0	0.00192308	27	1.25	33.13	610.0	0.00163934	41	0.63	50.00
14	1.25	860.0	0.00116279	28	1.25	34.38	610.0	0.00163934			

En la Figura 5.7 se muestra la captura del archivo de módulos de compresibilidad M [m²/t] del programa para el caso de estudio.

```
TES-MMIL17.MOD: Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
0.00100000
0.00111111
0.00125000
0.00125000
0.00232558
0.00192308
0.00188679
0.00256410
0.00147059
0.00147059
0.00156250
```

Figura 5.7. Archivo de módulos de compresibilidad .MOD para el programa FLEXHO.



Ya que se cuenta con los dos archivos de entrada, se procede a ejecutar el programa FLEXHO indicando el nombre de la familia de archivos sin extensión para iniciar el cálculo de la matriz de rigidez del suelo como se muestra en la Figura 5.8.

```
=====
                                F L E X H O

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE MATRIZ DE
INFLUENCIA, INCREMENTOS DE ESFUERZO,
FLEXIBILIDADES Y RIGIDECEZ HORIZONTALES
EN LA MASA DEL SUELO PARA
ANALISIS DE INTERACCION
SUELO - CIMENTACION - ESTRUCTURA

Version 19.1

=====

*** A D V E R T E N C I A ***
LOS AUTORES DE ESTE PROGRAMA NO SE HACEN RESPONSABLES
POR EL USO INDEBIDO DEL MISMO NI POR LOS RESULTADOS QUE ARROJE

INDIQUE NOMBRE DE LA FAMILIA DE ARCHIVOS (Sin extension)
(e.j. XYZ) ---> TES-MMIL15

P R O Y E C T O   D E   A N A L I S I S
ANALISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX
```

Figura 5.8. Inicio del programa FLEXHO.

El menú final de impresión permite guardar cada matriz en archivos independientes para su posterior uso como se muestra en la Figura 5.9; en los Anexos se presenta el instructivo del programa.

```
FINALIZA CALCULO DE MATRIZ DE FLEXIBILIDAD Y RIGIDEZ...

=====

O P C I O N E S   D E   I M P R E S I O N

[1] MATRIZ DE COORDENADAS DE RESORTES
[2] MATRIZ DE INFLUENCIAS
[3] MATRIZ DE AREAS TRIBUTARIAS DE DOVELAS
[4] MATRIZ DE FLEXIBILIDAD DEL SUELO
[5] MATRIZ DE RIGIDEZ DEL SUELO
[0] SALIR DE FLEXHO

=====

¿OPCION?: ---> 5_
```

Figura 5.9. Opciones de impresión del programa FLEXHO.



5.3 Matriz de interacción suelo – estructura de contención.

La siguiente etapa requiere del uso del programa EMISES3D para calcular la matriz de rigidez de la estructura e integrarla con la matriz de rigidez del suelo; este análisis de interacción permite obtener las deformaciones (desplazamientos lineales y angulares), los elementos mecánicos (fuerza axial y cortante, momento flexionante y torsionante), como también la distribución de reacciones en las áreas tributarias de los nodos del modelo.

En la Figura 5.10 se presenta el diagrama de flujo para el uso del programa EMISES3D, los archivos de inicio y el archivo de resultado del análisis de interacción ISE.

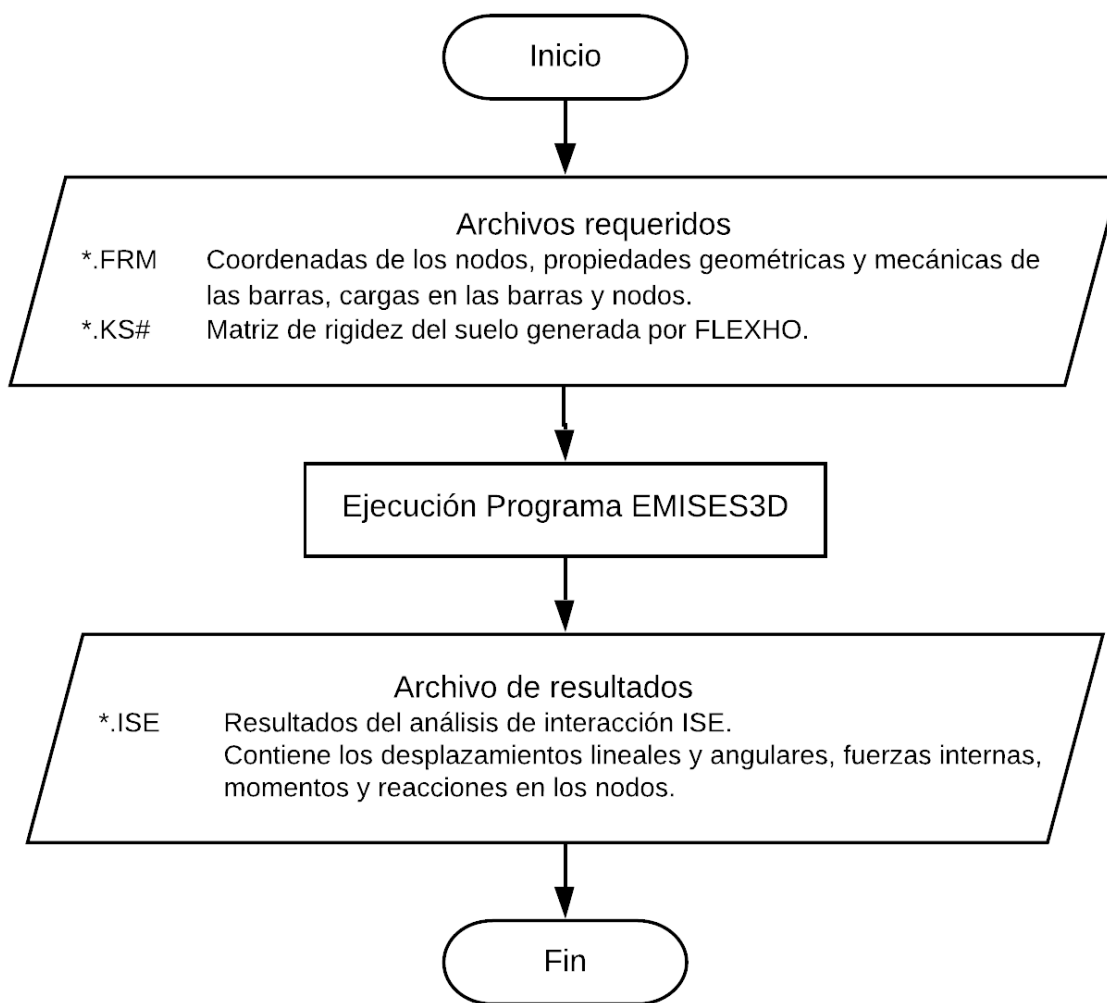


Figura 5.10. Diagrama de flujo para el programa EMISES3D.



Los programas FLEXHO y EMISES3D son las herramientas que se utilizaron para analizar secuencialmente el procedimiento constructivo en la edificación de estudio. De esta forma, se calculan por etapas sus respectivas variaciones de esfuerzo, las condiciones de carga y las deformaciones obtenidas por medio del método de interacción para ser directamente comparado con los resultados obtenidos de la campaña de instrumentación geotécnica de la obra.

5.3.1. Etapas constructivas de análisis

La edificación principal requiere de la construcción de sótanos aplicando el método “Top-Down” que utiliza como sistema de contención el muro Milán, la tablestaca metálica y la mega zapata estructural perimetral, por lo cual, se detallan a continuación las etapas constructivas a modelar de la excavación.

Etapas 1. Construcción del muro Milán.

En el perímetro definido de la edificación se construye el muro Milán con módulos de 6.0 m que suman una longitud total de 132 m a lo largo; para esta sección de la obra el muro inicia desde los -8.0 m y alcanza los -50.0 con el nivel de referencia 0.00 m de la banquetta lateral ya que requiere la construcción de la mega zapata estructural en la parte superior.

Etapas 2. Instalación de la tablestaca metálica 1.

Construido el muro, se instala una tablestaca metálica XZ95 ($f_y = 3\,515 \text{ kg/cm}^2$) a lo largo del perímetro de 12 m de profundidad desde el nivel de referencia 0.00 m de la banquetta.

Etapas 3. Excavación a -5.00 m e instalación de la tablestaca metálica 2.

Se excava al nivel -5.00 m en el terreno, se instala una segunda tablestaca metálica XZ95 ($f_y = 3\,515 \text{ kg/cm}^2$) paralela a la primera a 5.5 m, con 12 m de profundidad desde el nivel -5.00 m a los -17.00 m como se observa en la Figura 5.12.

El muro Milán y la tablestaca metálica 1 se instalan paralelas por lo cual se analizan como una sola retícula, en donde las propiedades de los elementos viga representan cada tipo de material y su resistencia a cada profundidad.

En la Figura 5.11 se representa la etapa 1 y 2 descritas para la construcción del muro e instalación de la tablestaca metálica 1.

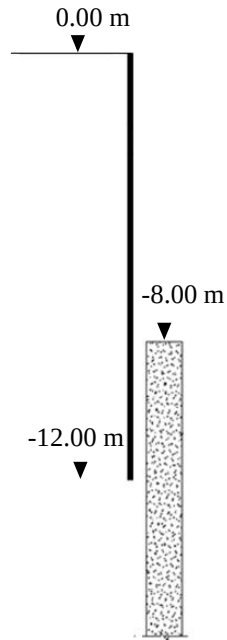


Figura 5.11. Etapa 1 y 2 del proceso de excavación en la obra.

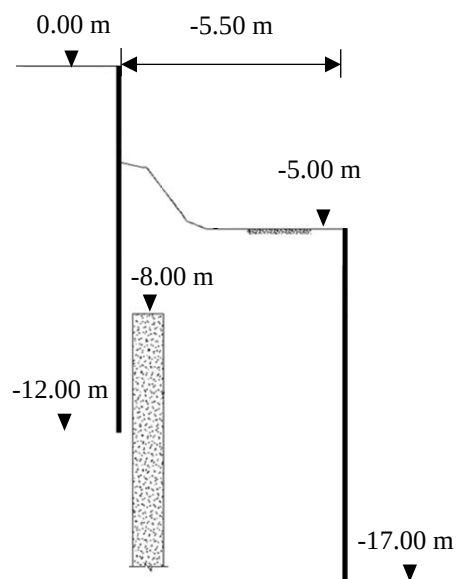


Figura 5.12. Etapa 3 del proceso de excavación de la obra.

Etapa 4. Instalación de vigas madrinas y puntales metálicos.

Se instalan vigas madrinas construidas con placas metálicas de 1.5'' de espesor en sección I al nivel -3.75 m del nivel de referencia ($f_y = 3\,515\text{ kg/cm}^2$) y se colocan puntales metálicos inclinados con un diámetro de 12'' ($f_y = 3\,515\text{ kg/cm}^2$) como se muestra en la Figura 5.13.

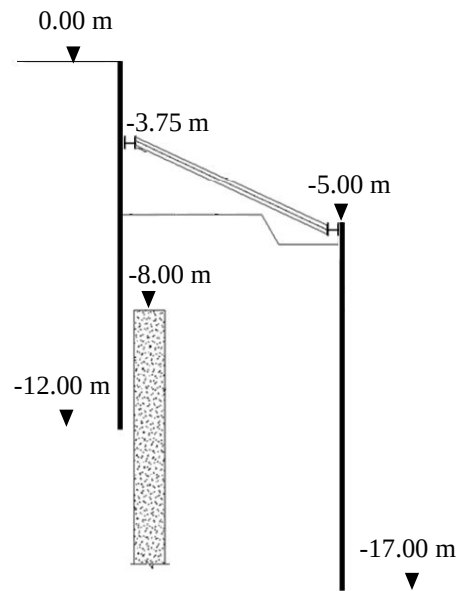


Figura 5.13. Etapa 4 del proceso de excavación de la obra.

En la Figura 5.14 se presenta una sección de la retícula del modelo con sus elementos.

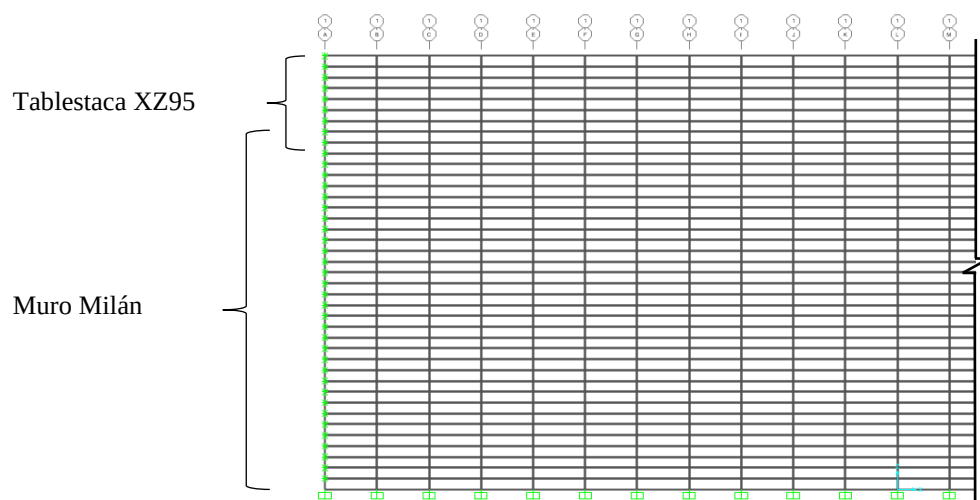


Figura 5.14. Definición de propiedades de la retícula en el modelo.

Etapa 5. Excavación a -8.10 con puntales metálicos.

Se realiza la excavación entre las dos tablestacas al nivel -8.10 m desde el nivel de referencia dejando descubierta la cabeza del muro Milán y restringiendo la excavación con los puntales metálicos inclinados (Figura 5.15).

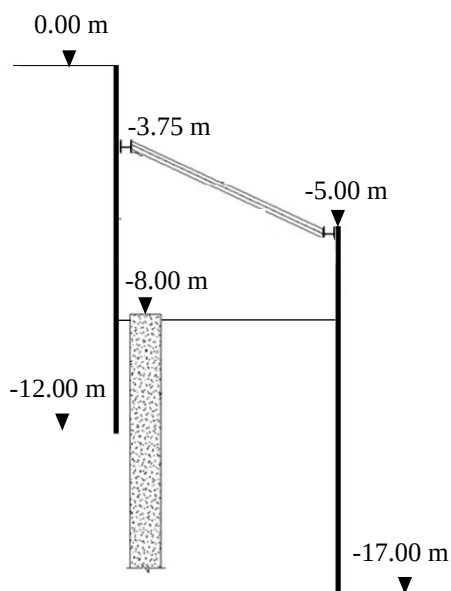


Figura 5.15. Etapa 5 del proceso de excavación de la obra.

Etapa 6. Construcción parcial del primer tramo de la mega zapata.

Luego de realizada la excavación a -8.10 m y descabezado el muro Milán se inicia la construcción sobre éste de la primera mitad de la mega zapata (Figura 5.16).

Etapa 7. Retiro de puntales.

Para continuar con la construcción de la mega zapata sobre el muro Milán se deben retirar los puntales de retención (Figura 5.17).

Etapa 8. Construcción total de la mega zapata.

Se finaliza la construcción de la mega zapata en todo el perímetro de la excavación (Figura 5.18).

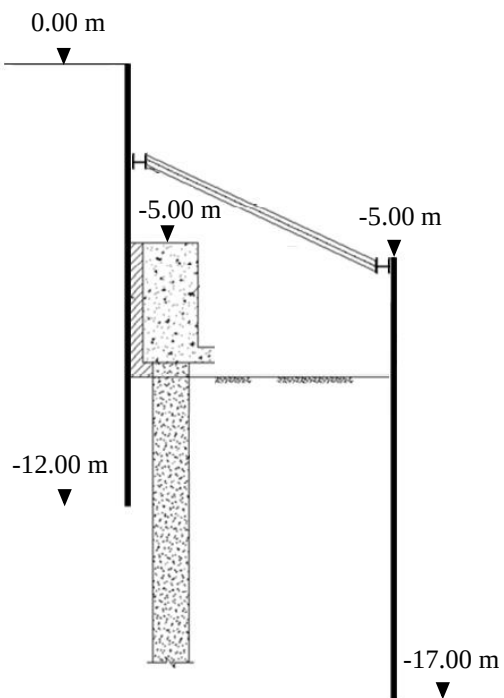


Figura 5.16. Etapa 6 del proceso de excavación de la obra.

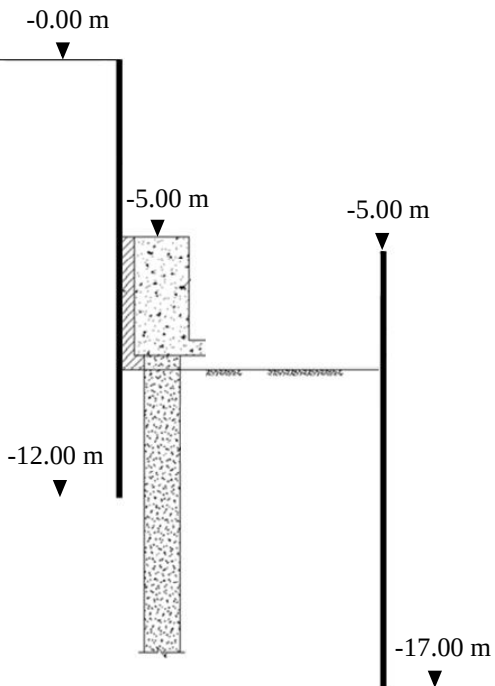


Figura 5.17. Etapa 7 del proceso de excavación de la obra.

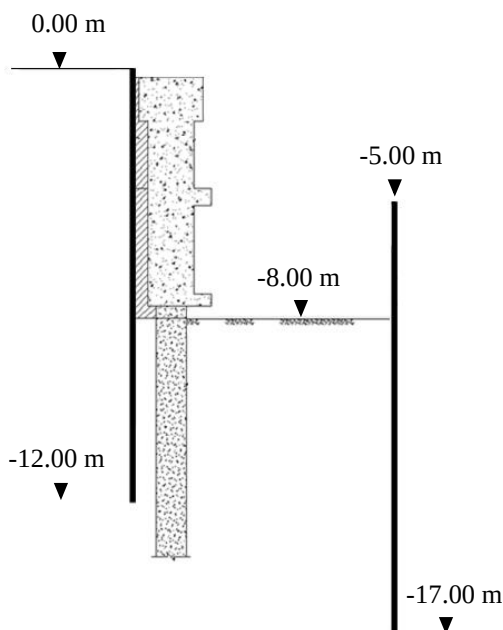


Figura 5.18. Etapa 8 del proceso de excavación de la obra.

Las etapas principales para el análisis de interacción son el número: 3, 5, 6 y 7; estas etapas son en las que los procesos constructivos tienen mayor influencia, es decir, aquellas donde existe un cambio de esfuerzos de gran magnitud o cambio de presiones laterales debido a la excavación de material o construcción de elementos de contención.

En las cuatro etapas a modelar se aplican diversas metodologías para estimar los cambios dentro de la masa del suelo como lo son: la solución de Boussinesq (1885) y Holl (1940) debido a una carga vertical uniformemente distribuida en un área rectangular y la solución de Terzaghi y Carothers para una carga vertical uniforme de área rectangular con ancho finito y longitud infinita.

A continuación, se describen las soluciones utilizadas para cada una de las etapas:

- **Etapa 3:** se calcula el incremento de esfuerzo producido por el tránsito vehicular en la Avenida Reforma (1.5 t/m^2) con el criterio de Terzaghi y Carother, se calcula el alivio de esfuerzo producido por el retiro de la cimentación antigua (-2.5 t/m^2) aplicando la solución de Holl (1940) y se calculan las presiones laterales debidas a la excavación a -5.00 m.
- **Etapa 5 y 6:** se calculan las presiones laterales debidas a la excavación a -8.10 m.
- **Etapa 7:** se calcula la carga que soportan los puntales en la etapa 6 para ser aplicada directamente a la retícula como carga en los nodos al nivel -3.75 m.



Se presenta en la Tabla 5.3 el resumen de las propiedades de la tablestaca metálica XZ95, el muro Milán y la mega zapata que fueron utilizadas asignar a cada una de las barras del modelo sus propiedades en el modelo de interacción.

Como se indica en la Figura 5.13 y en la Figura 5.14 la zona de traslape entre el muro Milán y la tablestaca XZ95 equivale a 4.0 m; para modelar la zona de traslape se modifican las propiedades de las barras que se encuentran a esa profundidad, sumando los módulos de elasticidad de los dos elementos de contención, es decir, en esa sección las barras tienen un módulo de elasticidad de 23 000 000 t/m².

Tabla 5.3. Propiedades de los elementos de contención del modelo de interacción.

Elemento de contención	E (t/m ²)	ν
Tablestaca metálica XZ95	21 000 000	0.3
Zona de traslape	23 000 000	0.3
Muro Milán	2 000 000	0.2
Mega Zapata	2 000 000	0.2

En la Etapa 6 se hace uso de un material de relleno seleccionado y compactado entre la tablestaca y la mega zapata; debido a las propiedades de este material (Tabla 5.4), se considera que transmite los empujes directamente a los elementos estructurales de contención.

Tabla 5.4. Propiedades del material de relleno entre la tablestaca y la mega zapata.

γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	E (t/m ²)	ν
1.6	3	30	2 000	0.3

Dado que en la Etapa 5 y 6 están actuando los puntales metálicos inclinados, los desplazamientos horizontales serán mínimos por la restricción que producen estos elementos de contención. En la Etapa 6 se obtiene por medio de EMISES3D las fuerzas de reacción que soportan los puntales metálicos.

La fuerza de reacción estimada a partir del análisis de interacción de la Etapa 6, se aplica en la Etapa 7 al nivel en donde se encontraban los puntales. En la Etapa 7, la rigidez del muro Milán y la mitad de la mega zapata restringen el desplazamiento de la masa del suelo, sin embargo, aún existe un tramo superior equivalente a 5 m en donde actúa la tablestaca metálica como elemento de contención, por lo cual, se continúan generando desplazamientos horizontales hasta que se finalice la construcción del tramo de la mega zapata, rigidizando el modelo de interacción.

Luego de calcular las cargas para las etapas mencionadas se debe estimar el área de influencia de cada una de las barras horizontales dentro del modelo como se observa en la Figura 5.19. De esta manera, se reparten las cargas en sentido horizontal aplicando el concepto de áreas tributarias utilizado en análisis estructural, es decir, se calcula para las barras de 6 metros de longitud la carga lineal uniforme correspondiente.

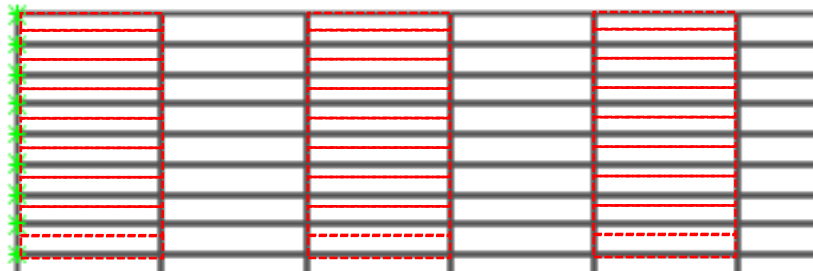


Figura 5.19. Áreas tributarias para las barras horizontales del modelo.

Por lo tanto, al aplicar esta metodología se obtienen áreas tributarias de 7 m^2 ($6.0 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$) y 3.5 m^2 ($6.0 \text{ m} \times 0.625 \text{ m}$) respectivamente. Considerando que las cargas se encuentran en $[\text{t}/\text{m}^2]$ se requiere calcular su equivalencia en $[\text{t}/\text{m}]$ para poder incluir en el archivo de datos .FRM las cargas lineales uniformes de cada las barras de la retícula como se muestra en la Figura 5.20.

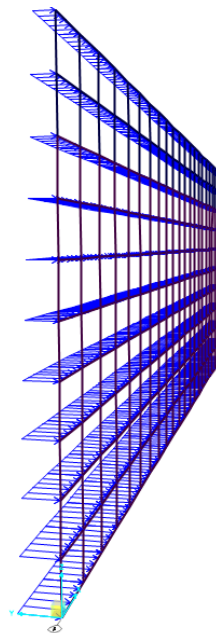


Figura 5.20. Asignación de cargas distribuidas lineales uniformes en el modelo.



5.3.2. Ejecución del programa EMISES3D

Se requiere la creación de un archivo base .FRM como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 5.10 que contenga los datos geométricos de la retícula a modelar, las coordenadas de los nodos, la definición de las barras, sus propiedades elásticas y las cargas calculadas anteriormente para cada etapa de análisis.

A partir de los archivos de entrada se ejecuta para cada una de las etapas el programa como se observa en la Figura 5.21 para obtener como resultado la matriz de interacción suelo - estructura conocida como EMISES. El programa genera un archivo de resultados ISE en donde se encuentran los desplazamientos de los nodos, las reacciones en los apoyos y los elementos mecánicos.

```
E
M I S E S      3 D      (VERSION 2019.1)

ECUACION MATRICIAL DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA
CODIFICACION EN FORTRAN: CZC. GLR. RRC. Y CJG.

*** A D V E R T E N C I A ***
LOS AUTORES DE ESTE PROGRAMA
NO SE HACEN RESPONSABLES POR
EL USO INDEBIDO DEL MISMO NI
POR LOS RESULTADOS QUE ARROJE

PARA ACLARACIONES, FAVOR DE COMUNICARSE AL TEL.5622-80-03,MEX.
CELULAR: 0445541815196

INGRESE NOMBRE DEL GRUPO DE ARCHIVOS (Sin extension):
(e.j. xYz) --> ■
```

Figura 5.21. Inicio del programa EMISES3D.

En los Anexos se presentan los archivos de datos .FRM y las matrices de rigidez del suelo para las etapas de modelado, el código de programación en FORTRAN y las cargas calculadas en cada etapa; adicionalmente, se anexa una figura del modelo reticular utilizado para el análisis de interacción con su respectiva numeración de nodos y barras.

5.4 Análisis de interacción suelo – estructura

El modelo reticular analizado se define por 943 nodos y 1 822 barras, en donde cada uno de los nodos posee seis grados de libertad generando un sistema matricial de 5 658 ecuaciones; este sistema de ecuaciones se reduce si se restringe el giro o el desplazamiento, lo cual favorece a los tiempos de cálculo y el uso de la memoria de procesamiento.

Al realizar el análisis de interacción suelo - estructura se obtuvieron los desplazamientos horizontales para cada etapa presentados en la Tabla 5.5 y se grafican en la Figura 5.22.

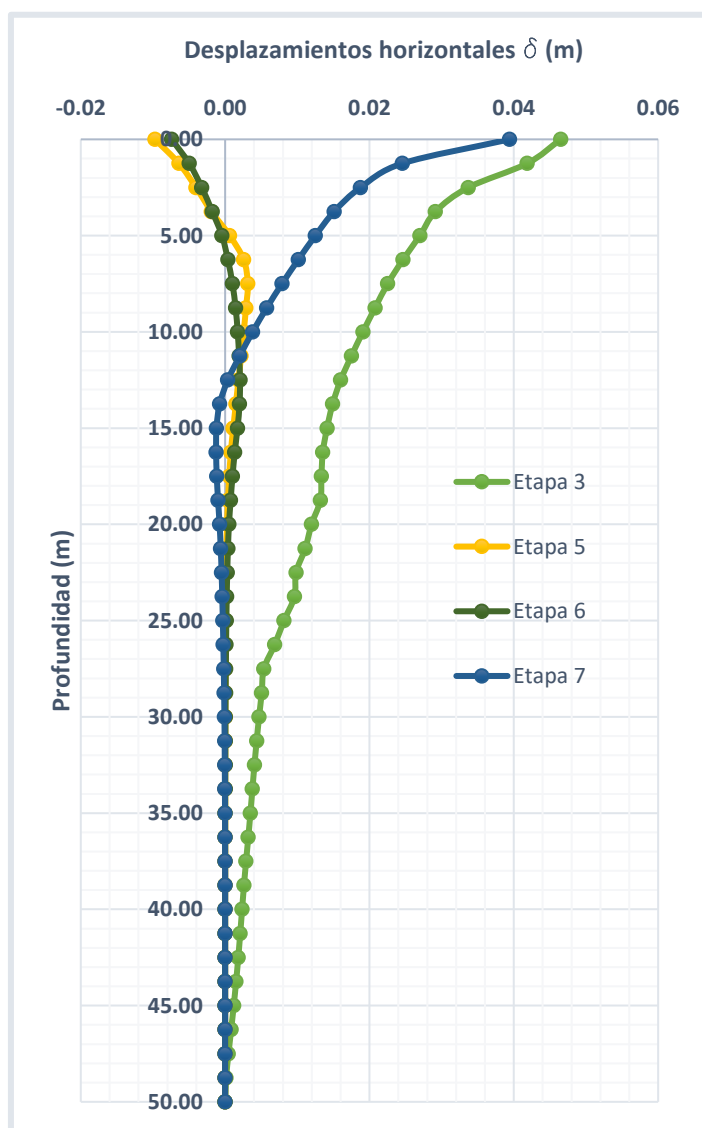


Figura 5.22. Desplazamientos horizontales para las cuatro etapas de análisis.



Tabla 5.5. Resultados del análisis de interacción por etapas.

N° Nodo	Prof. (m)	Etapas 3 (m)	Etapas 5 (m)	Etapas 6 (m)	Etapas 7 (m)
7	0.00	0.046500	-0.00972	-0.00740	0.039420
30	1.25	0.041860	-0.00640	-0.00498	0.024550
53	2.50	0.033690	-0.00404	-0.00323	0.018760
76	3.75	0.029140	-0.00190	-0.00179	0.015110
99	5.00	0.026990	0.00063	-0.00043	0.012510
122	6.25	0.024640	0.00257	0.00038	0.010140
145	7.50	0.022520	0.00314	0.00101	0.007880
168	8.75	0.020780	0.00289	0.00145	0.005770
191	10.00	0.019090	0.00257	0.00174	0.003810
214	11.25	0.017500	0.00222	0.00193	0.002020
237	12.50	0.016010	0.00185	0.00206	0.000370
260	13.75	0.014890	0.00149	0.00200	-0.000760
283	15.00	0.014120	0.00112	0.00171	-0.001200
306	16.25	0.013530	0.00079	0.00133	-0.001250
329	17.50	0.013340	0.00057	0.00102	-0.001160
352	18.75	0.013190	0.00039	0.00076	-0.000980
375	20.00	0.011980	0.00026	0.00053	-0.000770
398	21.25	0.011100	0.00018	0.00039	-0.000610
421	22.50	0.009830	0.00013	0.00029	-0.000490
444	23.75	0.009610	0.00010	0.00022	-0.000400
467	25.00	0.008160	0.00007	0.00017	-0.000320
490	26.25	0.006870	0.00005	0.00013	-0.000250
513	27.50	0.005370	0.00004	0.00010	-0.000190
536	28.75	0.005070	0.00003	0.00007	-0.000140
559	30.00	0.004700	0.00002	0.00005	-0.000100
582	31.25	0.004370	0.00002	0.00004	-0.000070
605	32.50	0.004060	0.00001	0.00003	-0.000050
628	33.75	0.003780	0.00001	0.00002	-0.000030
651	35.00	0.003500	0.00001	0.00001	-0.000020
674	36.25	0.003210	0.00001	0.00001	-0.000010
697	37.50	0.002900	0.00001	0.00001	-0.000010
720	38.75	0.002610	0.00000	0.00001	0.000000
743	40.00	0.002350	0.00000	0.00000	0.000000
766	41.25	0.002090	0.00000	0.00000	0.000000
789	42.50	0.001820	0.00000	0.00000	0.000000
812	43.75	0.001520	0.00000	0.00000	0.000000
835	45.00	0.001190	0.00000	0.00000	0.000000
858	46.25	0.000830	0.00000	0.00000	0.000000
881	47.50	0.000460	0.00000	0.00000	0.000000
904	48.75	0.000140	0.00000	0.00000	0.000000
927	50.00	0.000000	0.00000	0.00000	0.000000



Es importante estimar las propiedades de los elementos que van a representar la estructura de contención, ya que son estas las que soportan el modelo de comportamiento esfuerzo – deformación. Por lo tanto, los parámetros de resistencia como el módulo elástico y la relación de Poisson, y los parámetros geométricos como el área y los momentos de inercia requieren ser calculados a detalle debido a que intervienen directamente en la rigidez de los elementos de la retícula en diferentes etapas constructivas.

De esta forma, se evidencia que los desplazamientos horizontales correspondientes a las etapas 3 y 7 son los de mayor magnitud debido al proceso constructivo que se modela; estos procesos corresponden a la excavación general de -5.0 m y a la construcción del segundo tramo de la mega zapata dejando una sección de la tablestaca metálica libre soportando los empujes laterales y las cargas transmitidas del terreno.

Los desplazamientos horizontales obtenidos por etapas a partir de los -8.0 metros de profundidad son menores a 1 cm, debido a que se encuentra actuando la rigidez del muro Milán combinado con la restricción lateral de los puntales metálicos inclinados (Etapa 5 y 6), y la construcción de la mega zapata (Etapa 6, 7 y 8).

De igual manera, los mayores desplazamientos se alcanzan desde el nivel 0.0 m hasta -8.0 m de profundidad debido a que la tablestaca metálica es la que actúa directamente como soporte y se encuentra conteniendo los empujes laterales al momento de realizar la excavación.

Al modelar la construcción de la primera mitad de la mega zapata y el muro Milán de la etapa 7, el comportamiento de la retícula es mucho más rígido que en las anteriores etapas debido al cambio de las propiedades de resistencia, es decir, la sección de la retícula del nivel -5.00 m a -8.00 m que anteriormente representaba solamente la tablestaca metálica ahora representa la tablestaca y la mega zapata con la rigidez de ambos elementos.

A continuación, se desea comparar el reporte del inclinómetro “INC-01” ubicado en el mismo eje de la estructura de contención contra los resultados obtenidos del análisis de interacción suelo – estructura. Para generar la gráfica final, se van acumulando los desplazamientos horizontales obtenidos a profundidad por etapas como se observa en la Tabla 5.6.



Tabla 5.6. Resultados del análisis de interacción acumulado por etapas.

N° Nodo	Prof. (m)	Etapas 3 (m)	Etapas 5 (m)	Etapas 6 (m)	Etapas 7 (m)
7	0.00	0.04849	0.04005	0.03353	0.06834
30	1.25	0.03551	0.02954	0.02488	0.05057
53	2.50	0.02698	0.02292	0.01965	0.03933
76	3.75	0.02203	0.01995	0.01799	0.03379
99	5.00	0.01947	0.01991	0.01932	0.03231
122	6.25	0.01689	0.01930	0.01953	0.03003
145	7.50	0.01476	0.01776	0.01864	0.02678
168	8.75	0.01313	0.01589	0.01723	0.02317
191	10.00	0.01153	0.01399	0.01564	0.01955
214	11.25	0.00999	0.01211	0.01397	0.01602
237	12.50	0.00852	0.01030	0.01230	0.01264
260	13.75	0.00731	0.00873	0.01068	0.00985
283	15.00	0.00643	0.00750	0.00917	0.00789
306	16.25	0.00577	0.00653	0.00783	0.00651
329	17.50	0.00543	0.00597	0.00697	0.00575
352	18.75	0.00521	0.00558	0.00632	0.00529
375	20.00	0.00503	0.00527	0.00579	0.00499
398	21.25	0.00507	0.00524	0.00562	0.00498
421	22.50	0.00519	0.00531	0.00559	0.00508
444	23.75	0.00534	0.00543	0.00565	0.00523
467	25.00	0.00537	0.00543	0.00559	0.00526
490	26.25	0.00530	0.00535	0.00547	0.00521
513	27.50	0.00515	0.00518	0.00527	0.00507
536	28.75	0.00492	0.00495	0.00502	0.00487
559	30.00	0.00463	0.00465	0.00470	0.00460
582	31.25	0.00434	0.00435	0.00438	0.00431
605	32.50	0.00405	0.00406	0.00408	0.00403
628	33.75	0.00377	0.00378	0.00380	0.00377
651	35.00	0.00348	0.00349	0.00350	0.00348
674	36.25	0.00318	0.00319	0.00320	0.00319
697	37.50	0.00287	0.00287	0.00288	0.00287
720	38.75	0.00257	0.00257	0.00258	0.00258
743	40.00	0.00228	0.00228	0.00228	0.00228
766	41.25	0.00199	0.00199	0.00199	0.00199
789	42.50	0.00168	0.00168	0.00168	0.00168
812	43.75	0.00136	0.00136	0.00136	0.00136
835	45.00	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103
858	46.25	0.00068	0.00068	0.00068	0.00068
881	47.50	0.00036	0.00036	0.00036	0.00036
904	48.75	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011
927	50.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

En la Figura 5.23 se observa que los desplazamientos horizontales acumulados al finalizar la Etapa 7 presentan una tendencia similar al reporte del inclinómetro “INC-01” ubicado en el mismo eje de la estructura de contención; a la vez, se identifica que los valores máximos calculados y reportados al nivel 0.00 m son equivalentes a los $7\text{ cm} \pm 0.1$ de deformación.

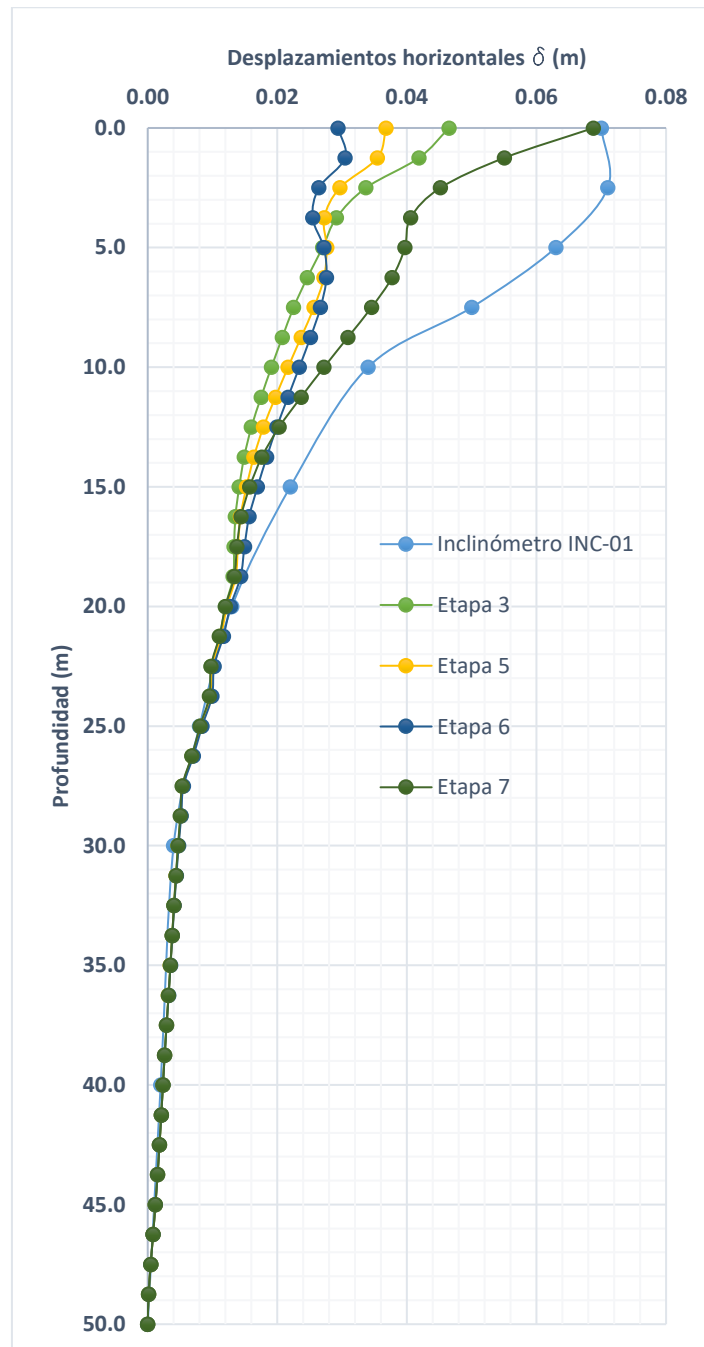


Figura 5.23. Desplazamientos horizontales vs reporte del inclinómetro “INC-01”.



En términos generales, la aplicación de la metodología de interacción suelo – estructura fue útil para calcular los efectos generados durante las etapas constructivas de la excavación. Por lo tanto, dentro de los alcances de ingeniería se debería considerar este método como una herramienta práctica para el cálculo de deformaciones y reacciones en una edificación.

Debido a la rigidez que aporta el muro Milán a profundidad se evidencia que los desplazamientos unitarios calculados y reportados desde los -15.0 m no superan los 0.5 cm en ninguna de las etapas modeladas y la diferencia entre los valores no supera el 6%; por esta razón, se podría afirmar que el uso de este tipo de muro y acompañado de un diseño óptimo favorece al control de las deformaciones en el terreno.

A pesar que al nivel 0.0 m se alcanzan los mismos desplazamientos del análisis de interacción con el inclinómetro “INC-01”, se observa que los desplazamientos obtenidos hasta una profundidad de 15 m presentan una diferencia con respecto a los valores reportados de entre un 20% y 30% aproximadamente.

Por lo tanto, es necesario evaluar si el uso de los 3 diferentes elementos de contención para realizar el proceso de excavación fueron la mejor opción para controlar las deformaciones en el terreno, debido a que los desplazamientos calculados y los reportados son de magnitudes considerables que afectan directamente al estado de esfuerzos en el terreno y podrían llegar a inducir superficies de falla dentro de la obra.

Cabe señalar que en el modelo de interacción se replicaron las condiciones teóricas de diseño en cada una de las etapas constructivas mencionadas, sin embargo, posiblemente hubo afectación en el proceso de excavación o en la construcción de los elementos derivado de posibles filtraciones de agua (se menciona la existencia de tuberías de agua viejas dentro de la zona de excavación), cargas excesivas aplicadas en las plataformas de trabajo por el material o los equipos de la obra, entre otros factores, que favorecieron a incrementar los desplazamientos reportados por el inclinómetro y que no son posibles incluirlos en el modelo por su incertidumbre.

De esta manera, se realiza un análisis paramétrico con el fin de calibrar las propiedades que reflejen la condición real obtenida de comportamiento en el reporte del inclinómetro “INC-01”.



Como se indicó anteriormente, existen algunos factores que podrían haber incrementado los desplazamientos horizontales en la construcción. Para incluir estos factores en el modelo reticular se aplican las siguientes consideraciones: se varió disminuyendo entre un 5% al 15% el módulo de compresibilidad del suelo calculado de cada estrato, por lo cual, se obtiene una matriz con los resortes equivalentes mucho menos rígida que la inicial; adicionalmente, se disminuye en un 20% el módulo de elasticidad del concreto para el muro Milán.

Los resultados obtenidos al variar las propiedades del muro Milán y la compresibilidad del suelo evidencian que el modelo reticular se convierte en un elemento muy flexible, en donde la aplicación de las cargas genera grandes deformaciones en los primeros 15 m de excavación alcanzando hasta los 15 cm.

En la Figura 5.24 se evidencia que los desplazamientos horizontales en la sección superior calculados alcanzan 2 veces los reportados por el inclinómetro “INC-01” de estudio. A la vez, se observa que el modelo de interacción es muy sensible a las variaciones del módulo de compresibilidad seleccionado para el suelo en cada estrato, acumulando las mayores deformaciones en los primeros metros de la tablestaca metálica.

A partir de los resultados del análisis paramétrico del modelo de interacción, se podría afirmar que los valores seleccionados de los módulos elásticos del suelo de las pruebas triaxiales UU difieren de los reales y son conservadores. Este fenómeno podría deberse a fugas de agua dentro de la obra o a posibles afectaciones de los estratos arcillosos por los procesos constructivos, por lo cual, los desplazamientos horizontales iniciales calculados son mucho menores a los reportados por el inclinómetro.

Finalmente, se evidencia en el análisis paramétrico que al disminuir el valor del módulo elástico de los estratos del suelo se obtiene una curva de desplazamientos horizontales mucho más cercana a los desplazamientos reales reportados por las lecturas del inclinómetro “INC-01”.

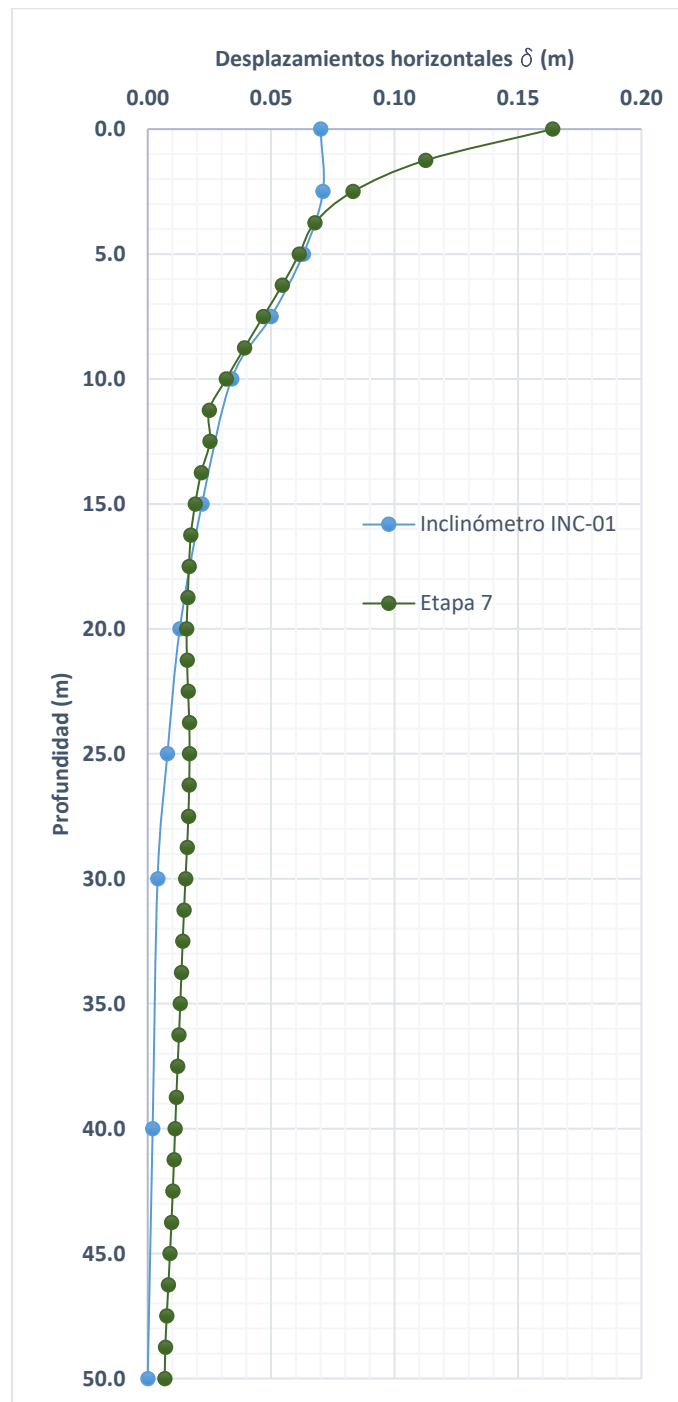


Figura 5.24. Análisis paramétrico vs reporte del inclinómetro “INC-01”.



CONCLUSIONES

La metodología propuesta de interacción es una herramienta óptima para calcular la compatibilidad de deformaciones entre el suelo y el elemento de contención producidas en una excavación profunda; dentro de las ventajas del método está el que permite simular diferentes etapas constructivas a corto, mediano y largo plazo variando las condiciones de esfuerzo y las propiedades de los elementos.

Para realizar la excavación se empleó el método “Top-Down” por medio de la instalación de una tablestaca metálica, la construcción de muros Milán y una mega zapata, los cuales soportaron los empujes laterales y conectan estructuralmente con las losas del proyecto. Por lo tanto, se analiza a corto plazo un modelo reticular que representa los elementos estructurales de la excavación de 132 m de largo por 50 m de profundidad, equivalente a 943 barras y 1 822 nodos.

Se crea el programa FLEXHO como herramienta de cálculo que permite obtener de forma eficiente la matriz de influencias, de coordenadas, de áreas tributarias, de flexibilidad y de rigidez del suelo a partir de las dimensiones de la retícula y sus respectivos ΔX , ΔY y ΔZ de análisis. Este programa codificado en lenguaje FORTRAN genera automáticamente una malla reticular que evita la necesidad de ingresar las coordenadas nodo por nodo del modelo.

Para aplicar el método de interacción se actualizó el programa EMISES3D compilado en QBASIC a una versión en lenguaje FORTRAN; esta actualización favoreció al aumento de la capacidad de cálculo matricial y reducción de los tiempos de procesamiento. Adicionalmente, se elaboraron hojas de cálculo programadas para calcular los cambios en la distribución de esfuerzos en el terreno aplicando las soluciones de Mindlin (1936), Boussinesq (1885) y Holl (1940).

Es fundamental establecer correctamente las propiedades de los elementos que representan la retícula porque son éstas las que sustentan el modelo de interacción suelo – elemento de contención. Por tal motivo, los parámetros de resistencia (módulo elástico y la relación de Poisson) y los parámetros geométricos (área, momentos de inercia) deben ser calculados a detalle ya que intervienen directamente en la rigidez del modelo.



A partir de los resultados obtenidos del análisis de interacción por etapas se procedió a comparar con el registro del inclinómetro “INC-01” para evaluar su similitud. Los mayores desplazamientos horizontales calculados se obtuvieron en los primeros 8.0 m de profundidad, es decir, en donde la tablestaca metálica se encontraba actuando frente a los empujes laterales; sin embargo, los desplazamientos obtenidos hasta los 15 m presentan una diferencia con respecto a los valores reportados de entre un 20% y 30% aproximadamente.

El desplazamiento horizontal máximo acumulados al nivel 0.0 m es similar al reportado por el inclinómetro “INC-01” con una diferencia de 1.5% aproximadamente, por lo tanto, se puede afirmar que el análisis de interacción permitió obtener valores de desplazamiento con una tendencia similar a los registros del inclinómetro.

Asimismo, los desplazamientos horizontales por etapa desde los 16.0 m de profundidad tienden a ser menores que 0.5 cm, esto debido a que los elementos de contención como el muro Milán, la tablestaca y el primer tramo de la mega zapata aportan una gran rigidez al modelo.

A pesar de replicar las condiciones teóricas de diseño en el modelo de interacción, posiblemente existieron efectos adicionales debidos a los procesos constructivos que favorecieron el incremento de las deformaciones en el suelo reportados por el inclinómetro “INC-01”.

Por tal motivo, se realiza un análisis paramétrico al disminuir entre un 5% al 15% el módulo de compresibilidad del suelo de cada estrato, por lo cual, se obtiene una matriz con los resortes equivalentes mucho menos rígida que la inicial y disminuyendo en un 20% el módulo de elasticidad del concreto para el muro Milán.

Los resultados obtenidos del análisis paramétrico evidencian que el modelo reticular se convierte en un elemento muy flexible, en donde la aplicación de las cargas genera grandes deformaciones en los primeros 15 m de excavación alcanzando hasta los 15 cm. Se podría afirmar que los valores seleccionados de los módulos elásticos del suelo de las pruebas triaxiales UU difieren de los reales y son conservadores. Este fenómeno podría deberse a fugas de agua dentro de la obra o a posibles afectaciones de los estratos arcillosos por los procesos constructivos.



Por consiguiente, es necesario evaluar si el procedimiento constructivo y el uso de los tres elementos de contención fueron óptimos, ya que existieron desplazamientos horizontales considerables que pudieron haber llevado la obra a un estado de falla generalizado. Sin duda, el uso del muro Milán contribuye de manera fundamental a resistir los empujes del suelo y al control de las deformaciones, sin embargo, en otra obra similar se podría plantear un proceso constructivo diferente para disminuir los desplazamientos en el suelo.

El programa EMISES3D tiene la capacidad de calcular las deformaciones (desplazamientos lineales y angulares), los elementos mecánicos (fuerza axial y cortante, momento flexionante y torsionante), como también la distribución de reacciones en las áreas tributarias de los nodos, lo cual permitiría realizar un diseño estructural de los elementos de contención, sin embargo, estos análisis se encuentran fuera del alcance de esta tesis.

Finalmente, se deben enfocar los esfuerzos de los investigadores en la creación de herramientas de cálculo libre para el uso de la comunidad técnica, que les permita hacer diseños más racionales y seguros tomando como base el conocimiento de vanguardia y las mediciones en campo.



REFERENCIAS

- Arvizu, M. (2017). “Modelado numérico de un muro Milán anclado y comparación con mediciones de campo”, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Badillo, E. y Rico, A. (1979). “Mecánica de Suelos”. Tomo II (Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos), Ed. LIMUSA, 2a edición.
- Budhu M (2011). “Soil Mechanics and foundations”, 3er edition, John Wiley & Sons.
- Deméneghi, A. (1979). “Un Método para el Análisis Conjunto de la Estructura y el Suelo”. Revista Ingeniería, Vol. XLIX, N.º 3.
- _____. (1992). “Interacción Estática Suelo - Estructura. Análisis Tridimensional”. Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Fan, Chia-Cheng & Fang, Yung-Show. (2010). “Numerical solution of active earth pressures on rigid retaining walls built near rock faces”. Computers and Geotechnics - COMPUT GEOTECH. 37. 1023-1029. 10.1016/j.compgeo.2010.08.004.
- Holl, D. L., “Stress Transmissions on Earth”, Proc. Hwy. Res. Bd., vol. 20, pp. 709–722, 1940.
- “Interacción Suelo-Estructura y Diseño Estructural de Cimentaciones”. Reunión conjunta SMMS, SMIS y SMIE. SMMS, septiembre de 1991.
- Jurgenson, L. (1934) “Application of Theories of Elasticity and Plasticity to Foundation Problems”, Journal Boston Soc. of Civil Engineering, Vol. 21, No. 3.
- López, G. (2012). “Un método directo de interacción tridimensional suelo-estructura”, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López, G., Zea, C. y Rivera C. (2011). “Una solución directa al problema de interacción suelo-estructura”. XIV Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Toronto, Canadá.
- Luthe, R. et al (1991). “Métodos Numéricos”, Ed. LIMUSA. México.
- Manual de Diseño de Obras Civiles (2014). Capítulo B.2.6 de Estructuras de retención. Comisión Federal de Electricidad CFE.



Meza, B., Clavellina, G., De la Rosa, J., Paulín, J.A. (2012). “Construcción de 7 sótanos mediante el procedimiento “Top-Down” para una Torre de 52 niveles, ubicada en la zona de lago de la Ciudad de México”. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo. México.

Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones de la Ciudad de México (NTCDCCM).

Petersson Mattias (2012). “In depth study of lateral earth pressure”, Master of Science Thesis in the Master’s Programme Geo and Water Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

Poulos, H. and Davis, E. (1974). “Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics”. Ed. John Wiley and Sons, USA.

Rivera, R., Zea, C. y Monroy, F. (1996). “Procedimiento de Análisis de Interacción Suelo-Retícula de Cimentación”. Memorias de la XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Morelia, Michoacán.

Sánchez, J. L. y Enríquez, P. (1982) “Un Método de Interacción Suelo-Estructura”. Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Morelia, Mich., México, 1982

Santoyo E (2002). “Manual de construcción geotécnica”, Tomo I, Capítulo 3, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C

Tamez E (2001). “Ingeniería de cimentaciones, conceptos básicos de la práctica”, TGC Geotecnia (2001)

Yang, Kuo-Hsin & Liu, Chia-Nan. (2007). “Finite Element Analysis of Earth Pressures for Narrow Retaining Wall”. Journal of GeoEngineering. 2. 10.6310/jog.2007.2(2).1.

Zeevaert, L. (1973). “Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions”. Ed. Van Nostrand Reinhold, Co. New York, USA.

_____. (1980). “Interacción Suelo-Estructura de Cimentación”. Ed. Limusa, México.

Zigurat. (2017). “El muro pantalla o el metro de Milán”. Madrid, España. Zigurat Blog. Recuperado de <https://www.e-zigurat.com/blog/es/muro-pantalla-metro-milan/>



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**MODELACIÓN DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UNA EXCAVACIÓN CON INTERACCIÓN
SUELO – ELEMENTO DE CONTENCIÓN**

ANEXOS



ANEXO 1.

Hojas de cálculo para estimar la distribución de esfuerzos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS NORMALES HORIZONTALES PARA
CARGA HORIZONTAL RECTANGULAR UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA DE MINDLIN

w	1.000	t/m^2	Magnitud de la carga uniformemente distribuida (Va de izquierda a derecha).
ν	0.250		Relación de Poisson.
x_v	2.000	m	Coordenada x de los vértices de la carga constante.

VÉRTICES DE LA CARGA (SISTEMA DE REFERENCIA CON ORIGEN EN LA SUPERFICIE DEL MEDIO)

Nota: las Zs deben ser siempre positivas.

$Y_{máx}$	8.000	m	$Y_{mín}$	2.000	m	OK
$Z_{máx}$	8.000	m	$Z_{mín}$	2.000	m	OK

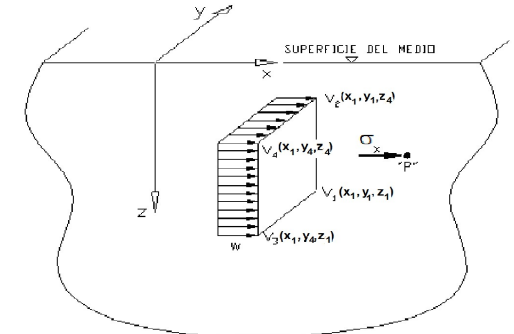
COORDENADAS DEL PUNTO DONDE SE QUIERE DETERMINAR EL ESFUERZO (SISTEMA DE REFERENCIA CON ORIGEN EN LA SUPERFICIE)

X_p	3.000	m
Y_p	5.000	m
Z_p	5.000	m

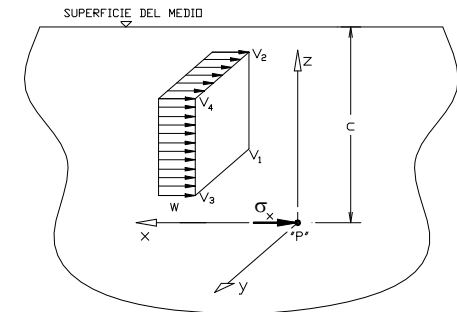
VÉRTICES DE LA CARGA (EL ORIGEN SE MUEVE AL PUNTO "P" Y SE INVIERTEN LOS EJES "X", "Y" y "Z")

X_c	1.000	m	Separación perpendicular a la carga uniformemente distribuida.		
	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}	V_{c4}	
Y	-3.000	-3.000	3.000	3.000	m
Z	-3.000	3.000	-3.000	3.000	m
R^2	19.000	19.000	19.000	19.000	
Ra^2	10.000	10.000	10.000	10.000	
Rb^2	10.000	10.000	10.000	10.000	
Rc	-13.000	-7.000	-13.000	-7.000	
Rcz^2	179.000	59.000	179.000	59.000	

	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}	V_{c4}
F_1	1.119770	-1.119770	-1.119770	1.119770
F_2	1.240323	1.220143	-1.240323	-1.220143
F_3	0.510906	-0.510906	-0.510906	0.510906
F_4	0.516323	0.516073	-0.516323	-0.516073
F_5	-0.002193	-0.007362	0.002193	0.007362
F_6	0.774510	0.774381	-0.774510	-0.774381
F_7	13.320205	13.316353	-13.320205	-13.316353
F_8	0.409924	0.401507	-0.409924	-0.401507
F_9	-7.845234	-7.845290	7.845234	7.845290



SISTEMA DE REFERENCIA CON ORIGEN EN LA SUPERFICIE DEL MEDIO



SISTEMA DE REFERENCIA EN EL PUNTO "P"

I_1	4.479078	a_0	-0.053
I_2	0.040360	a_1	-0.500
I_3	2.043624	a_2	2.000
I_4	0.000500	a_3	-3.000
I_5	0.010337	a_4	-6.000
I_6	0.000258	a_5	-4.500
I_7	0.007705	a_6	1.500
I_8	0.016834	a_7	18.000
I_9	0.000111	a_8	-15.000
		a_9	150.000

$\sigma_x =$	0.44754	t/m^2
--------------	---------	---------

Nota: se recomienda consultar el documento para la definición de las funciones de integración.

Elaborado por Jiménez Garrote, C.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS NORMALES PARA CARGA VERTICAL RECTANGULAR UNIFORME
SOLUCIÓN DE BOUSSINESQ (HOLL 1940, $\nu = 0.5$)

q	2.50	t/m ²	Magnitud de la carga uniformemente distribuida.
l	132.00	m	Dimensión en x.
b	5.50	m	Dimensión en y.
x_o	66.00	m	Coordenada x del punto "P".
y_o	2.50	m	Coordenada y del punto "P".
z_p	45.00	m	Coordenada z del punto "P".

Nota: el origen del sistema de referencia se encuentra en la proyección en superficie del punto donde se desea obtener los esfuerzos.

	Rectángulo 1		Rectángulo 2		Rectángulo 3		Rectángulo 4	
x_i	66.00	m	66.00	m	66.00	m	66.00	m
y_i	2.50	m	2.50	m	3.00	m	3.00	m
R_1	79.881	m	79.881	m	79.881	m	79.881	m
R_2	45.069	m	45.069	m	45.100	m	45.100	m
R_3	79.920	m	79.920	m	79.937	m	79.937	m
$\Delta\sigma_{xi}$	0.005		0.005		0.006		0.006	
$\Delta\sigma_{yi}$	0.000		0.000		0.000		0.000	
$\Delta\sigma_{zi}$	0.017		0.017		0.020		0.020	
I	1		1		1		1	

$\Delta\sigma_x$	0.055	t/m ²
$\Delta\sigma_y$	0.000	t/m ²
$\Delta\sigma_z$	0.186	t/m ²

3.4 Loading on a Rectangular Area

3.4.1 UNIFORM VERTICAL LOADING

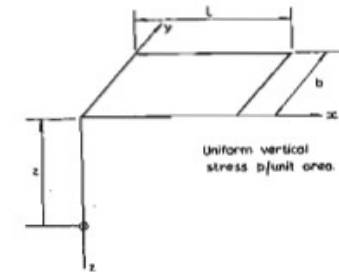


FIG. 3.29

Beneath the corner of the rectangle (see Fig. 3.29), Holl (1940) gives the following expressions for stresses for $\nu = 0.5$:

$$\sigma_z = \frac{p}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{4b}{zN_3} + \frac{4bz}{N_3} \left(\frac{1}{N_1^2} + \frac{1}{N_2^2} \right) \right] \quad \dots (3.18a)$$

$$\sigma_x = \frac{p}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{4b}{zN_3} - \frac{4bz}{N_1^2 N_2} \right] \quad \dots (3.18b)$$

$$\sigma_y = \frac{p}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{4b}{zN_3} - \frac{4bz}{N_2^2 N_1} \right] \quad \dots (3.18c)$$

$$\tau_{xz} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{b}{N_3} - \frac{z^2 b}{N_1^2 N_3} \right] \quad \dots (3.18d)$$

$$\tau_{yz} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{b}{N_3} - \frac{z^2 b}{N_2^2 N_3} \right] \quad \dots (3.18e)$$

$$\tau_{xy} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{1}{N_3} - \frac{z^2}{N_1^2 N_2} \right] \quad \dots (3.18f)$$

$$\text{where } N_1 = (x^2 + z^2)^{1/2}$$

$$N_2 = (b^2 + z^2)^{1/2}$$

$$N_3 = (x^2 + b^2 + z^2)^{1/2}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS PARA CARGA VERTICAL RECTANGULAR UNIFORMEMENTE
DE ANCHO FINITO CON LONGITUD INFINITA
SOLUCIÓN DE TERZAGHI Y CAROTHERS**

q	1.50	t/m ²
B	10.00	m
b	5.00	m

Magnitud de la carga uniformemente distribuida.
Dimensión en x.
Dimensión en y.

x_o	42.00	m
z_p	50.00	m

Coordenada x del punto "P".
Coordenada z del punto "P".

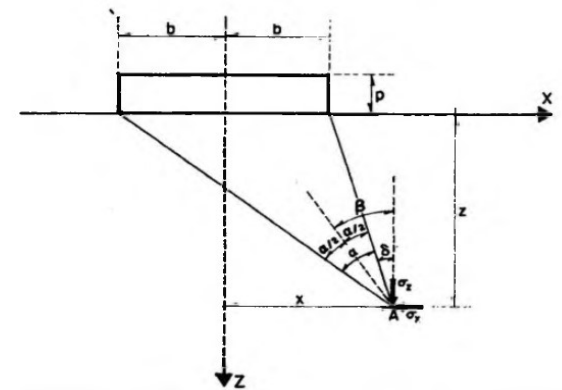
δ	36.50	°
α	6.73	°
β	39.86	°

Esfuerzos en el punto "P"

$\Delta\sigma_x$	0.046	t/m ²
$\Delta\sigma_z$	0.066	t/m ²
$\Delta\tau_{xz}$	0.055	t/m ²

Esfuerzos principales y cortante máximo

$\Delta\sigma_1$	0.112	t/m ²
$\Delta\sigma_3$	0.000	t/m ²
$\Delta\tau_{\text{máx}}$	0.056	t/m ²



Elaborado por Jiménez Garrote, C.



ANEXO 2.

**Solución de Mindlin para carga horizontal rectangular
uniformemente distribuida en un punto.**

CODIFICA: JIMENEZ GARROTE CARLOS.
EMAIL: caajimenezga@unal.edu.co
DOCENTES: ZEA CARMELINO , RIVERA RIGOBERTO.

CHARACTER FDAT*14

=====

REWIND 5

```
ESQUINA V4
READ (5,*) YMIN, ZMIN
```

```

!      COORDENADAS DEL PUNTO DONDE SE QUIERE DETERMINAR EL ESFUERZO (SISTEMA DE REFERENCIA CON ORI
GEN EN LA SUPERFICIE)
      READ (5,*) XP, YP, ZP

!      VERTICES DE LA CARGA (EL ORIGEN SE MUEVE AL PUNTO "P" Y SE INVIERTEN LOS EJES "X", "Y" y "Z
")
      XC = XP - XO

      YVC(1) = YP - YMAX
      YVC(2) = YVC(1)
      YVC(4) = YP - YMIN
      YVC(3) = YVC(4)

      ZVC(1) = ZP - ZMAX
      ZVC(4) = ZP - ZMIN
      ZVC(2) = ZVC(4)
      ZVC(3) = ZVC(1)

!      DEFINICIÓN VECTORES INICIALES

      DO I=1,9
      F(I) = 0
      END DO

      DO I=1,10
      FA(I) = 0
      END DO

      DO I=1,4
      F1VC(I) = 0
      F2VC(I) = 0
      F3VC(I) = 0
      F4VC(I) = 0
      F5VC(I) = 0
      F6VC(I) = 0
      F7VC(I) = 0
      F8VC(I) = 0
      F9VC(I) = 0
      END DO

!      INTEGRACIÓN FUNCIÓN DE ESFUERZOS

      DO I=1,4

      R  = SQRT(XC**2 + YVC(I)**2 + ZVC(I)**2)
      RA = SQRT(XC**2 + YVC(I)**2)
      RB = SQRT(XC**2 + ZVC(I)**2)
      RC = (ZVC(I)-2*ZP)
      RCZ = SQRT(XC**2 + YVC(I)**2 + RC**2)

      F1VC(I) = (ATAN((YVC(I)*ZVC(I))/(XC*R)))/XC

      F2VC(I) = (ATAN((YVC(I)*RC)/(XC*RCZ)))/XC

      F3VC(I) = XC*YVC(I)*(XC**2+R**2)/(RA**2*RB**2*R)
      F3VC(I) = F3VC(I) + (ATAN(YVC(I)*ZVC(I)/(XC*R))/ZVC(I))
      F3VC(I) = F3VC(I)*ZVC(I)/(3*(XC**3))

      F4VC(I) = YVC(I)*(2*XC**2+YVC(I)**2+RC**2)
      F4VC(I) = F4VC(I)/(XC**2*RA**2*(XC**2+RC**2)*RCZ)
      F4VC(I) = F4VC(I) + ATAN((YVC(I)*RC)/(XC*RCZ))/(XC**3*RC)
      F4VC(I) = F4VC(I)*RC/3

      F5VC(I) = (XC*YVC(I)*RCZ*RC)/(RA**2)
      F5VC(I) = F5VC(I) + (XC*YVC(I)*RC**2)/(RA**2)
      F5VC(I) = F5VC(I) + (XC**2+RC**2)*ATAN(YVC(I)/XC)
      F5VC(I) = F5VC(I) + (XC**2+RC**2)*ATAN(YVC(I)*RC/(XC*RCZ))
      F5VC(I) = F5VC(I)/(2*XC**3)

      F6VC(I) = (XC*YVC(I)*(5*XC**2+3*YVC(I)**2)*RCZ)/(RA**4)

```

```

F6VC(I) = F6VC(I) + (2*XC**3*YVC(I)*RC)/(RA**4)
F6VC(I) = F6VC(I) + (3*XC*YVC(I)*RC)/(RA**2)
F6VC(I) = F6VC(I) + (3*RC*ATAN(YVC(I)/XC))
F6VC(I) = F6VC(I) + (XC**2+3*RC**2)*ATAN((YVC(I)*RC)/(XC*RCZ))/RC
F6VC(I) = F6VC(I)*RC/(2*XC**5)

F7VC(I) = (XC**4*ZVC(I)) - ((YVC(I)**2 + RC**2)*RC*ZP**2)
F7VC(I) = F7VC(I) + (XC**2*(YVC(I)**2*ZVC(I) - (2*RC*ZP**2)))
F7VC(I) = -YVC(I)*F7VC(I)/(XC**2*RA**2*(XC**2+RC**2)*RCZ)
F7VC(I) = F7VC(I) + ((XC**2+ZP**2)*ATAN(YVC(I)*RC/(XC*RCZ)))/XC**3)
F7VC(I) = F7VC(I)/3

F8VC(I) = (YVC(I)*(-ZVC(I)+ZP))/((XC**2+RC**2)*RCZ)
F8VC(I) = (F8VC(I) + (ATAN(YVC(I)*RC/(XC*RCZ))/XC))/3

F9VC(I) = (2*ZVC(I)**3) - (11*ZVC(I)**2*ZP) + (20*ZVC(I)*ZP**2)
F9VC(I) = F9VC(I) - ZP*(XC**2 + 12*ZP**2)
F9VC(I) = F9VC(I)/((XC**2 + RC**2)**2*RCZ**2)
F9VC(I) = F9VC(I) + ((RC**2*(ZVC(I)-ZP))/((XC**2 + RC**2)*RCZ**4))
F9VC(I) = F9VC(I) + ((XC**2-3*(RC**2))*ZP)/(XC**4*RA**2)
F9VC(I) = F9VC(I) - (2*RC**2*ZP)/(XC**2*RA**4)
F9VC(I) = (YVC(I)*RCZ*F9VC(I))/(RC**3)
F9VC(I) = F9VC(I) - (3*ZP*ATAN((YVC(I)*RC)/(XC*RCZ)))/XC**5)
F9VC(I) = F9VC(I)*ZP/15

```

END DO

! SUMATORIA FACTORES INFLUENCIA

```

F(1) = F1VC(1) - F1VC(2) - F1VC(3) + F1VC(4)
F(2) = F2VC(1) - F2VC(2) - F2VC(3) + F2VC(4)
F(3) = F3VC(1) - F3VC(2) - F3VC(3) + F3VC(4)
F(4) = F4VC(1) - F4VC(2) - F4VC(3) + F4VC(4)
F(5) = F5VC(1) - F5VC(2) - F5VC(3) + F5VC(4)
F(6) = F6VC(1) - F6VC(2) - F6VC(3) + F6VC(4)
F(7) = F7VC(1) - F7VC(2) - F7VC(3) + F7VC(4)
F(8) = F8VC(1) - F8VC(2) - F8VC(3) + F8VC(4)
F(9) = F9VC(1) - F9VC(2) - F9VC(3) + F9VC(4)

```

! CÁLCULO FACTORES A

```

PI = ACOS(-1.0)

FA(10) = (-W*XC)/(8*PI*(1-V))
FA(1) = (2*V - 1)
FA(2) = (2*V - 1)*(4*V-5)
FA(3) = -3*(XC**2)
FA(4) = 3*(4*V - 3)*(XC**2)
FA(5) = 12*(1-V)*(2*V - 1)
FA(6) = 4*(V-1)*(2*V-1)*(XC**2)
FA(7) = 18
FA(8) = 6*((2*V)-3)
FA(9) = 30*(XC**2)*ZP

```

! ESTIMACIÓN FINAL DE ESFUERZO HORIZONTAL EN EL PUNTO X

```

SIGMA = 0

DO I=1,9
SIGMA = SIGMA + (FA(I)*F(I))
END DO
SIGMA = SIGMA*FA(10)
PRINT *
WRITE(*,104) SIGMA
PAUSE
CLOSE (5)

```

END



MANUAL DEL USUARIO DEL PROGRAMA

Este programa permite calcular el esfuerzo horizontal en un punto aplicando la solución de Mindlin para carga horizontal rectangular uniformemente distribuida y se encuentra programado en lenguaje FORTRAN.

1. ARCHIVOS DE DATOS

Por medio de un archivo de datos se ingresan los parámetros para el cálculo del esfuerzo horizontal en un punto. El nombre del archivo debe escribirse con la extensión .DAT o .TXT.

A continuación, se describe por renglón los parámetros de ingreso que debe contener el archivo de datos:

- a) Magnitud de la carga uniformemente distribuida.
- b) Relación de Poisson.
- c) Coordenada X_0 de los vértices de la carga uniforme.
- d) Coordenadas vértice V1 ($y_{\text{máx}}$, $z_{\text{máx}}$)
- e) Coordenadas vértice V4 ($y_{\text{mín}}$, $z_{\text{mín}}$)
- f) Coordenadas del punto en donde se requiere determinar el esfuerzo.

Nota: Sistema de referencia con origen en la superficie

Las Z_i a la profundidad deben ser siempre positivas.

Como se observa en las Figuras A.2.1 y A.2.2, el sistema de referencia coordenado inicial cambia para referir el sistema al punto “P” de cálculo.

2. RESULTADOS

Al ejecutar el programa se solicita el nombre del archivo de datos y si el archivo no posee errores en sus parámetros se muestra en pantalla el resultado del esfuerzo horizontal calculado como se indica las figuras A.2.3 y A.2.4.

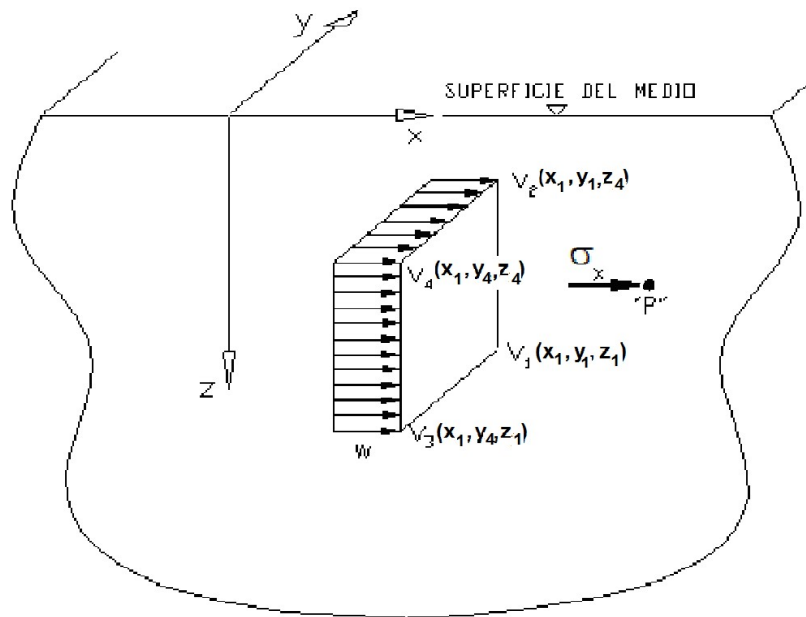


Figura A.2.1 Sistema de referencia con origen en la superficie del medio.

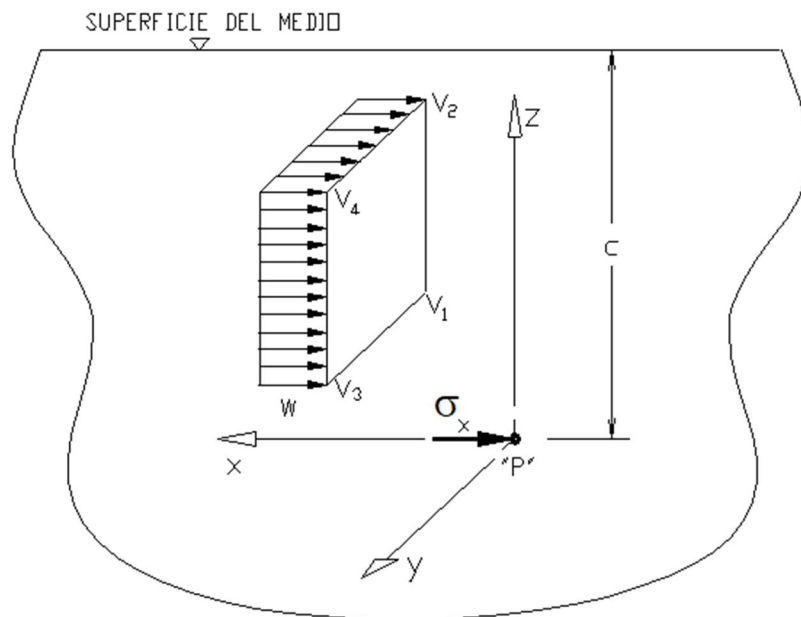


Figura A.2.2 Sistema de referencia en el punto “P”.



Datos.DAT: Bloc de notas			
Archivo	Edición	Formato	Ver Ayuda
1.000			
0.250			
2.000			
8.000	8.000		
2.000	2.000		
5.000	3.000	3.000	

Figura A.2.3 Archivo de datos de entrada .DAT

```
*****
*
*                               PROGRAMA
* MINDLIN CARGA LATERAL ESFUERZOS HORIZONTALES
* EN LA MASA DE SUELO POR CARGA LATERAL RECT.
*      UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA
*      Version 2018
*
*****

INDIQUE NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS
(e.j. XYZ.DAT) --> DATOS.DAT

ESFUERZO HORIZONTAL (t/m2)
.18801250
```

Figura A.2.4 Resultado del programa ejecutado.



ANEXO 3.

Codificación FLEXHO e Instructivo del programa.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - GEOTECNIA

CÁLCULO MATRIZ DE INFLUENCIAS HORIZONTALES EN LA MASA DEL SUELO
APLICANDO LA TEORÍA DE MINDLIN
PARA CARGA HORIZONTAL RECTANGULAR UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA
VERSION 2019.1

CODIFICA: JIMENEZ GARROTE CARLOS.
EMAIL: caajimenezga@unal.edu.co
DOCENTES: ZEA CARMELINO , RIVERA RIGOBERTO.

```
=====
DOUBLE PRECISION    CR, P, PXO, YMX, ZMX, YMN, ZMN, XPI, YPI, ZPI
DOUBLE PRECISION    SIGMAI, X, Y, Z, dx, dy, dz, dc, dm, n, m
REAL                FZ, FY
DOUBLE PRECISION    AYI, AZI, AI, ZF, YF, NB
DOUBLE PRECISION::  Iji(2500,2500), Aji(2500,2500), MDL(2500)
DOUBLE PRECISION::  FLX(2500,2500), ALFA(2500)
DOUBLE PRECISION::  COOR(2500,6), RGD(2500,2500)
INTEGER             COUC, COUF, AUX1, AUX, AUX2, AUX3, OP
CHARACTER            FDAT*10, NDAT*14, NMOD*14, OBRA*72
=====
```

```
100 FORMAT('=====')
+ '=====')
101 FORMAT(20X, '                                '//
+ 20X, '                                F L E X H O                                '//
+ 20X, '    PROGRAMA PARA EL CALCULO DE MATRIZ DE                                '/
+ 20X, '    INFLUENCIA, INCREMENTOS DE ESFUERZO,                                '/
+ 20X, '    FLEXIBILIDADES Y RIGIDEZES HORIZONTALES                                '/
+ 20X, '    EN LA MASA DEL SUELO PARA                                '/
+ 20X, '    ANALISIS DE INTERACCION                                '/
+ 20X, '    SUELO - CIMENTACION - ESTRUCTURA                                '/
+ 20X, '                                Version  19.1                                '/
+ 20X, '                                ')
102 FORMAT(/13X, 'INDIQUE NOMBRE DE LA FAMILIA DE ARCHIVOS'
+ ' (Sin extension)', /28X, '(e.j. XYZ) ---> '\)
103 FORMAT(A10)
105 FORMAT(/25X, '    *** A D V E R T E N C I A ***                                '/
+ 15X, 'LOS AUTORES DE ESTE PROGRAMA NO SE HACEN RESPONSABLES ' /
+ 10X, 'POR EL USO INDEBIDO DEL MISMO',
+ ' NI POR LOS RESULTADOS QUE ARROJE'//)
106 FORMAT(//)
107 FORMAT(20X, '                                '//
+ 20X, '    O P C I O N E S   D E   I M P R E S I O N                                '//
+ 20X, ' [1] MATRIZ DE COORDENADAS DE RESORTES                                '/
+ 20X, ' [2] MATRIZ DE INFLUENCIAS                                '/
+ 20X, ' [3] MATRIZ DE AREAS TRIBUTARIAS DE DOVELAS                                '/
+ 20X, ' [4] MATRIZ DE FLEXIBILIDAD DEL SUELO                                '/
+ 20X, ' [5] MATRIZ DE RIGIDEZ DEL SUELO                                '/
+ 20X, ' [0] SALIR DE FLEXHO                                '/
+ 20X, '                                ')
108 FORMAT(28X, ' OPCION?: ---> '\)
109 FORMAT(//)
110 FORMAT(//)
2007 FORMAT(5X, 'No. ', I5, ' ..... OK ')
2008 FORMAT(19X, "P R O Y E C T O      D E      A N A L I S I S")
2009 FORMAT(//
+12X, ' INICIANDO CALCULO DE MATRIZ DE INFLUENCIA...'//)
2010 FORMAT(//
+12X, ' FINALIZA CALCULO DE MATRIZ DE INFLUENCIA...'//)
2011 FORMAT(//
+12X, ' INICIANDO CALCULO DE MATRIZ DE FLEXIBILIDAD Y RIGIDEZ...'//)
2012 FORMAT(//
+12X, ' FINALIZA CALCULO DE MATRIZ DE FLEXIBILIDAD Y RIGIDEZ...'//)
```

```

! =====

WRITE(*,100)
WRITE(*,101)
WRITE(*,100)
WRITE(*,105)
WRITE(*,102)
READ(*,103) FDAT

NDAT='          .DAT'
NMOD='          .MOD'

WRITE(NDAT(1:10),103) FDAT
WRITE(NMOD(1:10),103) FDAT
OPEN(10,FILE=NDAT,STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL')
OPEN(11,FILE=NMOD,STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL')
REWIND 10
REWIND 11

!  LECTURA DATOS INICIALES DE ANÁLISIS
READ(10,*) OBRA
READ(10,*) CR, P, PXO
READ(10,*) Y, dy
READ(10,*) Z, dz
READ(10,*) X, dx

!  DEFINICIÓN DE LONGITUDES DE ANÁLISIS
ZF = Z
YF = Y
Z  = Z + 0.001
Y  = Y + 0.001
dc = dz
dm = dy
COUF= 1
COUC= 1
Iji = 0
Aij = 0
NB  = 0.0001
ZMX = dz/2
AUX = 1
AUX3= 1
COOR= 0

WRITE(*,110)
WRITE(*,2008)
WRITE(*,*) '          ', OBRA
WRITE(*,110)
PAUSE
WRITE(*,2009)
WRITE(*,*) "          PROFUNDIDAD DE ANALISIS:"
WRITE(*,*)
DO WHILE (ZMX.LE.Z)
WRITE(*,2007) AUX
IF ((ZMX.EQ.(dz/2)).OR.(ZMX.EQ.Z)) THEN
n=dz/2
ELSE
n=dz
END IF
ZMN=ZMX - n
YMX=dm/2
AUX = AUX + 1
AUX2= 1
DO WHILE (YMX.LE.Y)
IF ((YMX.EQ.(dm/2)).OR.(YMX.EQ.Y)) THEN
m=dm/2
ELSE
m=dm
END IF
YMN=YMX - m
XPI=dx
AUX2 = AUX2 + 1
DO WHILE (XPI.LE.X)
ZPI = NB

```

```

COUF = 1
DO WHILE (ZPI.LE.Z)
  YPI = NB
  FIL = 5
  DO WHILE (YPI.LE.Y)
    IF ((YPI.EQ.NB).OR.(YPI.GE.YF)) THEN
      AYI=dy/2
    ELSE
      AYI=dy
    END IF
    IF ((ZPI.EQ.NB).OR.(ZPI.GE.ZF)) THEN
      AZI=dz/2
    ELSE
      AZI=dz
    END IF
    AI=AYI*AZI

    CALL MINDLINCRHU (CR,P,PXO,YMX,ZMX,YMN,ZMN,XPI,YPI,ZPI,SIGMAI)

    Iji(COUF,COUC) = Iji(COUF,COUC) + SIGMAI
    Aji(COUF,1) = AI
    IF (AUX3.EQ.1) THEN
      COOR(COUF,1)= YPI
      COOR(COUF,2)= ZPI
    END IF
    YPI = YPI + dy
    COUF = COUF + 1
  END DO
  ZPI = ZPI + dc
  END DO
  XPI = XPI + dx
  AUX3 = AUX3 + 1
  END DO
  YMX = YMX + dm
  FY= YMX - (Y+(dy/2)-0.001)
  IF ((FY.GE.-0.00001).AND.(FY.LE.0.00001)) THEN
    YMX = Y
  END IF
  COUC = COUC + 1
  END DO
  ZMX = ZMX + dz
  FZ= ZMX - (Z+(dz/2)-0.001)
  IF ((FZ.GE.-0.00001).AND.(FZ.LE.0.00001)) THEN
    ZMX = Z
  END IF
  END DO
  WRITE(*,2010)
  COUF = COUF - 1
  COUC = COUC - 1
  AUX = AUX - 1
  AUX2 = AUX2 - 1

!  MATRIZ DE FLEXIBILIDAD
  WRITE(*,2011)
  WRITE(*,*) "      PROFUNDIDAD DE ANALISIS : "
  WRITE(*,*)
  DO 6001 i=1,AUX
    READ(11,*) MDL(i)
    ALFA(i) = dx*MDL(i)
    WRITE(*,2007) i
6001  CONTINUE
    DO 6002 i=1,COUC
      AUX1=1
      DO 6003 j=1,AUX
        DO 6004 k=1,AUX2
          FLX(AUX1,i) = (Iji(AUX1,i)/Aji(AUX1,1))*ALFA(j)
          AUX1 = AUX1 + 1
6004  CONTINUE
6003  CONTINUE
6002  CONTINUE

      CALL GENRIG(FLX,RGD,COUC)

```

```

WRITE(*,2012)

2 WRITE(*,106)
WRITE(*,100)
WRITE(*,107)
WRITE(*,100)
WRITE(*,109)
WRITE(*,108)
READ(*,*) OP

IF ((OP.LT.0).OR.(OP.GT.5)) THEN
WRITE(*,106)
WRITE(*,*) " LA OPCION SELECCIONADA NO ES VALIDA..."
ELSE
IF (OP.EQ.0) GOTO 9999
IF (OP.EQ.1) CALL IMPRIMA(OP,COUC,FDAT,COOR,OBRA)
IF (OP.EQ.2) CALL IMPRIMA(OP,COUC,FDAT,Iji,OBRA)
IF (OP.EQ.3) CALL IMPRIMA(OP,COUC,FDAT,Aji,OBRA)
IF (OP.EQ.4) CALL IMPRIMA(OP,COUC,FDAT,FLX,OBRA)
IF (OP.EQ.5) CALL IMPRIMA(OP,COUC,FDAT,RGD,OBRA)
END IF
GOTO 2

CLOSE(11)
CLOSE(10)

9999 WRITE(*,106)
END

! =====

SUBROUTINE MINDLINCRHU(W,V,XO,YMAX,ZMAX,YMIN,ZMIN,XP,YP,ZP,SIGMA)

DOUBLE PRECISION W, V, XO, YMAX, ZMAX, YMIN, ZMIN, XP, YP, ZP, XC
DOUBLE PRECISION R, RCZ, RA, RB, RC, PI, SIGMA
DOUBLE PRECISION YVC, ZVC, F, F1VC, F2VC, F3VC, F4VC, F5VC
DOUBLE PRECISION F6VC, F7VC, F8VC, F9VC, FA
DIMENSION YVC(4), ZVC(4), F(9), F1VC(4), F2VC(4), F3VC(4), F4VC(4)
DIMENSION F5VC(5), F6VC(5), F7VC(5), F8VC(5), F9VC(5), FA(10)

! VERTICES DE LA CARGA (EL ORIGEN SE MUEVE AL PUNTO "P" Y SE INVIERTEN LOS EJES "X", "Y" y "Z")
)

SIGMA = 0
XC = XP - XO
YVC(1) = YP - YMAX
YVC(2) = YVC(1)
YVC(4) = YP - YMIN
YVC(3) = YVC(4)
ZVC(1) = ZP - ZMAX
ZVC(4) = ZP - ZMIN
ZVC(2) = ZVC(4)
ZVC(3) = ZVC(1)

! CÁLCULO DE INTEGRACIÓN DE LAS FUNCIONES DE ESFUERZOS
DO 2011 i=1,4
R = SQRT(XC**2 + YVC(i)**2 + ZVC(i)**2)
RA = SQRT(XC**2 + YVC(i)**2)
RB = SQRT(XC**2 + ZVC(i)**2)
RC = (ZVC(i)-2*ZP)
RCZ = SQRT(XC**2 + YVC(i)**2 + RC**2)
F1VC(i) = (ATAN((YVC(i)*ZVC(i))/(XC*R)))/XC
F2VC(i) = (ATAN((YVC(i)*RC)/(XC*RCZ)))/XC
F3VC(i) = XC*YVC(i)*(XC**2+R**2)/(RA**2*RB**2*R)
F3VC(i) = F3VC(i) + (ATAN(YVC(i)*ZVC(i)/(XC*R))/ZVC(i))
F3VC(i) = F3VC(i)*ZVC(i)/(3*(XC**3))
F4VC(i) = YVC(i)*(2*XC**2+YVC(i)**2+RC**2)
F4VC(i) = F4VC(i)/(XC**2*RA**2*(XC**2+RC**2)*RCZ)
F4VC(i) = F4VC(i) + ATAN((YVC(i)*RC)/(XC*RCZ))/(XC**3*RC)
F4VC(i) = F4VC(i)*RC/3
F5VC(i) = (XC*YVC(i)*RCZ*RC)/(RA**2)
F5VC(i) = F5VC(i) + (XC*YVC(i)*RC**2)/(RA**2)
F5VC(i) = F5VC(i) + (XC**2+RC**2)*ATAN(YVC(i)/XC)
F5VC(i) = F5VC(i) + (XC**2+RC**2)*ATAN(YVC(i)*RC/(XC*RCZ))

```



```

F5VC(i) = F5VC(i)/(2*XC**3)
F6VC(i) = (XC*YVC(i)*(5*XC**2+3*YVC(i)**2)*RCZ)/(RA**4)
F6VC(i) = F6VC(i) + (2*XC**3*YVC(i)*RC)/(RA**4)
F6VC(i) = F6VC(i) + (3*XC*YVC(i)*RC)/(RA**2)
F6VC(i) = F6VC(i) + (3*RC*ATAN(YVC(i)/XC))
F6VC(i) = F6VC(i) + (XC**2+3*RC**2)*ATAN((YVC(i)*RC)/(XC*RCZ))/RC
F6VC(i) = F6VC(i)*RC/(2*XC**5)
F7VC(i) = (XC**4*ZVC(i)) - ((YVC(i)**2 + RC**2)*RC*ZP**2)
F7VC(i) = F7VC(i) + (XC**2*(YVC(i)**2*ZVC(i)-(2*RC*ZP**2)))
F7VC(i) = -YVC(i)*F7VC(i)/(XC**2*RA**2*(XC**2+RC**2)*RCZ)
F7VC(i) = F7VC(i) + ((XC**2+ZP**2)*ATAN(YVC(i)*RC/(XC*RCZ))/XC**3)
F7VC(i) = F7VC(i)/3
F8VC(i) = (YVC(i)*(-ZVC(i)+ZP))/((XC**2+RC**2)*RCZ)
F8VC(i) = (F8VC(i) + (ATAN(YVC(i)*RC/(XC*RCZ))/XC))/3
F9VC(i) = (2*ZVC(i)**3) - (11*ZVC(i)**2*ZP) + (20*ZVC(i)*ZP**2)
F9VC(i) = F9VC(i) - ZP*(XC**2 + 12*ZP**2)
F9VC(i) = F9VC(i)/((XC**2 + RC**2)**2*RCZ**2)
F9VC(i) = F9VC(i) + ((RC**2*(ZVC(i)-ZP))/((XC**2 + RC**2)*RCZ**4))
F9VC(i) = F9VC(i) + ((XC**2-3*(RC**2))*ZP)/(XC**4*RA**2)
F9VC(i) = F9VC(i) - (2*RC**2*ZP)/(XC**2*RA**4)
F9VC(i) = (YVC(i)*RCZ*F9VC(i))/(RC**3)
F9VC(i) = F9VC(i) - (3*ZP*ATAN((YVC(i)*RC)/(XC*RCZ)))/(XC**5)
F9VC(i) = F9VC(i)*ZP/15

```

2011 CONTINUE

```

!      SUMATORIA FACTORES INFLUENCIA
F(1) = F1VC(1) - F1VC(2) - F1VC(3) + F1VC(4)
F(2) = F2VC(1) - F2VC(2) - F2VC(3) + F2VC(4)
F(3) = F3VC(1) - F3VC(2) - F3VC(3) + F3VC(4)
F(4) = F4VC(1) - F4VC(2) - F4VC(3) + F4VC(4)
F(5) = F5VC(1) - F5VC(2) - F5VC(3) + F5VC(4)
F(6) = F6VC(1) - F6VC(2) - F6VC(3) + F6VC(4)
F(7) = F7VC(1) - F7VC(2) - F7VC(3) + F7VC(4)
F(8) = F8VC(1) - F8VC(2) - F8VC(3) + F8VC(4)
F(9) = F9VC(1) - F9VC(2) - F9VC(3) + F9VC(4)

```

```

!      CÁLCULO FACTORES A
PI      = ACOS(-1.0)
FA(10) = (-W*XC)/(8*PI*(1-V))
FA(1)   = (2*V - 1)
FA(2)   = (2*V - 1)*(4*V-5)
FA(3)   = -3*(XC**2)
FA(4)   = 3*(4*V - 3)*(XC**2)
FA(5)   = 12*(1-V)*(2*V - 1)
FA(6)   = 4*(V-1)*(2*V-1)*(XC**2)
FA(7)   = 18
FA(8)   = 6*((2*V)-3)
FA(9)   = 30*(XC**2)*ZP

```

```

!      ESTIMACIÓN FINAL DE ESFUERZO HORIZONTAL EN EL PUNTO X

```

```

DO 2012 i=1,9
SIGMA = SIGMA + (FA(i)*F(i))

```

2012 CONTINUE

```

SIGMA = SIGMA*FA(10)
IF (SIGMA.LT.0) THEN
SIGMA=0
END IF
RETURN

```

END

```

!      =====

```

```

SUBROUTINE GENRIG(MFLX,B,COUCU)

```

```

DOUBLE PRECISION:: MFLX(2500,2500),A(2500,2500),B(2500,2500)
INTEGER           COUCU

```

```

A=0.0
B=0.0

```

```

DO 5001 J=1,COUCU
DO 5002 I=1,COUCU

```

```

      A(J,I)=MFLX(J,I)
5002  CONTINUE
      B(J,J)=1.0
5001  CONTINUE
      DO 5003 J=1,COUCU
      DO 5004 I=J,COUCU
      IF (A(I,J).LT.0.0.OR.A(I,J).GT.0.0) THEN
      GOTO 5100
      ELSE
      END IF
5004  CONTINUE
5100  DO 5005 K=1,COUCU
      S=A(J,K)
      A(J,K)=A(I,K)
      A(I,K)=S
      S=B(J,K)
      B(J,K)=B(I,K)
      B(I,K)=S
5005  CONTINUE
      T=1/A(J,J)
      DO 5006 K=1,COUCU
      A(J,K)=T*A(J,K)
      B(J,K)=T*B(J,K)
5006  CONTINUE
      DO 5007 L=1,COUCU
      IF (L.EQ.J) THEN
      GOTO 5007
      ENDIF
      T=-1*A(L,J)
      DO 5008 K=1,COUCU
      A(L,K)=A(L,K)+T*A(J,K)
      B(L,K)=B(L,K)+T*B(J,K)
5008  CONTINUE
5007  CONTINUE
5003  CONTINUE
      RETURN

```

END

!

```

=====
SUBROUTINE IMPRIMA(OPU,COUCU,FDATU,MBASE,OBRAU)

```

```

DOUBLE PRECISION:: MBASE(2500,2500)
INTEGER           OPU,COUCU
CHARACTER          FDATU*10,NFLX*14, NCOO*14, NRGD*14
CHARACTER          NINF*14, NARE*14, OBRAU*72

```

```

2100  FORMAT(943F25.15)
2101  FORMAT(F19.12)
2102  FORMAT(F8.4,"",0.00,"",F8.4,"",0,0,0,0,0,0)
2103  FORMAT(A10)

```

```

NCOO='          .COO'
NINF='          .INF'
NARE='          .ATP'
NFLX='          .FLX'
NRGD='          .KS0'

```

```

WRITE(NCOO(1:10),2103) FDATU
WRITE(NINF(1:10),2103) FDATU
WRITE(NARE(1:10),2103) FDATU
WRITE(NFLX(1:10),2103) FDATU
WRITE(NRGD(1:10),2103) FDATU

```

```

IF (OPU.EQ.1) THEN
OPEN(101,FILE=NCOO,STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL')
WRITE(101,*) OBRAU
WRITE(101,*) COUCU
DO 7001 i=1, COUCU
WRITE(101,2102) (MBASE(i,j),j=1,2)

```

```

7001  CONTINUE

```

```

      ELSEIF (OPU.EQ.2) THEN
      OPEN(102,FILE=NINF,STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL')
      WRITE(102,*) OBRAU
      WRITE(102,*) COUCU
      DO 7002 i=1, COUCU
      WRITE(102,2100) (MBASE(i,j),j=1,COUCU)
7002  CONTINUE
      ELSEIF (OPU.EQ.3) THEN
      OPEN(103,FILE=NARE,STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL')
      WRITE(103,*) OBRAU
      WRITE(103,*) COUCU
      DO 7003 i=1, COUCU
      WRITE(103,2101) MBASE(i,1)
7003  CONTINUE
      ELSEIF (OPU.EQ.4) THEN
      OPEN(104,FILE=NFLX,STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL')
      WRITE(104,*) OBRAU
      WRITE(104,*) COUCU
      DO 7004 i=1, COUCU
      WRITE(104,2100) (MBASE(i,j),j=1,COUCU)
7004  CONTINUE
      ELSEIF (OPU.EQ.5) THEN
      OPEN(105,FILE=NRGD,STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL')
      WRITE(105,*) OBRAU
      WRITE(105,*) COUCU

      DO 7005 i=1, COUCU
      WRITE(105,2100) (MBASE(i,j),j=1,COUCU)
7005  CONTINUE

```

```

END IF

```

```

CLOSE(101)
CLOSE(102)
CLOSE(103)
CLOSE(104)
CLOSE(105)

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

! =====

```



MANUAL DEL USUARIO DEL PROGRAMA FLEXHO

Este programa en lenguaje FORTRAN permite obtener la matriz de influencias, de rigidez y de flexibilidad del suelo por medio de la solución de Mindlin para carga horizontal rectangular uniformemente distribuida para el caso de una retícula con dimensiones definidas.

1. ARCHIVOS DE DATOS

Por medio de un archivo de datos se ingresan los parámetros para la generación de las matrices.

El archivo debe contener 10 caracteres en su nombre sin contar la extensión .DAT. Se describe a continuación por renglón los parámetros de ingreso que debe contener el archivo de datos .DAT:

- a) Título del proyecto entre comillas.
- b) La magnitud de la carga uniforme distribuida, la relación de Poisson y la coordenada X_o de los vértices de la carga uniforme separados por un espacio.
- c) La dimensión X de la retícula de la longitud y el ΔX que se desea analizar.
- d) La dimensión Z de la retícula a profundidad y el ΔZ que se desea analizar.
- e) La longitud posterior de análisis Y y su ΔY .

Para el caso del segundo archivo de datos, debe contener 10 caracteres en su nombre sin contar la extensión .MOD. En este documento se deben escribir por cada renglón los módulos de compresibilidad M_v [m^2/t] obtenidos por estratificación del suelo; debido a las áreas de influencia y la subdivisión a profundidad de la retícula siempre debe contener los valores para $\Delta Z/Z + 1$.

En las figuras A.3.1 y A.3.2 se presentan las capturas de los archivos de datos iniciales .DAT y .MOD para el uso del programa FLEXHO aplicado al caso de la edificación de estudio del documento.



TES-MMIL11.DAT: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
"ANALISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX"				
1.0000	0.2500	0.0000		
132.0000	6.0000			
50.0000	5.0000			
1.0000	1.0000			

Figura A.3.1 Archivo de datos .DAT.

TES-MMIL11.MOD: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.00125000				
0.00154321				
0.00173611				
0.00176678				
0.00195313				
0.00181818				
0.00163934				
0.00163934				
0.00163934				
0.00163934				
0.00163934				

Figura A.3.2 Archivo de módulos de compresibilidad .MOD.



2. RESULTADOS

Al ejecutar el programa se solicita el nombre del archivo de datos y debe escribirse sin extensión como se indica en la Figura A.3.3.

```
=====
                                F L E X H O

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE MATRIZ DE
INFLUENCIA, INCREMENTOS DE ESFUERZO,
FLEXIBILIDADES Y RIGIDEZES HORIZONTALES
EN LA MASA DEL SUELO PARA
ANALISIS DE INTERACCION
SUELO - CIMENTACION - ESTRUCTURA

Version 19.1

=====

*** A D V E R T E N C I A ***
LOS AUTORES DE ESTE PROGRAMA NO SE HACEN RESPONSABLES
POR EL USO INDEBIDO DEL MISMO NI POR LOS RESULTADOS QUE ARROJE

INDIQUE NOMBRE DE LA FAMILIA DE ARCHIVOS (Sin extension)
(e.j. XYZ) ---> TES-MMIL15

P R O Y E C T O   D E   A N A L I S I S
ANALISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX
```

Figura A.3.3. Inicio del programa.

Si el archivo no tiene errores y luego del tiempo de cálculo se presenta el menú final de impresión que permite guardar cada matriz en archivos independientes como en la Figura A.3.4.

```
FINALIZA CALCULO DE MATRIZ DE FLEXIBILIDAD Y RIGIDEZ...

=====

O P C I O N E S   D E   I M P R E S I O N

[1] MATRIZ DE COORDENADAS DE RESORTES
[2] MATRIZ DE INFLUENCIAS
[3] MATRIZ DE AREAS TRIBUTARIAS DE DOVELAS
[4] MATRIZ DE FLEXIBILIDAD DEL SUELO
[5] MATRIZ DE RIGIDEZ DEL SUELO
[0] SALIR DE FLEXHO

=====

¿OPCION?: ---> 5_
```

Figura A.3.4. Opciones de impresión del programa.



ANEXO 4.

Modelo reticular de la estructura de contención.

ANEXO 4. MODELO RETICULAR DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Longitud (m)		0		6		12		18		24		30		36		42		48		54		60		66		72		78		84		90		96		102		108		114		120		126		132	
Prof. (m)		1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23	
0.00		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36		37		38		39		40		41		42		43		44		45	
1.25		24	46	25	47	26	48	27	49	28	50	29	51	30	52	31	53	32	54	33	55	34	56	35	57	36	58	37	59	38	60	39	61	40	62	41	63	42	64	43	65	44	66	45	67	46	
2.50		68		69		70		71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86		87		88		89		90	
		47	91	48	92	49	93	50	94	51	95	52	96	53	97	54	98	55	99	56	100	57	101	58	102	59	103	60	104	61	105	62	106	63	107	64	108	65	109	66	110	67	111	68	112	69	
3.75		113		114		115		116		117		118		119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129		130		131		132		133		134		135	
		70	136	71	137	72	138	73	139	74	140	75	141	76	142	77	143	78	144	79	145	80	146	81	147	82	148	83	149	84	150	85	151	86	152	87	153	88	154	89	155	90	156	91	157	92	
5.00		158		159		160		161		162		163		164		165		166		167		168		169		170		171		172		173		174		175		176		177		178		179		180	
		93	181	94	182	95	183	96	184	97	185	98	186	99	187	100	188	101	189	102	190	103	191	104	192	105	193	106	194	107	195	108	196	109	197	110	198	111	199	112	200	113	201	114	202	115	
6.25		203		204		205		206		207		208		209		210		211		212		213		214		215		216		217		218		219		220		221		222		223		224		225	
		116	226	117	227	118	228	119	229	120	230	121	231	122	232	123	233	124	234	125	235	126	236	127	237	128	238	129	239	130	240	131	241	132	242	133	243	134	244	135	245	136	246	137	247	138	
7.50		248		249		250		251		252		253		254		255		256		257		258		259		260		261		262		263		264		265		266		267		268		269		270	
		139	271	140	272	141	273	142	274	143	275	144	276	145	277	146	278	147	279	148	280	149	281	150	282	151	283	152	284	153	285	154	286	155	287	156	288	157	289	158	290	159	291	160	292	161	
8.75		293		294		295		296		297		298		299		300		301		302		303		304		305		306		307		308		309		310		311		312		313		314		315	
		162	316	163	317	164	318	165	319	166	320	167	321	168	322	169	323	170	324	171	325	172	326	173	327	174	328	175	329	176	330	177	331	178	332	179	333	180	334	181	335	182	336	183	337	184	
10.00		338		339		340		341		342		343		344		345		346		347		348		349		350		351		352		353		354		355		356		357		358		359		360	
		185	361	186	362	187	363	188	364	189	365	190	366	191	367	192	368	193	369	194	370	195	371	196	372	197	373	198	374	199	375	200	376	201	377	202	378	203	379	204	380	205	381	206	382	207	
11.25		383		384		385		386		387		388		389		390		391		392		393		394		395		396		397		398		399		400		401		402		403		404		405	
		208	406	209	407	210	408	211	409	212	410	213	411	214	412	215	413	216	414	217	415	218	416	219	417	220	418	221	419	222	420	223	421	224	422	225	423	226	424	227	425	228	426	229	427	230	
12.50		428		429		430		431		432		433		434		435		436		437		438		439		440		441		442		443		444		445		446		447		448		449		450	
		231	451	232	452	233	453	234	454	235	455	236	456	237	457	238	458	239	459	240	460	241	461	242	462	243	463	244	464	245	465	246	466	247	467	248	468	249	469	250	470	251	471	252	472	253	
13.75		473		474		475		476		477		478		479		480		481		482		483		484		485		486		487		488		489		490		491		492		493		494		495	
		254	496	255	497	256	498	257	499	258	500	259	501	260	502	261	503	262	504	263	505	264	506	265	507	266	508	267	509	268	510	269	511	270	512	271	513	272	514	273	515	274	516	275	517	276	
15.00		518		519		520		521		522		523		524		525		526		527		528		529		530		531		532		533		534		535		536		537		538		539		540	
		277	541	278	542	279	543	280	544	281	545	282	546	283	547	284	548	285	549	286	550	287	551	288	552	289	553	290	554	291	555	292	556	293	557	294	558	295	559	296	560	297	561	298	562	299	
16.25		563		564		565</																																									



ANEXO 5.
Codificación EMISES3D.

```

! =====
!
! PROGRAMA DE INTERACCIÓN SUELO-CIMENTACIÓN-ESTRUCTURA
! EMISES 3D
!
! =====
!
! CRITERIO      :    LÓPEZ RINCÓN.
!
! CODIFICACIÓN:    ZEA CONSTANTINO.,
!                  LOPEZ RINCÓN.,
!                  RIVERA CONSTANTINO.,
!                  JIMENEZ GARROTE.
!
! VERSIÓN 2019.1
!
! =====

!          **** ECUACION MATRICIAL DE INTERACCIÓN ****
! CHARACTER GA*8,ADE*14,ARS*14,OBRA*72,AKE*14,AKSE*14, ALD*14

! no=nudo origen ,    nd=nudo destino
! DIMENSION NO(8000), ND(8000)

! Área y longitud
! DIMENSION AREA(8000),XLON(8000)

! xinerx, xinery, xinerz , momento de inercia x, y, z
! DIMENSION XINERX(8000),XINERY(8000),XINERZ(8000),XJ(8000)

! Elas=modulo elastico , g=modulo de cortante v=relación de poisson
! DIMENSION ELAS(8000),G(8000),V(8000)

! Coordenadas de los nudos
! DIMENSION X(8000),Y(8000),Z(8000)

! Restricciones de desplazamiento de los nudos
! DIMENSION IRX(8000),IRY(8000),IRZ(8000)

! Restricciones de giro de los nudos
! DIMENSION IRAX(8000),IRAY(8000),IRAZ(8000)

! Matriz de rigidez local [k'aa],[k'ab],[k'ba],[k'bb]
! DIMENSION XKPAA(6,6),XKPAB(6,6),XKPBA(6,6),XKPBB(6,6)

! Matriz de rigidez global [kaa],[kab],[kba],[kbb]
! DIMENSION XKAA(6,6),XKAB(6,6),XKBA(6,6),XKBB(6,6)

! t = matriz de transformacion [T]
! tt = mat. de transf. transpuesta [T]T
! DIMENSION T(6,6),TT(6,6)

! Cosenos directores
! DIMENSION COALFX(8000),COALFY(8000),COALFZ(8000)
! DIMENSION COBETX(8000),COBETY(8000),COBETZ(8000)
! DIMENSION COGAMX(8000),COGAMY(8000),COGAMZ(8000)
! DIMENSION VN(3),VX(3),VY(3),VZ(3)
! DIMENSION N1(8000),N2(8000)
! REAL      YLON,ZLON

! Vectores que definen la dirección de los ejes locales
! DIMENSION X1(8000),Y1(8000),Z1(8000)
! DIMENSION X2(8000),Y2(8000),Z2(8000)

! Matriz temporal y de equilibrio
! DIMENSION TEMPORAL(6,6),EQ(8000)

! Matriz de rigidez global de la estructura [k]
! DIMENSION XRIG(8000,8000)

! Vector de fuerzas global {f}

```

```

DIMENSION F(8000),FA(6),FB(6),FLN(6),FE(8000)

!   Vector de fuerzas en locales {flnud}
DIMENSION FLNUD(6),FPA(6),FPB(6)

!   Vector de fuerzas de empotramiento en locales
!   del nudo a (origen) {fempa} y del nudo b (destino) {fempb}
DIMENSION FEMPA(8000,6),FEMPB(8000,6)

!   Vector de desplazamientos locales
DIMENSION DPA(6),DPB(6),DAUX(6),DBAUX(6),FAUX(6)

!   Vector de desplazamientos globales
DIMENSION D(8000),DA(6),DB(6)
INTEGER BCW(8000), BCC(8000)
DIMENSION WX(8000),WY(8000),WZ(8000)
DIMENSION PX(8000),PY(8000),PZ(8000),AX(8000),
+AY(8000),AZ(8000)
DIMENSION NC(8000),FX(8000),FY(8000),FZ(8000),AMX(8000),
+AMY(8000),AMZ(8000)
DIMENSION EMAK(8000)

!   =====

2 FORMAT(
+' ' /
+' 0000000000' /
+' 0000000000' /
+' 00' /
+' 00' /
+' 00000000' /
+' 00BBBB' /
+' 00' /
+' 00' /
+' 0000000000' /
+' 000000000 M I S E S      3 D      (VERSION 2019.1)' ///
+' ECUACION MATRICIAL DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA' //
+' CODIFICACION EN FORTRAN: CZC. GLR. RRC. Y CJG.' //
+'          *** A D V E R T E N C I A ***' /
+'          LOS AUTORES DE ESTE PROGRAMA' /
+'          NO SE HACEN RESPONSABLES POR' /
+'          EL USO INDEBIDO DEL MISMO NI' /
+'          POR LOS RESULTADOS QUE ARROJE' //
+2x,
+'PARA ACLARACIONES, FAVOR DE COMUNICARSE AL TEL.5622-80-03,MEX.' /
+' CELULAR: 0445541815196' /
+//20x,'INGRESE NOMBRE DEL GRUPO DE ARCHIVOS (Sin extension): ' /
+ 20x,'(e.j. xYz) --> '\)
3 FORMAT(/
+'          *** E R R O R ***' /
+'          NO EXISTE EL ARCHIVO DE DATOS DE LA ESTRUCTURA' /)
5 FORMAT(A8)
9 FORMAT(//20x,' ANALISIS CON LA MATRIZ DE RIGIDEZ DEL SUELO
+# : '/20x,'[e.j.: 1] --> '\)
11 FORMAT('/ ERROR: NO EXISTE O ESTA MAL DECLARADO ',
+/' EL ARCHIVO DE RIGIDEZES DEL SUELO')
12 FORMAT(/10x,' NOMBRE ARCHIVO DE RIGIDEZES DEL SUELO
+(teclea el ".KS#")' /
+10x,' (e.j. xYz.KS1) --> '\)
13 FORMAT(A14)
15 FORMAT("/ A N A L I S I S      D E      I N T E R A C C I O N
+ S U E L O - E S T R U C T U R A" //
+/"NOMBRE DE ESTRUCTURA: "A72/"NUMERO DE BARRAS = "I5/
+"NUMERO DE NUDOS = "I5)
16 FORMAT(/
+"          <----- COORDENADAS ----->
+<----- RESTRICCIONES ----->"
+/" NUDO          X          Y          Z
+ Rx          Ry          Rz          Gx          Gy          Gz")
17 FORMAT(I5,3F15.4,I17,5I9)
18 FORMAT(I5,2I15)
19 FORMAT("// INCIDENCIAS DE LAS BARRAS" /

```

```

+" BARRA          NUDO ORIGEN          NUDO DESTINO")
20 FORMAT(// "          PROPIEDADES GEOMETRICAS"
+/" AREA          J          Iy          Iz")
21 FORMAT(F10.5,3E15.5)
22 FORMAT(// "          PROPIEDADES ELASTICAS"
+/" BARRA          E          v          G")
23 FORMAT(I5,3F15.3)
24 FORMAT(// " PROPIEDADES DEL SUELO DE APOYO"
+/" NUMERO DE RESORTES = "I5
+/" (I,J)          K")
25 FORMAT(2I5,F15.5)
26 FORMAT(" Se termina de incorporar matriz K del suelo a matriz K"/
+" de la estructura y se almacena matriz K suelo - estructura.")
27 FORMAT(" Se incorpora matriz K del suelo a K de la estructura.")
28 FORMAT(
+/" # DE BARRAS CON CARGA UNIFORME      = "I5
+/" # DE BARRAS CON CARGA CONCENTRADA = "I5
+/" # DE NUDOS CON CARGA                = "I5)
29 FORMAT(/ " CARGAS DISTRIBUIDAS EN LAS BARRAS"//
+" BARRA          Wx          Wy          Wz")
30 FORMAT(I5,3F10.4)
31 FORMAT(//
+"          CARGAS CONCENTRADAS EN LAS BARRAS"//
+" BARRA          Px          Ax          Py          Ay          Pz          Az
+")
32 FORMAT(I5, 6F10.4)
33 FORMAT(//
+"          FUERZAS Y MOMENTOS EN LOS NUDOS"//
+" NUDO          Px          Py          Pz          Mx          My          Mz
+")
35 FORMAT(// "LONGITUD DE LAS BARRAS"
+/"BARRA          LONGITUD")
36 FORMAT(I5,F10.3)
37 FORMAT(' BARRA:',I5,' xlon(i) :' ,F10.5,' ylon: ' ,F10.5,
+' zlon: ',F10.5)
40 FORMAT(//29X"DESPLAZAMIENTO DE LOS NUDOS "//
+" Nudo          Dx          Dy          Dz          Gx
+ Gy          Gz"/)
41 FORMAT(I5,6F15.5)
42 FORMAT(//39X"REACCIONES "/
+" Nudo          Fx          Fy          Fz          Mx
+ My          Mz"/)
45 FORMAT(//20X" SOLUCION DE LA INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA")
50 FORMAT(2i5,6F10.3,i5,6F10.3)
1074 FORMAT("Barra Nudo  Fuerza x  Fuerza y  Fuerza z Momento x Momento
+ y Momento z Nudo  Fuerza x  Fuerza y  Fuerza z Momento x Momento
+y Momento z")

```

```
! =====
```

```
1 WRITE(*,2)
READ(*,5) GA
```

```
ADE= '          .FRM'
ALD= '          .ISE'
```

```
WRITE(ADE(1:8),5) GA
WRITE(ALD(1:8),5) GA
```

```
OPEN(1,FILE=ADE,STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL',ERR=6)
OPEN(10,FILE=ALD,STATUS='UNKNOWN',ACCESS='SEQUENTIAL',ERR=6)
```

```
IMMAT = 1
GOTO 7
```

```
6 WRITE(*,3)
CALL DETENER
GOTO 1
```

```
7 REWIND(1)
```

```
! NÚMERO DE BARRAS Y NUDOS
READ(1,*) OBRA
```

```

      READ(1,*) NBAR,NNUD

!      NÚMERO DE GRADOS DE LIBERTAD
      NGL=6*NNUD
      WRITE(10,15) OBRA,NBAR,NNUD

!      LECTURA DE COORDENADAS, RESTRICCIONES DE DESPLAZAMIENTO Y GIRO DE LOS NUDOS
      ii = 5
      WRITE(10,16)
      DO 1001 I = 1,NNUD
      READ(1,*) X(i),Y(i),Z(i),IRX(i),IRY(i),IRZ(i),IRAX(i),IRAY(i),
+IRAZ(i)
      ii = ii + 1
      WRITE(10,17) i,X(i),Y(i),Z(i),IRX(i),IRY(i),IRZ(i),
+IRAX(i),IRAY(i),IRAZ(i)
1001 CONTINUE

!      LECTURA DE INCIDENCIA DE LAS BARRAS
      WRITE(10,19)
      DO 1002 i=1,NBAR
      READ(1,*) NO(I),ND(I)
      WRITE(10,18) I,NO(I),ND(I)
1002 CONTINUE

!      PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
      ii = 5
      WRITE(10,20)
      DO 1003 i = 1,NBAR
      READ(1,*) AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),XINERZ(i)
      XJ(i)=XINERX(i)
      ii = ii + 1
      WRITE(10,21) AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),XINERZ(i)
1003 CONTINUE

      ii = 5
      WRITE(10,22)

      DO 1004 i = 1,NBAR
      READ(1,*) ELAS(i),v(i)
      ii = ii + 1
      G(i) = ELAS(i) / (2 * (1 + v(i)))
      WRITE(10,23) i, ELAS(i),v(i),G(i)
1004 CONTINUE

!      DEFINICIÓN DE LOS EJES LOCALES DE LA BARRA X', Y' y C'

      DO 1005 i = 1,NBAR
      READ(1,*) N1(i),N2(i),X1(i),Y1(i),Z1(i),X2(i),Y2(i),Z2(i)
1005 CONTINUE

!      OBTENCIÓN DE LA LONGITUD DE LAS BARRAS

      WRITE(10,35)
      DO 1006 i = 1,NBAR
      XLON(i) = SQRT((X(ND(i)) - X(NO(i)))*2+ (Y(ND(i))
+- Y(NO(i)))*2+ (Z(ND(i)) - Z(NO(i)))*2)
      WRITE(10,36) i,XLON(i)
1006 CONTINUE

!      DEFINICIÓN DE LOS VECTORES {vx'}, {vy'}, {vz'}
!
!      Si n1<>0 y n2<>0
!      {n1}={x1,y1,z1} , {n2}={x2,y2,z2} nudos que definen un vector {vn}={n2}-{n1}
!      Si n1=0 y n2=0
!      {n1}={x1,y1,z1} , {n2}={x2,y2,z2} definidos en el plano local x'-z'
!      Si n1<>0 y n2=0
!      Si n1=1, z' es paralelo al eje global X
!      Si n1=2, z' es paralelo al eje global Y
!      Si n1=3, z' es paralelo al eje global Z
!      Si n1=0 y n2<>0
!      {n1}={xo,yo,zo}=nudo origen de la barra
!      {n2}={x2,y2,z2}=nudo final del vector
!      Definidos en el plano local x'-y'

```

```

DO 1007 i = 1,NBAR

!   Vector {vx'}
VX(1) = X(ND(i)) - X(NO(i))
VX(2) = Y(ND(i)) - Y(NO(i))
VX(3) = Z(ND(i)) - Z(NO(i))

IF(N1(i).NE.0.AND.N2(i).NE.0) THEN

!   Vector {vn}
VN(1) = X(N2(i)) - X(N1(i))
VN(2) = Y(N2(i)) - Y(N1(i))
VN(3) = Z(N2(i)) - Z(N1(i))

!   Vector {vy'}
CALL PRODCRUZ(VN,VX,VY)

!   Obtención del módulo de {vy'}
YLON = SQRT(VY(1)**2+ VY(2)**2+ VY(3)**2)

!   Vector {vz'}
CALL PRODCRUZ(VX,VY,VZ)

!   Obtención del módulo de {vz'}
ZLON = SQRT(VZ(1)**2+ VZ(2)**2+ VZ(3)**2)

ELSE

IF(N1(i).EQ.0.AND.N2(i).EQ.0) THEN

!   Vector {vn}
VN(1) = X2(i) - X1(i)
VN(2) = Y2(i) - Y1(i)
VN(3) = Z2(i) - Z1(i)

!   Vector {vy'}
CALL PRODCRUZ(VN,VX,VY)

!   Obtención del módulo de {vy'}
YLON = SQRT(VY(1)**2+VY(2)**2+VY(3)**2)

!   Vector {vz'}
CALL PRODCRUZ(VX,VY,VZ)

!   Obtención del módulo de {vz'}
ZLON = SQRT(VZ(1)**2+VZ(2)**2+VZ(3)**2)

ELSE

IF(N1(i).NE.0.AND.N2(i).EQ.0) THEN

!   Vector {vz'}
IF(N1(i).EQ.1) THEN
VZ(1) = 1
VZ(2) = 0
VZ(3) = 0
END IF

IF(N1(i).EQ.2) THEN
VZ(1) = 0
VZ(2) = 1
VZ(3) = 0
END IF

IF(N1(i).EQ.3) THEN
VZ(1) = 0
VZ(2) = 0
VZ(3) = 1
END IF

!   Obtención del módulo de {vz'}
ZLON = 1

```

```

!      Vector {vy'}
      CALL PRODCRUZ(VZ,VX,VY)

!      Obtención del módulo de {vy'}
      YLON = SQRT(VY(1)**2+ VY(2)**2+ VY(3)**2)

      ELSE

      IF(N1(i).EQ.0.AND.N2(i).NE.0) THEN

!      Vector {vn}
      VN(1) = X(N2(i)) - X(NO(i))
      VN(2) = Y(N2(i)) - Y(NO(i))
      VN(3) = Z(N2(i)) - Z(NO(i))

!      Vector {vz'}
      CALL PRODCRUZ(VX,VN,VZ)

!      Obtención del módulo de {vz'}
      ZLON = SQRT(VZ(1)**2+ VZ(2)**2+ VZ(3)**2)

!      Vector {vy'}
      CALL PRODCRUZ(VZ,VX,VY)

!      Obtención del módulo de {vy'}
      YLON = SQRT(VY(1)**2+ VY(2)**2+ VY(3)**2)

      END IF
      END IF
      END IF
      END IF

!      Obtención de los ángulos directores de los ejes locales

!      Eje X
      COALFX(i) = VX(1) / XLON(i)
      COBETX(i) = VX(2) / XLON(i)
      COGAMX(i) = VX(3) / XLON(i)

!      Eje Y
      COALFY(i) = VY(1) / YLON
      COBETY(i) = VY(2) / YLON
      COGAMY(i) = VY(3) / YLON

!      Eje Z
      COALFZ(i) = VZ(1) / ZLON
      COBETZ(i) = VZ(2) / ZLON
      COGAMZ(i) = VZ(3) / ZLON

1007 CONTINUE

!      Cálculo de la matriz de rigidez
      DO 1008 i = 1,NBAR
      CALL TRANSFORMA(T,COALFX(i),COALFY(i),COALFZ(i),COBETX(i),
+COBETY(i),COBETZ(i),COGAMX(i),COGAMY(i),COGAMZ(i))
      CALL TRANSPONE(T,TT,6)

!      Obtención de [kaa] = [T]T [k'aa] [T]
      CALL OBTKPAA(XKPAA,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))
      CALL MULTIPLICA(TT,XKPAA,TEMPORAL,6)
      CALL MULTIPLICA(TEMPORAL,T,XKAA,6)
      CALL GUARDAK(XKAA,NO(i),NO(i),XRIG)

!      Obtención de [kab] = [T]T [k'ab] [T]
      CALL OBTKPAB(XKPAB,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))
      CALL MULTIPLICA(TT,XKPAB,TEMPORAL,6)
      CALL MULTIPLICA(TEMPORAL,T,XKAB,6)
      CALL GUARDAK(XKAB,NO(i),ND(i),XRIG)

```

```

!      Obtención de [kba] = [T]T [k'ab] [T]
      CALL TRANSPONE(XKPAB,XKPBA,6)
      CALL MULTIPLICA(TT,XKPBA,TEMPORAL,6)
      CALL MULTIPLICA(TEMPORAL,T,XKBA,6)
      CALL GUARDAK(XKBA,ND(i),NO(i),XRIG)

!      Obtención de [kbb] = [T]T [k'ab] [T]
      CALL OBTCPBB(XKPBB,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))
      CALL MULTIPLICA(TT,XKPBB,TEMPORAL,6)
      CALL MULTIPLICA(TEMPORAL,T,XKBB,6)
      CALL GUARDAK(XKBB,ND(i),ND(i),XRIG)

1008 CONTINUE

!      Guarda la matriz de rigidez de la estructura
      AKE= '          .KES'

      WRITE(AKE(1:8),5) GA
      OPEN(2,FILE=AKE,STATUS='UNKNOWN',ACCESS='SEQUENTIAL')

      DO 1010 i = 1,NGL
      DO 1009 j = 1,NGL
      WRITE(2,*) XRIG(i, j)
1009 CONTINUE
1010 CONTINUE
      CLOSE(2)

      PRINT *
      WRITE(*,*) "Se almacena matriz K de la estructura."

!      Fin almacenamiento matriz K de la estructura
!      Incorporación de matriz de rigidez del suelo con la de la estructura

      WRITE(*,27)
8 WRITE(*,9)

      READ(*,*,ERR=8) NARS
      IF(NARS.EQ.1) ARS='          .KS1'
      IF(NARS.EQ.2) ARS='          .KS2'
      IF(NARS.EQ.3) ARS='          .KS3'
      IF(NARS.EQ.4) ARS='          .KS4'
      IF(NARS.EQ.5) ARS='          .KS5'
      IF(NARS.EQ.6) ARS='          .KS6'
      IF(NARS.EQ.7) ARS='          .KS7'
      IF(NARS.EQ.8) ARS='          .KS8'
      IF(NARS.EQ.9) ARS='          .KS9'
      IF(NARS.EQ.10)ARS='          .KSx'

      WRITE(ARS(1:8),5) GA
      PRINT *
      WRITE(*,*)'El archivo K del suelo es: ',ARS
      PRINT *

      OPEN(3,FILE=ARS,STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL',ERR=10)
      GOTO 14
10 WRITE(*,11)
      WRITE(*,12)

      READ(*,13,ERR=10) ARS
14 READ(3,*) OBRA
      READ(3,*) NDOV

      WRITE(10,24) NDOV
      WRITE(*,*)'NUMERO DE RESORTES = ', NDOV
      PRINT *
      CALL DETENER

      DO 1012 i = 1,NDOV

      READ(3,*) (EMAK(j),j=1,ndov)
      DO 1011 j = 1,ndov
      nreng = (i - 1) * 6 + 2

```



```

      ncol = (j - 1) * 6 + 2
      WRITE(10,25) I,J,EMAK(J)
      xrig(nreng, ncol) = xrig(nreng, ncol) + EMAK(J)
1011 CONTINUE
1012 CONTINUE
      CLOSE (3)

!      Guarda la matriz K suelo-estructura

      AKSE='          .KSE'

      WRITE(AKSE(1:8),5)GA
      OPEN(4,FILE=AKSE,STATUS='UNKNOWN',ACCESS='SEQUENTIAL')

      DO 1014 i = 1,NGL
      DO 1013 j = 1,NGL
      WRITE(4,*) XRIG(i, j)
1013 CONTINUE
1014 CONTINUE
      CLOSE(4)

      WRITE(*,26)
      PRINT *

      CALL DETENER

!      Fin almacenamiento matriz K suelo-estructura
!
!      Lectura de barras con carga uniforme y carga concentrada
!      Lectura de barras y nudos cargados
!      - NBCW = Número de barras con carga uniforme
!      - NBCC = Número de barras con carga concentrada
!      - NNC  = Número de nudos con carga

      READ(1,*) NBCW, NBCC, NNC
      WRITE(10,28) NBCW, NBCC, NNC

!      Lectura de barras con carga uniforme (carga en x, y, z)
      ii = 5
      WRITE(10,29)
      DO 1015 i = 1,NBCW
      READ(1,*) BCW(i),WX(i),WY(i),WZ(i)
      ii = ii + 1
      WRITE(10,30) BCW(i),WX(i),WY(i),WZ(i)
1015 CONTINUE

!      Lectura de barras con cargas concentradas
!      Distancias desde el nudo origen donde estan aplicadas
      ii = 5
      WRITE(10,31)
      DO 1016 i = 1,NBCC
      READ(1,*) BCC(i),PX(i),PY(i),PZ(i),AX(i),AY(i),AZ(i)
      ii = ii + 1
      WRITE(10,32) BCC(i),PX(i),AX(i),PY(i),AY(i),PZ(i),AZ(i)
1016 CONTINUE

!      Lectura de fuerzas y momentos en los nudos
      ii = 5
      WRITE(10,33)
      DO 1017 i = 1,NNC
      READ(1,*) NC(i),FX(i),FY(i),FZ(i),AMX(i),AMY(i),AMZ(i)
      ii = ii + 1
      WRITE(10,32) NC(i),FX(i),FY(i),FZ(i),AMX(i),AMY(i),AMZ(i)
      FE(6*NC(i)-5)=FX(i)
      FE(6*NC(i)-4)=FY(i)
      FE(6*NC(i)-3)=FZ(i)
      FE(6*NC(i)-2)=AMX(i)
      FE(6*NC(i)-1)=AMY(i)
      FE(6*NC(i))=AMZ(i)
1017 CONTINUE

!      Obtención de momentos de empotramiento

```

```

!      Momentos de empotramiento para carga uniforme
!      -nbcw=num de barras con carga uniforme
!      -fempa= fuerzas de empotramiento en el nudo a(origen)
!      -fempb= fuerzas de empotramiento en el nudo b(destino)
!      -bcw=barra que va a estar cargada

```

```
DO 1018 n = 1,NBCW
```

```
i = BCW(n)
```

```
!      Contribución de la carga en x
```

```
FEMPA(i,1) = FEMPA(i,1) - WX(n)*XLON(i)/2
```

```
FEMPB(i,1) = FEMPB(i,1) - WX(n)*XLON(i)/2
```

```
!      Contribución de la carga en y
```

```
FEMPA(i,2) = FEMPA(i,2) - WY(n)*XLON(i)/2
```

```
FEMPA(i,6) = FEMPA(i,6) - WY(n)*XLON(i)**2/12
```

```
FEMPB(i,2) = FEMPB(i,2) - WY(n)*XLON(i)/2
```

```
FEMPB(i,6) = FEMPB(i,6) + WY(n)*XLON(i)**2/12
```

```
!      Contribución de la carga en z'
```

```
FEMPA(i,3) = FEMPA(i,3) - WZ(n)*XLON(i)/2
```

```
FEMPA(i,5) = FEMPA(i,5) + WZ(n)*XLON(i)**2/12
```

```
FEMPB(i,3) = FEMPB(i,3) - WZ(n)*XLON(i)/2
```

```
FEMPB(i,5) = FEMPB(i,5) - WZ(n)*XLON(i)**2/12
```

```
1018 CONTINUE
```

```
!      Momentos de empotramiento para cargas concentradas
```

```
!      -nbcc=num de barras con carga concentrada
```

```
!      -fempa= fuerzas de empotramiento en el nudo a(origen)
```

```
!      -fempb= fuerzas de empotramiento en el nudo b(destino)
```

```
!      -bcc=barra que va a estar cargada
```

```
DO 1019 K = 1,NBCC
```

```
i = BCC(K)
```

```
XL = XLON(i)
```

```
!      Contribución de la carga en x
```

```
A = AX(K)
```

```
B = XL - A
```

```
FEMPA(i,1) = FEMPA(i,1) - PX(K)*B/XL
```

```
FEMPB(i,1) = FEMPB(i,1) - Px(K)*A/XL
```

```
!      Contribución de la carga en y
```

```
A = AY(K)
```

```
B = XL - A
```

```
P = PY(K)
```

```
XMA = P*A*B**2/XL**2
```

```
XMB = P*A**2*B/XL**2
```

```
RB = P*A**2*(A+3*B)/XL**3
```

```
RA = P-RB
```

```
FEMPA(i,2) = FEMPA(i,2) - RA
```

```
FEMPA(i,6) = FEMPA(i,6) - XMA
```

```
FEMPB(i,2) = FEMPB(i,2) - RB
```

```
FEMPB(i,6) = FEMPB(i,6) + XMB
```

```
!      Contribución de la carga en z
```

```
A = AZ(K)
```

```
B = XL - A
```

```
P = PZ(K)
```

```
XMA = P*A*B**2/XL**2
```

```
XMB = P*A**2*B/XL**2
```

```
RB = P*A**2*(A+3*B)/XL**3
```

```
RA = P-RB
```

```
FEMPA(i,3) = FEMPA(i,3) - RA
```

```
FEMPA(i,5) = FEMPA(i,5) + XMA
```

```
FEMPB(i,3) = FEMPB(i,3) - RB
```

```
FEMPB(i,5) = FEMPB(i,5) - XMB
```

```
1019 CONTINUE
```

```
IF (IMMAT.EQ.1) THEN
```

```
DO 1021 i=1,NBAR
```

```
!      Impresión de las fuerzas de empotramiento
```

```
WRITE(10,*)
```

```

WRITE(10,*) "BARRA ",i
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "Fuerzas de empotramiento locales"
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "{FEMP A}"

DO 1101 j = 1,6
WRITE(10,*) FEMPA(i,j)
1101 CONTINUE
WRITE(10,*)
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "{FEMP B}"
DO 1020 j = 1,6
WRITE(10,*) FEMPB(i,j)
1020 CONTINUE
1021 CONTINUE

! Impresión de las fuerzas nodales
DO 1023 i = 1,NNUD
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "Nudo: ", i
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "Fuerzas en el nudo (globales)"
WRITE(10,*)
WRITE(10,*) "{FN}"

DO 1022 j = 1,6
WRITE(10,*) FE(6*i-(6-j))
1022 CONTINUE

WRITE(10,*)
WRITE(10,*)
1023 CONTINUE
END IF

! Vector global de fuerzas
WRITE(*,*) "Ensamble del vector de cargas."

DO 1028 i = 1,NBAR
CALL TRANSFORMA(T,COALFX(i),COALFY(i),COALFZ(i),COBETX(i),
+COBETY(i),COBETZ(i),COGAMX(i),COGAMY(i),COGAMZ(i))
CALL TRANSPONE(T,TT,6)
! Ensamble del vector de cargas extremo a
DO 1024 j = 1,6
FLNUD(j) = FEMPA(i,j)
1024 CONTINUE

CALL MULMATVEC(TT,FLNUD,FLN,6)

ia = (NO(i)-1)*6
DO 1025 K = 1,6
F(ia+K) = F(ia+K) + FLN(K)
1025 CONTINUE

! Ensamble del vector de cargas extremo b

DO 1026 j = 1,6
FLNUD(j) = FEMPB(i,j)
1026 CONTINUE

CALL MULMATVEC(TT,FLNUD,FLN,6)
ib = (ND(i)-1)*6

DO 1027 K = 1,6
F(ib+K) = F(ib+K) + FLN(K)

1027 CONTINUE
1028 CONTINUE

! Ensamble del vector de cargas global de nudos

DO 1029 i = 1,NGL
F(i) = FE(i) - F(i)

```

```

!      vec carga =  vec fza nudos - vec emp
1029 CONTINUE

!      Modificación de k de acuerdo a las restricciones

      WRITE(*,*) "Modificando matriz de rigideces por restricciones."

      DO 1036 i = 1,NNUD
      NR = i*6 - 5

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al despl. en x
      IF(IRX(i).EQ.1) THEN

!      Cambia (0) por (1)
      DO 1030 j = 1,NGL

      XRIG(NR, j) = 0
      XRIG(j, NR) = 0

1030 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al despl. en y
      NR = NR + 1

      IF(IRY(i).EQ.1) THEN
!      Cambio (0) por (1)

      DO 1031 j = 1,NGL

      XRIG(NR,j) = 0
      XRIG(j,NR) = 0

1031 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al despl. en z
      NR = NR + 1

      IF (IRZ(i).EQ.1) THEN
!      Cambio (0) por (1)

      DO 1032 j = 1,NGL

      XRIG(NR,j) = 0
      XRIG(j,NR) = 0

1032 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al mom. en x
      NR = NR + 1

      IF (IRAX(i).EQ.1) THEN
!      Cambio (0) por (1)

      DO 1033 j = 1,NGL

      XRIG(NR,j) = 0
      XRIG(j,NR) = 0

```

```

1033 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al mom. en y
      NR = NR + 1

      IF (IRAY(i).EQ.1) THEN
!      Cambio (0) por (1)

      DO 1034 j = 1,NGL

      XRIG(NR,j) = 0
      XRIG(j,NR) = 0

1034 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

!      Modificación del renglón y columna correspondiente al mom. en z
      NR = NR + 1

      IF (IRAZ(i).EQ.1) THEN
!      Cambio (0) por (1)

      DO 1035 j = 1,NGL

      XRIG(NR,j) = 0
      XRIG(j,NR) = 0

1035 CONTINUE

      XRIG(NR,NR) = 1
      F(NR) = 0

      END IF

1036 CONTINUE

!      =====
!      Resolución al sistema de ecuaciones

      WRITE(*,*) "Calculando, favor de esperar..."
      PRINT *
      PRINT *
      WRITE(*,*) "Resolviendo el sistema de ecuaciones..."
      PRINT *

      CALL CROUT(NGL,XRIG,F,D)

!      Impresión de desplazamientos de los nudos

      WRITE(10,45)

      ii = 5

      WRITE(10,40)

      DO 1037 i = 1,NNUD

      K = i*6
      ii = ii+1

      WRITE(10,41) i,d(K-5),d(K-4),d(K-3),d(K-2),d(K-1),d(K)

```

```

      IF (ii.GT.22) THEN
      ii = 0
      WRITE(*,*) "NUDO          dx          dy          dz          tx
+          ty          tz "
      END IF

1037 CONTINUE

!      Obtención de elementos mecánicos por cada barra
      WRITE(10,*)
      WRITE(10,*)"
+ ELEMENTOS MECANICOS (FUERZAS LOCALES)"
      WRITE(10,*)
      WRITE(10,1074)

      DO 1041 i = 1,NBAR
!      Extremos a y b de la barra i
      A = NO(i)
      B = ND(i)

!      Desplazamientos de a y b en globales
      DO 1038 j = 1,6

      DA(j) = D(6*A - (6-j))
      DB(j) = D(6*B - (6-j))

1038 CONTINUE

!      Transformando {dB},{dA} a locales
!      {d'} = [T] {d}

      CALL TRANSFORMA(T,COALFX(i),COALFY(i),COALFZ(i),COBETX(i),
+COBETY(i),COBETZ(i),COGAMX(i),COGAMY(i),COGAMZ(i))
      CALL MULMATVEC(T,DA,DPA,6)
      CALL MULMATVEC(T,DB,DPB,6)

!      Obtención de rigideces de la barra en locales
      CALL OBTKPAA(XKPAA,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))
      CALL OBTKPAB(XKPAB,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))
      CALL TRANSPONE(XKPAB,XKPBA,6)
      CALL OBTKPBB(XKPBB,XLON(i),AREA(i),XINERX(i),XINERY(i),
+XINERZ(i),ELAS(i),G(i),XJ(i))

!      Fuerzas en locales
      CALL MULMATVEC(XKPAA,DPA,DAUX,6)
      CALL MULMATVEC(XKPAB,DPB,DBAUX,6)
      CALL SUMAVEC(DAUX,DBAUX,FPA,6)
      CALL MULMATVEC(XKPBA,DPA,DAUX,6)
      CALL MULMATVEC(XKPBB,DPB,DBAUX,6)
      CALL SUMAVEC(DAUX,DBAUX,FPB,6)

      DO 1039 j = 1,6
      FPA(j) = FPA(j) + FEMPA(i, j)
      FPB(j) = FPB(j) + FEMPB(i, j)
1039 CONTINUE

!      Impresión de elementos mecánicos
      CALL IMPRIME(i,NO(i),FPA)
      CALL IMPRIME(i,ND(i),FPB)

      WRITE(10,50) i, NO(i), (FPA(j),j=1,6),ND(i), (FPB(j),j=1,6)

!      Verificación de equilibrio en cada nudo
!      Transformacion de fuerzas (elementos mecánicos) al sistema global
      CALL TRANSPONE(T,TT,6)
      CALL MULMATVEC(TT,FPA,FA,6)
      CALL MULMATVEC(TT,FPB,FB,6)

      DO 1040 j = 1,6

      EQ(6*A - (6-j)) = EQ(6*A - (6-j)) + FA(j)

```

```

      EQ(6*B - (6-j)) = EQ(6*B - (6-j)) + FB(j)

1040 CONTINUE
1041 CONTINUE

!      Agregando fuerzas externas ala comprobación del equilibrio
      ii = 6

      WRITE(10,42)

      DO 1043 j = 1,NNUD
      ii = ii + 1
      DO 1042 i = 1,6
      EQ(6*j - (6-i)) = EQ(6*j - (6-i)) - FE(6*j - (6-i))
      FAUX(I) = EQ(6*j - (6-i))

1042 CONTINUE

      WRITE(10,41) J, (FAUX(IA), IA=1,6)

1043 CONTINUE

      CLOSE (10)

      GOTO 1

      WRITE(*,*) "Fin del programa."

      CALL DETENER

      END

! =====

      SUBROUTINE CROUT(N,A,B,H)

!      Solución al sistema de ecuaciones Metodo de Crout

      DIMENSION A(7998,7998),B(7998),H(7998)

      DO 1925 j = 2,N

      IF (A(1,j).EQ.0) THEN
      GOTO 1925
      END IF

      A(1,j) = A(1,j)/A(1,1)

1925 CONTINUE

      B(1) = B(1)/A(1,1)

      DO 3 j = 2,N
      DO 1 i = j,N
      DO 1935 K = 1,j - 1

      IF (A(i,K).EQ.0) THEN
      GOTO 1935
      END IF

      A(i,j) = A(i,j) - A(i,K)*A(K,j)

1935 CONTINUE
1 CONTINUE

      SUM = 0
      SUT = 0
      SUR = 0

      IF (j.EQ.N) THEN
      GOTO 1955
      END IF

```

```

DO 2 LL = j + 1,N
SUM = 0
DO 1945 K = 1,j - 1

IF (A(j,K).EQ.0) THEN
GOTO 1945
END IF

SUM = SUM + A(j,K)*A(K,LL)

1945 CONTINUE

IF (A(j,j).EQ.0) THEN
WRITE(*,*) 'Hay un problema de division por cero.'

CALL DETENER

END IF

A(j,LL) = (A(j,LL) - SUM)/A(j,j)

2 CONTINUE

1955 SUT = 0

DO 1965 K = 1,j - 1

IF (A(j,K).EQ.0) THEN
GOTO 1965
END IF

SUT = SUT + A(j,K)*B(K)

1965 CONTINUE

B(j) = (B(j) - SUT)/A(j,j)

3 CONTINUE

H(N) = B(N)

DO 5 i = N - 1,1,-1
SUR = 0
DO 4 K = i + 1,N
SUR = SUR + A(i,K)*H(K)

4 CONTINUE

H(i) = B(i) - SUR

5 CONTINUE

RETURN

END

! =====

SUBROUTINE DETENER

WRITE(*,*) "Presione cualquier tecla para continuar..."

PAUSE

RETURN

END

! =====

SUBROUTINE GUARDAK(XKXX,IA,IB,XRIG)

```



```

DIMENSION XRIG(7998,7998),XKXX(6,6)

IRENK = 6*(IA-1)
ICOLK = 6*(IB-1)

DO 2 i = 1,6
DO 1 j = 1,6

XRIG(IRENK+i,ICOLK+j) = XRIG(IRENK+i,ICOLK+j) + XKXX(i,j)

1 CONTINUE
2 CONTINUE

RETURN

END

! =====

SUBROUTINE IMPRIME (IBARRA,IEXTREMO,FUERZA)

DIMENSION FUERZA (6)
! Imprime los resultados de la estructura

WRITE(*,*) "Barra", ibarra, " Fuerzas Locales"
PRINT *
WRITE(*,*) "Nudo", iextremo
PRINT *
WRITE(*,*) "Fuerza x = ", fuerza(1)
WRITE(*,*) "Fuerza y = ", fuerza(2)
WRITE(*,*) "Fuerza z = ", fuerza(3)
WRITE(*,*) "Momento x = ", fuerza(4)
WRITE(*,*) "Momento y = ", fuerza(5)
WRITE(*,*) "Momento z = ", fuerza(6)

RETURN

END

! =====

SUBROUTINE MUESTRAMAT(A,N,MENSAJE$)

CHARACTER MENSAJE$*18
DIMENSION A(6,6)

PRINT *
WRITE(*,*) "MATRIZ : ",MENSAJE$

DO 2 i = 1,N
DO 1 j = 1,N
WRITE(*,*) A(i,j)
1 CONTINUE
PRINT *
2 CONTINUE

RETURN

END

! =====

SUBROUTINE MULMATVEC(A,B,C,N)

DIMENSION A(6,6),B(6),C(6)

DO 2 i = 1,N
SUMA = 0
DO 1 K = 1,N
SUMA = SUMA + A(i,K)*B(K)
1 CONTINUE
C(i) = SUMA
2 CONTINUE

```

RETURN

END

!

SUBROUTINE MULTIPLICA(A,B,C,N)

DIMENSION A(6,6),B(6,6),C(6,6)

DO 3 i = 1,N

DO 2 j = 1,N

SUMA = 0

DO 1 k = 1,N

SUMA = SUMA + A(i,k)*B(k,j)

1 CONTINUE

C(i,j) = SUMA

2 CONTINUE

3 CONTINUE

RETURN

END

!

SUBROUTINE OBTKPAA(XKP,XL,AR,XINERX,XINERY,XINERZ,ELAS,G,XJ)

DIMENSION XKP(6,6)

XKP(1,1) = ELAS*AR/XL

XKP(1,2) = 0

XKP(1,3) = 0

XKP(1,4) = 0

XKP(1,5) = 0

XKP(1,6) = 0

XKP(2,2) = 12*ELAS*XINERZ/XL**3

XKP(2,3) = 0

XKP(2,4) = 0

XKP(2,5) = 0

XKP(2,6) = 6*ELAS*XINERZ/XL**2

XKP(3,3) = 12*ELAS*XINERY/XL**3

XKP(3,4) = 0

XKP(3,5) = -6*ELAS*XINERY/XL**2

XKP(3,6) = 0

XKP(4,4) = G*XJ/XL

XKP(4,5) = 0

XKP(4,6) = 0

XKP(5,5) = 4*ELAS*XINERY/XL

XKP(5,6) = 0

XKP(6,6) = 4*ELAS*XINERZ/XL

XINERX = XINERX

DO 2 i = 1,6

DO 1 k = i,6

XKP(k,i) = XKP(i,k)

1 CONTINUE

2 CONTINUE

RETURN

END

!

```
SUBROUTINE OBTKPAB(XKP,XL,AR,XINERX,XINERY,XINERZ,ELAS,G,XJ)
```

```
DIMENSION XKP(6,6)
```

```
XKP(1,1) = -ELAS*AR/XL
XKP(1,2) = 0
XKP(1,3) = 0
XKP(1,4) = 0
XKP(1,5) = 0
XKP(1,6) = 0
```

```
XKP(2,1) = 0
XKP(2,2) = -12*ELAS*XINERZ/XL**3
XKP(2,3) = 0
XKP(2,4) = 0
XKP(2,5) = 0
XKP(2,6) = 6*ELAS*XINERZ/XL**2
```

```
XKP(3,1) = 0
XKP(3,2) = 0
XKP(3,3) = -12*ELAS*XINERY/XL**3
XKP(3,4) = 0
XKP(3,5) = -6*ELAS*XINERY/XL**2
XKP(3,6) = 0
```

```
XKP(4,1) = 0
XKP(4,2) = 0
XKP(4,3) = 0
XKP(4,4) = -G*XJ/XL
XKP(4,5) = 0
XKP(4,6) = 0
```

```
XKP(5,1) = 0
XKP(5,2) = 0
XKP(5,3) = 6*ELAS*XINERY/XL**2
XKP(5,4) = 0
XKP(5,5) = 2*ELAS*XINERY/XL
XKP(5,6) = 0
```

```
XKP(6,1) = 0
XKP(6,2) = -6*ELAS*XINERZ/XL**2
XKP(6,3) = 0
XKP(6,4) = 0
XKP(6,5) = 0
XKP(6,6) = 2*ELAS*XINERZ/XL
```

```
XINERX = XINERX
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
! =====
```

```
SUBROUTINE OBTKPBB(XKP,XL,AR,XINERX,XINERY,XINERZ,ELAS,G,XJ)
```

```
DIMENSION XKP(6,6)
```

```
XKP(1,1) = ELAS*AR/XL
XKP(1,2) = 0
XKP(1,3) = 0
XKP(1,4) = 0
XKP(1,5) = 0
XKP(1,6) = 0
```

```
XKP(2,2) = 12*ELAS*XINERZ/XL**3
XKP(2,3) = 0
XKP(2,4) = 0
XKP(2,5) = 0
XKP(2,6) = -6*ELAS*XINERZ/XL**2
```

```
XKP(3,3) = 12*ELAS*XINERY/XL**3
```

```

XKP(3,4) = 0
XKP(3,5) = 6*ELAS*XINERY/XL**2
XKP(3,6) = 0

```

```

XKP(4,4) = G*XJ/XL
XKP(4,5) = 0
XKP(4,6) = 0

```

```

XKP(5,5) = 4*ELAS*XINERY/XL
XKP(5,6) = 0

```

```

XKP(6,6) = 4*ELAS*XINERZ/XL

```

```

XINERX = XINERX

```

```

DO 2 i = 1,6
DO 1 k = i,6

```

```

XKP(k,i) = XKP(i,k)

```

```

1 CONTINUE
2 CONTINUE

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

! =====

```

```

SUBROUTINE PRODCRUZ(A,B,C)

```

```

DIMENSION A(3),B(3),C(3)

```

```

C(1) = A(2) * B(3) - A(3) * B(2)
C(2) = A(3) * B(1) - A(1) * B(3)
C(3) = A(1) * B(2) - A(2) * B(1)

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

! =====

```

```

SUBROUTINE SUMAVEC(A,B,C,N)

```

```

DIMENSION A(6),B(6),C(6)

```

```

DO 1 i = 1,N
C(i) = A(i) + B(i)
1 CONTINUE

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

! =====

```

```

SUBROUTINE TRANSFORMA(T,COALFX,COALFY,COALFZ,COBETX,COBETY,COBETZ,
+COGAMX,COGAMY,COGAMZ)

```

```

DIMENSION T(6,6)

```

```

T(1,1) = COALFX
T(1,2) = COBETX
T(1,3) = COGAMX
T(1,4) = 0
T(1,5) = 0
T(1,6) = 0

```

```

T(2,1) = COALFY
T(2,2) = COBETY
T(2,3) = COGAMY
T(2,4) = 0

```

```
T(2,5) = 0
T(2,6) = 0
```

```
T(3,1) = COALFZ
T(3,2) = COBETZ
T(3,3) = COGAMZ
T(3,4) = 0
T(3,5) = 0
T(3,6) = 0
```

```
T(4,1) = 0
T(4,2) = 0
T(4,3) = 0
T(4,4) = COALFX
T(4,5) = COBETX
T(4,6) = COGAMX
```

```
T(5,1) = 0
T(5,2) = 0
T(5,3) = 0
T(5,4) = COALFY
T(5,5) = COBETY
T(5,6) = COGAMY
```

```
T(6,1) = 0
T(6,2) = 0
T(6,3) = 0
T(6,4) = COALFZ
T(6,5) = COBETZ
T(6,6) = COGAMZ
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
! =====
```

```
SUBROUTINE TRANSPONE(A,AT,N)
```

```
DIMENSION A(6,6), AT(6,6)
```

```
DO 2 i = 1,N
DO 1 j = 1,N
AT(j, i) = A(i, j)
```

```
1 CONTINUE
```

```
2 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
! =====
```



ANEXO 6.

Archivos de datos para el Análisis de Interacción Suelo – Estructura.



ARCHIVOS DEL PROGRAMA EMISES3D

Debido al tamaño de los archivos de datos .DAT por la misma dimensión del modelo reticular, se omiten algunas líneas y se muestran los datos principales utilizados en el análisis.

- Archivo de datos .FRM de la Etapa 3

En la tabla A.6.1. se presenta el resumen de los parámetros utilizados para la primera etapa de modelado de manera simplificada.

- Archivo de datos .FRM de la Etapa 5

Para la etapa 5 se instalan los puntales inclinados y se excava hasta los -8.10 m, por lo tanto, se calcula el valor de resistencia equivalente a 31.521 t de los elementos. Se modifica la matriz de rigidez .KS2 agregando el valor del resorte a la profundidad en donde se aplica la restricción.

La modificación en el archivo de datos .FRM para esta etapa corresponde a los últimos parámetros de las cargas y se presentan en la tabla A.6.2.

- Archivo de datos .FRM de la Etapa 6

En esta etapa se construye la primera mitad de la mega zapata, por lo cual, se modifican los parámetros correspondientes del nivel -5.00 m al -8.00 m de las barras cambiando de la tablestaca metálica a la rigidez de la estructura de concreto. La modificación en el archivo de datos .FRM para esta etapa se presentan en la tabla A.6.3.

- Archivo de datos .FRM de la Etapa 6

Finalmente, en esta etapa se libera la restricción de los puntales diagonales metálicos, aunque se rigidizó la retícula debido a la construcción de la primera mitad de la mega zapata, aún queda una sección libre de la tablestaca soportando los esfuerzos laterales. La modificación en el archivo de datos corresponde a las cargas liberadas por los puntales como se indica en la tabla A.6.4.

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX
1822,943

0.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,2	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
6.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	2,3	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
12.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	3,4	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
18.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	4,5	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
24.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	5,6	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
30.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	6,7	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
36.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	7,8	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
42.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	8,9	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
48.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	9,10	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
54.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	10,11	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
60.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	11,12	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
66.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	12,13	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
72.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	13,14	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
78.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	14,15	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
84.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	15,16	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
90.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	16,17	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
96.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	17,18	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
102.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	18,19	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
108.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	19,20	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
114.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	20,21	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
120.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	21,22	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
126.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	22,23	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
132.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,24	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
0.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	2,25	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
6.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	3,26	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
12.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	4,27	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
18.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	5,28	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
24.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	6,29	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
30.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	17,40	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
36.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	18,41	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
42.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	19,42	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
48.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	20,43	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
54.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	21,44	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
60.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	22,45	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
66.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	23,46	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
72.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	24,25	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
0.00,0.00,2.50,1,1,1,1,1,0	25,26	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
6.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	26,27	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
12.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	27,28	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
18.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	28,29	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
24.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	29,30	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
30.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	30,31	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
36.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	31,32	0.7000,0.064921,0.05833,0.028583
60.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	36,59	21000000,0.3
66.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	37,60	21000000,0.3
72.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	914,915	21000000,0.3
78.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	915,916	21000000,0.3
84.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	916,917	21000000,0.3
90.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	917,918	21000000,0.3
42.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	925,926	23000000,0.3
48.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	927,928	23000000,0.3
54.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	928,929	23000000,0.3
60.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	930,931	23000000,0.3
66.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	931,932	23000000,0.3
72.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	932,933	23000000,0.3
78.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	933,934	23000000,0.3
84.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	934,935	23000000,0.3
90.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	935,936	23000000,0.3
96.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	936,937	2000000,0.2
102.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	937,938	2000000,0.2
108.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	938,939	2000000,0.2
114.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	939,940	2000000,0.2
120.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	940,941	2000000,0.2
126.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	941,942	2000000,0.2
132.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	942,943	2000000,0.2

TABLA A.6.1

0,0,0,0,0,0,0	902,0,0	111,0,0.8130,0	245,0,2.3600,0	379,0,1.2630,0	513,0,0.8820,0	647,0,0.6840,0	781,0,0.5520,0	915,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	1,0,0.7500,0	112,0,0.8130,0	246,0,2.3600,0	380,0,1.2630,0	514,0,0.8820,0	648,0,0.6840,0	782,0,0.5520,0	916,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	2,0,0.7500,0	136,0,2.7210,0	247,0,2.3600,0	381,0,1.2630,0	515,0,0.8820,0	649,0,0.6840,0	783,0,0.5520,0	917,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	3,0,0.7500,0	137,0,2.7210,0	271,0,1.8360,0	382,0,1.2630,0	516,0,0.8820,0	650,0,0.6840,0	784,0,0.5520,0	918,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	4,0,0.7500,0	138,0,2.7210,0	272,0,1.8360,0	406,0,1.1010,0	517,0,0.8820,0	651,0,0.6840,0	785,0,0.5520,0	919,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	5,0,0.7500,0	139,0,2.7210,0	273,0,1.8360,0	407,0,1.1010,0	541,0,0.8040,0	652,0,0.6840,0	786,0,0.5520,0	920,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	6,0,0.7500,0	140,0,2.7210,0	274,0,1.8360,0	408,0,1.1010,0	542,0,0.8040,0	676,0,0.6350,0	787,0,0.5520,0	921,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	7,0,0.7500,0	141,0,2.7210,0	275,0,1.8360,0	409,0,1.1010,0	543,0,0.8040,0	677,0,0.6350,0	811,0,0.5170,0	922,0,0.4550,0
3,0,0,0,0,0,0	8,0,0.7500,0	142,0,2.7210,0	276,0,1.8360,0	410,0,1.1010,0	544,0,0.8040,0	678,0,0.6350,0	812,0,0.5170,0	946,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	9,0,0.7500,0	143,0,2.7210,0	277,0,1.8360,0	411,0,1.1010,0	545,0,0.8040,0	679,0,0.6350,0	813,0,0.5170,0	947,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	10,0,0.7500,0	144,0,2.7210,0	278,0,1.8360,0	412,0,1.1010,0	546,0,0.8040,0	680,0,0.6350,0	814,0,0.5170,0	948,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	11,0,0.7500,0	145,0,2.7210,0	279,0,1.8360,0	413,0,1.1010,0	547,0,0.8040,0	681,0,0.6350,0	815,0,0.5170,0	949,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	12,0,0.7500,0	146,0,2.7210,0	280,0,1.8360,0	414,0,1.1010,0	548,0,0.8040,0	682,0,0.6350,0	816,0,0.5170,0	950,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	13,0,0.7500,0	147,0,2.7210,0	281,0,1.8360,0	415,0,1.1010,0	549,0,0.8040,0	683,0,0.6350,0	817,0,0.5170,0	951,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	14,0,0.7500,0	148,0,2.7210,0	282,0,1.8360,0	416,0,1.1010,0	550,0,0.8040,0	684,0,0.6350,0	818,0,0.5170,0	952,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	15,0,0.7500,0	149,0,2.7210,0	283,0,1.8360,0	417,0,1.1010,0	551,0,0.8040,0	685,0,0.6350,0	819,0,0.5170,0	953,0,0.4280,0
3,0,0,0,0,0,0	16,0,0.7500,0	150,0,2.7210,0	284,0,1.8360,0	418,0,1.1010,0	552,0,0.8040,0	686,0,0.6350,0	820,0,0.5170,0	1763,0,0.1630,0
3,0,0,0,0,0,0	17,0,0.7500,0	151,0,2.7210,0	285,0,1.8360,0	419,0,1.1010,0	553,0,0.8040,0	687,0,0.6350,0	821,0,0.5170,0	1764,0,0.1630,0
3,0,0,0,0,0,0	18,0,0.7500,0	152,0,2.7210,0	286,0,1.8360,0	420,0,1.1010,0	554,0,0.8040,0	688,0,0.6350,0	822,0,0.5170,0	1765,0,0.1630,0
3,0,0,0,0,0,0	19,0,0.7500,0	153,0,2.7210,0	287,0,1.8360,0	421,0,1.1010,0	555,0,0.8040,0	689,0,0.6350,0	823,0,0.5170,0	1766,0,0.1630,0
3,0,0,0,0,0,0	20,0,0.7500,0	154,0,2.7210,0	288,0,1.8360,0	422,0,1.1010,0	556,0,0.8040,0	690,0,0.6350,0	824,0,0.5170,0	1767,0,0.1630,0
3,0,0,0,0,0,0	21,0,0.7500,0	155,0,2.7210,0	289,0,1.8360,0	423,0,1.1010,0	557,0,0.8040,0	691,0,0.6350,0	825,0,0.5170,0	1768,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	22,0,0.7500,0	156,0,2.7210,0	290,0,1.8360,0	424,0,1.1010,0	558,0,0.8040,0	692,0,0.6350,0	826,0,0.5170,0	1769,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	46,0,0.7000,0	157,0,2.7210,0	291,0,1.8360,0	425,0,1.1010,0	559,0,0.8040,0	693,0,0.6350,0	827,0,0.5170,0	1770,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	47,0,0.7000,0	181,0,5.0510,0	292,0,1.8360,0	426,0,1.1010,0	560,0,0.8040,0	694,0,0.6350,0	828,0,0.5170,0	1771,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	48,0,0.7000,0	182,0,5.0510,0	316,0,1.4920,0	427,0,1.1010,0	561,0,0.8040,0	695,0,0.6350,0	829,0,0.5170,0	1772,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	49,0,0.7000,0	183,0,5.0510,0	317,0,1.4920,0	451,0,0.9790,0	562,0,0.8040,0	696,0,0.6350,0	830,0,0.5170,0	1773,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	50,0,0.7000,0	184,0,5.0510,0	318,0,1.4920,0	452,0,0.9790,0	586,0,0.7390,0	697,0,0.6350,0	831,0,0.5170,0	1774,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	51,0,0.7000,0	185,0,5.0510,0	319,0,1.4920,0	453,0,0.9790,0	587,0,0.7390,0	721,0,0.5900,0	832,0,0.5170,0	1775,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	52,0,0.7000,0	186,0,5.0510,0	320,0,1.4920,0	454,0,0.9790,0	588,0,0.7390,0	722,0,0.5900,0	856,0,0.4850,0	1776,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	53,0,0.7000,0	187,0,5.0510,0	321,0,1.4920,0	455,0,0.9790,0	589,0,0.7390,0	723,0,0.5900,0	857,0,0.4850,0	1777,0,0.1630,0
1,0,0,0,0,0,0	54,0,0.7000,0	188,0,5.0510,0	322,0,1.4920,0	456,0,0.9790,0	590,0,0.7390,0	724,0,0.5900,0	858,0,0.4850,0	1801,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	55,0,0.7000,0	189,0,5.0510,0	323,0,1.4920,0	457,0,0.9790,0	591,0,0.7390,0	725,0,0.5900,0	859,0,0.4850,0	1802,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	56,0,0.7000,0	190,0,5.0510,0	324,0,1.4920,0	458,0,0.9790,0	592,0,0.7390,0	726,0,0.5900,0	860,0,0.4850,0	1803,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	57,0,0.7000,0	191,0,5.0510,0	325,0,1.4920,0	459,0,0.9790,0	593,0,0.7390,0	727,0,0.5900,0	861,0,0.4850,0	1804,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	58,0,0.7000,0	192,0,5.0510,0	326,0,1.4920,0	460,0,0.9790,0	594,0,0.7390,0	728,0,0.5900,0	862,0,0.4850,0	1805,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	59,0,0.7000,0	193,0,5.0510,0	327,0,1.4920,0	461,0,0.9790,0	595,0,0.7390,0	729,0,0.5900,0	863,0,0.4850,0	1806,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	60,0,0.7000,0	194,0,5.0510,0	328,0,1.4920,0	462,0,0.9790,0	596,0,0.7390,0	730,0,0.5900,0	864,0,0.4850,0	1807,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	61,0,0.7000,0	195,0,5.0510,0	329,0,1.4920,0	463,0,0.9790,0	597,0,0.7390,0	731,0,0.5900,0	865,0,0.4850,0	1808,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	62,0,0.7000,0	196,0,5.0510,0	330,0,1.4920,0	464,0,0.9790,0	598,0,0.7390,0	732,0,0.5900,0	866,0,0.4850,0	1809,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	63,0,0.7000,0	197,0,5.0510,0	331,0,1.4920,0	465,0,0.9790,0	599,0,0.7390,0	733,0,0.5900,0	867,0,0.4850,0	1810,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	64,0,0.7000,0	198,0,5.0510,0	332,0,1.4920,0	466,0,0.9790,0	600,0,0.7390,0	734,0,0.5900,0	868,0,0.4850,0	1811,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	65,0,0.7000,0	199,0,5.0510,0	333,0,1.4920,0	467,0,0.9790,0	601,0,0.7390,0	735,0,0.5900,0	869,0,0.4850,0	1812,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	66,0,0.7000,0	200,0,5.0510,0	334,0,1.4920,0	468,0,0.9790,0	602,0,0.7390,0	736,0,0.5900,0	870,0,0.4850,0	1813,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	67,0,0.7000,0	201,0,5.0510,0	335,0,1.4920,0	469,0,0.9790,0	603,0,0.7390,0	737,0,0.5900,0	871,0,0.4850,0	1814,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	91,0,0.8130,0	202,0,5.0510,0	336,0,1.4920,0	470,0,0.9790,0	604,0,0.7390,0	738,0,0.5900,0	872,0,0.4850,0	1815,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	92,0,0.8130,0	226,0,2.3600,0	337,0,1.4920,0	471,0,0.9790,0	605,0,0.7390,0	739,0,0.5900,0	873,0,0.4850,0	1816,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	93,0,0.8130,0	227,0,2.3600,0	361,0,1.2630,0	472,0,0.9790,0	606,0,0.7390,0	740,0,0.5900,0	874,0,0.4850,0	1817,0,0.1540,0
1,0,0,0,0,0,0	94,0,0.8130,0	228,0,2.3600,0	362,0,1.2630,0	496,0,0.8820,0	607,0,0.7390,0	741,0,0.5900,0	875,0,0.4850,0	1818,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	95,0,0.8130,0	229,0,2.3600,0	363,0,1.2630,0	497,0,0.8820,0	631,0,0.6840,0	742,0,0.5900,0	876,0,0.4850,0	1819,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	96,0,0.8130,0	230,0,2.3600,0	364,0,1.2630,0	498,0,0.8820,0	632,0,0.6840,0	766,0,0.5520,0	877,0,0.4850,0	1820,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	97,0,0.8130,0	231,0,2.3600,0	365,0,1.2630,0	499,0,0.8820,0	633,0,0.6840,0	767,0,0.5520,0	901,0,0.4550,0	1821,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	98,0,0.8130,0	232,0,2.3600,0	366,0,1.2630,0	500,0,0.8820,0	634,0,0.6840,0	768,0,0.5520,0	902,0,0.4550,0	1822,0,0.1540,0
3,0,0,0,0,0,0	99,0,0.8130,0	233,0,2.3600,0	367,0,1.2630,0	501,0,0.8820,0	635,0,0.6840,0	769,0,0.5520,0	903,0,0.4550,0	1037,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	100,0,0.8130,0	234,0,2.3600,0	368,0,1.2630,0	502,0,0.8820,0	636,0,0.6840,0	770,0,0.5520,0	904,0,0.4550,0	1038,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	101,0,0.8130,0	235,0,2.3600,0	369,0,1.2630,0	503,0,0.8820,0	637,0,0.6840,0	771,0,0.5520,0	905,0,0.4550,0	1039,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	102,0,0.8130,0	236,0,2.3600,0	370,0,1.2630,0	504,0,0.8820,0	638,0,0.6840,0	772,0,0.5520,0	906,0,0.4550,0	1040,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	103,0,0.8130,0	237,0,2.3600,0	371,0,1.2630,0	505,0,0.8820,0	639,0,0.6840,0	773,0,0.5520,0	907,0,0.4550,0	1041,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	104,0,0.8130,0	238,0,2.3600,0	372,0,1.2630,0	506,0,0.8820,0	640,0,0.6840,0	774,0,0.5520,0	908,0,0.4550,0	1042,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	105,0,0.8130,0	239,0,2.3600,0	373,0,1.2630,0	507,0,0.8820,0	641,0,0.6840,0	775,0,0.5520,0	909,0,0.4550,0	1043,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	106,0,0.8130,0	240,0,2.3600,0	374,0,1.2630,0	508,0,0.8820,0	642,0,0.6840,0	776,0,0.5520,0	910,0,0.4550,0	1044,0,0.3810,0
3,0,0,0,0,0,0	107,0,0.8130,0	241,0,2.3600,0	375,0,1.2630,0	509,0,0.8820,0	643,0,0.6840,0	777,0,0.5520,0	911,0,0.4550,0	1045,0,0.3810,0
1,0,0,0,0,0,0	108,0,0.8130,0	242,0,2.3600,0	376,0,1.2630,0	510,0,0.8820,0	644,0,0.6840,0	778,0,0.5520,0	912,0,0.4550,0	1046,0,0.3810,0
1,0,0,0,0,0,0	109,0,0.8130,0	243,0,2.3600,0	377,0,1.2630,0	511,0,0.8820,0	645,0,0.6840,0	779,0,0.5520,0	913,0,0.4550,0	1047,0,0.3810,0
1,0,0,0,0,0,0	110,0,0.8130,0	244,0,2.3600,0	378,0,1.2630,0	512,0,0.8820,0	646,0,0.6840,0	780,0,0.5520,0	914,0,0.4550,0	1048,0,0.3810,0

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX
1822,943

0.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,2	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
6.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	2,3	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
12.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	3,4	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
18.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	4,5	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
24.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	5,6	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
30.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	6,7	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
36.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	7,8	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
42.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	8,9	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
48.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	9,10	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
54.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	10,11	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
60.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	11,12	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
66.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	12,13	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
72.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	13,14	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
78.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	14,15	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
84.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	15,16	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
90.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	16,17	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
96.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	17,18	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
102.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	18,19	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
108.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	19,20	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
114.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	20,21	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
120.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	21,22	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
126.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	22,23	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
132.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,24	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
0.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	2,25	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
6.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	3,26	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
12.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	4,27	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
18.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	5,28	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
24.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	6,29	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
30.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	17,40	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
36.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	18,41	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
42.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	19,42	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
48.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	20,43	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
54.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	21,44	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
60.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	22,45	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
66.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	23,46	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
72.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	24,25	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
78.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	25,26	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
84.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	26,27	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
90.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	27,28	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
96.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	28,29	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
102.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	29,30	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
108.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	30,31	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
114.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	31,32	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
120.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	36,59	21000000,0.3
126.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	37,60	21000000,0.3
132.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	914,915	21000000,0.3
0.00,0.00,2.50,1,1,1,1,1,0	915,916	21000000,0.3
6.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	916,917	21000000,0.3
12.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	917,918	21000000,0.3
18.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	925,926	23000000,0.3
24.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	927,928	23000000,0.3
30.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	928,929	23000000,0.3
36.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	930,931	23000000,0.3
42.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	931,932	23000000,0.3
48.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	932,933	23000000,0.3
54.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	933,934	23000000,0.3
60.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	934,935	23000000,0.3
66.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	935,936	23000000,0.3
72.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	936,937	2000000,0.2
78.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	937,938	2000000,0.2
84.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	938,939	2000000,0.2
90.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	939,940	2000000,0.2
96.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	940,941	2000000,0.2
102.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	941,942	2000000,0.2
108.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	942,943	2000000,0.2
114.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0		
120.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0		
126.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0		
132.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0		

TABLA A.6.2

3,0,0,0,0,0,0,0	110,0,0	201,0,4.5630,0
3,0,0,0,0,0,0,0	91,0,0.1590,0	202,0,4.5630,0
3,0,0,0,0,0,0,0	92,0,0.1590,0	226,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	93,0,0.1590,0	227,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	94,0,0.1590,0	228,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	95,0,0.1590,0	229,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	96,0,0.1590,0	230,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	97,0,0.1590,0	231,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	98,0,0.1590,0	232,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	99,0,0.1590,0	233,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	100,0,0.1590,0	234,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	101,0,0.1590,0	235,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	102,0,0.1590,0	236,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	103,0,0.1590,0	237,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	104,0,0.1590,0	238,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	105,0,0.1590,0	239,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	106,0,0.1590,0	240,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	107,0,0.1590,0	241,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	108,0,0.1590,0	242,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	109,0,0.1590,0	243,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	110,0,0.1590,0	244,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	111,0,0.1590,0	245,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	112,0,0.1590,0	246,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	136,0,2.1090,0	247,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	137,0,2.1090,0	271,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	138,0,2.1090,0	272,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	139,0,2.1090,0	273,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	140,0,2.1090,0	274,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	141,0,2.1090,0	275,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	142,0,2.1090,0	276,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	143,0,2.1090,0	277,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	144,0,2.1090,0	278,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	145,0,2.1090,0	279,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	146,0,2.1090,0	280,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	147,0,2.1090,0	281,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	148,0,2.1090,0	282,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	149,0,2.1090,0	283,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	150,0,2.1090,0	284,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	151,0,2.1090,0	285,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	152,0,2.1090,0	286,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	153,0,2.1090,0	287,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	154,0,2.1090,0	288,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	155,0,2.1090,0	289,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	156,0,2.1090,0	290,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	157,0,2.1090,0	291,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	181,0,4.5630,0	292,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	182,0,4.5630,0	381,0,1.2630,0
1,0,0,0,0,0,0,0	183,0,4.5630,0	382,0,1.2630,0
1,0,0,0,0,0,0,0	184,0,4.5630,0	406,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	185,0,4.5630,0	421,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	186,0,4.5630,0	422,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	187,0,4.5630,0	423,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	188,0,4.5630,0	424,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	189,0,4.5630,0	425,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	190,0,4.5630,0	426,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	191,0,4.5630,0	427,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	192,0,4.5630,0	451,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	193,0,4.5630,0	452,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	194,0,4.5630,0	453,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	195,0,4.5630,0	454,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	196,0,4.5630,0	455,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	197,0,4.5630,0	456,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	198,0,4.5630,0	457,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	199,0,4.5630,0	458,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	200,0,4.5630,0	459,0,0.9790,0

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MURO MILAN TORRE CDMX

1822,943		
0.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,2	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
6.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	2,3	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
12.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	3,4	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
18.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	4,5	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
24.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	5,6	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
30.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	6,7	0.015875,0.00000084802,0.00206706,0.00000021337
36.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	7,8	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
42.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	8,9	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
48.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	9,10	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
54.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	10,11	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
60.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	11,12	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
66.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	12,13	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
72.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	13,14	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
78.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	14,15	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
84.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	15,16	0.1572,0.007641,2.8296,0.001944
90.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	16,17	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
96.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	17,18	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
102.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	18,19	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
108.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	19,20	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
114.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	20,21	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
120.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	21,22	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
126.00,0.00,0.00,0,0,0,0,0,0	22,23	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
132.00,0.00,0.00,1,1,1,1,1,0	1,24	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
0.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	2,25	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
6.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	3,26	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
12.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	4,27	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
18.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	5,28	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
24.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	6,29	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
30.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	17,40	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
36.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	18,41	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
42.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	19,42	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
48.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	20,43	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
54.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	21,44	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
60.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	22,45	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
66.00,0.00,1.25,0,0,0,0,0,0	23,46	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
72.00,0.00,1.25,1,1,1,1,1,0	24,25	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
78.00,0.00,2.50,1,1,1,1,1,0	25,26	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
84.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	26,27	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
90.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	27,28	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
96.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	28,29	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
102.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	29,30	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
108.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	30,31	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
114.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	31,32	0.70000,0.064921,0.05833,0.028583
120.00,0.00,2.50,0,0,0,0,0,0	36,59	21000000,0.3
126.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	37,60	21000000,0.3
132.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	914,915	21000000,0.3
0.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	915,916	21000000,0.3
6.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	916,917	21000000,0.3
12.00,0.00,48.75,0,0,0,0,0,0	917,918	21000000,0.3
18.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	925,926	2000000,0.2
24.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	927,928	2000000,0.2
30.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	928,929	2000000,0.2
36.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	930,931	2000000,0.2
42.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	931,932	2000000,0.2
48.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	932,933	2000000,0.2
54.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	933,934	2000000,0.2
60.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	934,935	2000000,0.2
66.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	935,936	2000000,0.2
72.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	936,937	2000000,0.2
78.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	937,938	2000000,0.2
84.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	938,939	2000000,0.2
90.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	939,940	2000000,0.2
96.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	940,941	2000000,0.2
102.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	941,942	2000000,0.2
108.00,0.00,50.00,1,1,1,1,1,1	942,943	2000000,0.2

TABLA A.6.3

3,0,0,0,0,0,0,0	110,0,0	201,0,4.5630,0
3,0,0,0,0,0,0,0	91,0,0.1590,0	202,0,4.5630,0
3,0,0,0,0,0,0,0	92,0,0.1590,0	226,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	93,0,0.1590,0	227,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	94,0,0.1590,0	228,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	95,0,0.1590,0	229,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	96,0,0.1590,0	230,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	97,0,0.1590,0	231,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	98,0,0.1590,0	232,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	99,0,0.1590,0	233,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	100,0,0.1590,0	234,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	101,0,0.1590,0	235,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	102,0,0.1590,0	236,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	103,0,0.1590,0	237,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	104,0,0.1590,0	238,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	105,0,0.1590,0	239,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	106,0,0.1590,0	240,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	107,0,0.1590,0	241,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	108,0,0.1590,0	242,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	109,0,0.1590,0	243,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	110,0,0.1590,0	244,0,3.8880,0
3,0,0,0,0,0,0,0	111,0,0.1590,0	245,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	112,0,0.1590,0	246,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	136,0,2.1090,0	247,0,3.8880,0
1,0,0,0,0,0,0,0	137,0,2.1090,0	271,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	138,0,2.1090,0	272,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	139,0,2.1090,0	273,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	140,0,2.1090,0	274,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	141,0,2.1090,0	275,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	142,0,2.1090,0	276,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	143,0,2.1090,0	277,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	144,0,2.1090,0	278,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	145,0,2.1090,0	279,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	146,0,2.1090,0	280,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	147,0,2.1090,0	281,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	148,0,2.1090,0	282,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	149,0,2.1090,0	283,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	150,0,2.1090,0	284,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	151,0,2.1090,0	285,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	152,0,2.1090,0	286,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	153,0,2.1090,0	287,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	154,0,2.1090,0	288,0,3.5160,0
3,0,0,0,0,0,0,0	155,0,2.1090,0	289,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	156,0,2.1090,0	290,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	157,0,2.1090,0	291,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	181,0,4.5630,0	292,0,3.5160,0
1,0,0,0,0,0,0,0	182,0,4.5630,0	381,0,1.2630,0
1,0,0,0,0,0,0,0	183,0,4.5630,0	382,0,1.2630,0
1,0,0,0,0,0,0,0	184,0,4.5630,0	406,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	185,0,4.5630,0	421,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	186,0,4.5630,0	422,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	187,0,4.5630,0	423,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	188,0,4.5630,0	424,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	189,0,4.5630,0	425,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	190,0,4.5630,0	426,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	191,0,4.5630,0	427,0,1.1010,0
3,0,0,0,0,0,0,0	192,0,4.5630,0	451,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	193,0,4.5630,0	452,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	194,0,4.5630,0	453,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	195,0,4.5630,0	454,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	196,0,4.5630,0	455,0,0.9790,0
3,0,0,0,0,0,0,0	197,0,4.5630,0	456,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	198,0,4.5630,0	457,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	199,0,4.5630,0	458,0,0.9790,0
1,0,0,0,0,0,0,0	200,0,4.5630,0	459,0,0.9790,0

1,2
2,3
3,4
4,5
5,6
6,7
7,8
8,9
9,10
10,11
11,12
12,13
13,14
14,15
15,16
16,17
17,18
18,19
19,20
20,21
21,22
22,23
1,24
2,25
3,26
4,27
5,28
6,29
17,40
18,41
19,42
20,43
21,44
22,45
23,46
24,25
25,26
26,27
27,28
28,29
29,30
30,31
31,32
36,59
37,60
914,915
915,916
916,917
917,918
925,926
927,928
928,929
930,931
931,932
932,933
933,934
934,935
935,936
936,937
937,938
938,939
939,940
940,941
941,942
942,943

TABLA A.6.4

[illegible]



Se presenta en la tabla A.6.5 una sección de la matriz de rigidez utilizada para los cálculos de interacción suelo – estructura obtenida de FLEXHO, ya que la matriz original es de 943x943.

Tabla A.6.5. Sección de la matriz de rigidez KS1 del suelo.

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MURO MILÁN TORRE CDMX

943

8984.29	-366.084	-0.79639	-4.60072	-1.2211	-0.16335	0.28916	0.438266	0.455211	0.420729	0.369882
-150.868	998.4953	-188.269	-3.10765	-3.54622	-1.24445	-0.44213	-0.08191	0.065039	0.116244	0.126179
-0.16626	-186.343	8992.591	-186.266	-2.59739	-3.32451	-1.1422	-0.38665	-0.04749	0.088754	0.133824
-2.05368	-2.53096	-186.291	8992.438	-186.329	-2.62994	-3.34218	-1.15265	-0.39328	-0.05196	0.085592
-0.72432	-3.32412	-2.62114	-186.307	8992.425	-186.338	-2.63487	-3.3454	-1.15478	-0.39474	-0.05299
-0.28771	-1.15338	-3.3388	-2.6323	-186.316	8992.421	-186.341	-2.63727	-3.34705	-1.15595	-0.39558
-0.08112	-0.40162	-1.15275	-3.3432	-2.63693	-186.319	8992.417	-186.343	-2.63835	-3.34786	-1.15655
0.006988	-0.06251	-0.39489	-1.15408	-3.34563	-2.63903	-186.32	8992.415	-186.343	-2.63901	-3.34828
0.041033	0.074984	-0.05415	-0.39471	-1.15534	-3.34692	-2.64004	-186.321	8992.417	-186.344	-2.63927
0.050912	0.12167	0.083254	-0.05331	-0.39532	-1.15614	-3.34759	-2.64054	-186.322	8992.416	-186.344
0.050419	0.129288	0.129215	0.08436	-0.05353	-0.39581	-1.1566	-3.34798	-2.64081	-186.322	8992.416
0.045974	0.120971	0.135933	0.130379	0.084336	-0.05383	-0.39612	-1.15687	-3.34818	-2.64102	-186.322
0.040377	0.107385	0.126733	0.137063	0.13047	0.084167	-0.05404	-0.3963	-1.15702	-3.34827	-2.64099
0.034857	0.093025	0.112353	0.127786	0.13722	0.130387	0.084038	-0.05415	-0.39638	-1.15704	-3.34826
0.029875	0.079727	0.097305	0.113319	0.127981	0.137199	0.130321	0.083985	-0.05418	-0.39635	-1.15698
0.025562	0.068096	0.083425	0.098186	0.113536	0.128007	0.137185	0.130317	0.084009	-0.05411	-0.39625
0.021905	0.058194	0.071307	0.08423	0.098419	0.113604	0.128042	0.137232	0.130393	0.084129	-0.05394
0.018835	0.049881	0.061001	0.07205	0.084481	0.098528	0.113688	0.128143	0.137369	0.130583	0.084385
0.016271	0.042948	0.052358	0.061698	0.072323	0.084635	0.098668	0.113852	0.128354	0.137642	0.130942
0.014127	0.037164	0.045138	0.053003	0.061975	0.072499	0.084803	0.098865	0.114101	0.128673	0.138059
0.012414	0.032548	0.039368	0.046031	0.053619	0.062559	0.073145	0.085561	0.099779	0.11522	0.130069
0.010027	0.026225	0.031614	0.036831	0.04275	0.049721	0.058005	0.067821	0.079297	0.092336	0.106272
0.025794	0.067099	0.08032	0.092864	0.106981	0.123584	0.143408	0.16722	0.195853	0.230152	0.270811
-4331.97	98.37629	66.90444	17.12148	6.237592	2.307142	0.892717	0.348586	0.133164	0.046054	0.011236
28.97241	-4317.88	46.51925	31.41392	7.45206	2.487393	0.766061	0.190974	-0.0043	-0.06438	-0.07667