



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DINÁMICO DEL EFECTO CAUSADO POR EL
IMPACTO DE LA CAÍDA POR IMPLOSIÓN DEL EDIFICIO DEL
MAGAP SOBRE EL SUELO ADYACENTE MEDIANTE EL USO
DEL SOFTWARE DE INGENIERÍA PARA MODELACIÓN POR
ELEMENTOS FINITOS PLAXIS CON SU MÓDULO DINÁMICO**

**AUTOR:
Ripalda Zenck, Francisco José**

TRABAJO DE GRADO

**TUTOR:
Luque Rivas, Claudio Olavide**

**Guayaquil, Ecuador
2013**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Francisco José Ripalda Zenck**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Claudio Olavide Luque Rivas

REVISORES

Oswaldo Francisco Ripalda Nuques

Miguel Octavio Cabrera Santos

DIRECTORA DE LA CARRERA

Mario Dueñas Rossi

Guayaquil, a los 26 del mes de Abril del año 2013



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Francisco José Ripalda Zenck**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Análisis dinámico del efecto causado por el impacto de la caída por implosión del edificio del MAGAP sobre el suelo adyacente mediante el uso del software de ingeniería para modelación por elementos finitos PLAXIS con su módulo dinámico** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 26 del mes de Abril del año 2013

EL AUTOR:

Francisco José Ripalda Zenck



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Francisco José Ripalda Zenck**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Análisis dinámico del efecto causado por el impacto de la caída por implosión del edificio del MAGAP sobre el suelo adyacente mediante el uso del software de ingeniería para modelación por elementos finitos PLAXIS con su módulo dinámico**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 26 del mes de Abril del año 2013

EL AUTOR:

Francisco José Ripalda Zenck

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que me empujan constantemente para dar lo mejor de mí y esforzarme al máximo. Al ingeniero Claudio Luque por orientarme y brindarme su sabiduría y amabilidad cuando la necesitaba. A la ingeniera Nancy Varela por constantemente tratar de ver cómo podía mejorar mi trabajo de grado, ya sea de forma o de fondo, y siempre dándome la gentileza que le caracteriza. A mis compañeros de la carrera porque aunque a veces parecía que no lo lograríamos, siempre encontramos la manera. A mis amigos por “comprender” cuando no pude salir con ellos y por animarme a terminar mi carrera lo más pronto posible. A mis hermanos por el constante apoyo que recibí estando ellos en cualquier parte del mundo. A mis abuelos por su constante cariño y preocupación por toda actividad y situación en la que me involucro. A mi madre que me impulsó cada momento que podía a seguir avanzando en el trabajo. A mi padre por darme la inspiración para decidir no sólo el tema de trabajo de grado, sino seguir mi pasión que es la Ingeniería Civil. Y en especial a María Belén Villena, la mujer con la quiero compartir el resto de mi vida. Sin ti no hubiera podido.

FRANCISCO RIPALDA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

CLAUDIO OLAVIDE LUQUE RIVAS
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR

OSWALDO FRANCISCO RIPALDA NUQUES
PROFESOR DELEGADO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

**CLAUDIO OLAVIDE LUQUE RIVAS
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR**

INDICE GENERAL

RESUMEN (ABSTRACT)	xiv
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1. OBJETIVOS	3
1.1 Objetivos Generales	3
1.2 Objetivos Específicos.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Programa PLAXIS Version 8.6	4
2.1.1 Módulo Dinámico.....	4
2.1.2 El modelo “Hardening Soil” (Endurecimiento isotrópico)	6
2.1.2.1 Parámetros del modelo “Hardening Soil”	7
2.1.2.1.1 Parámetros generales del suelo	7
2.1.2.1.2 Parámetros de falla del modelo Mohr-Coulomb.....	7
2.1.2.1.3 Parámetros básicos de la rigidez del suelo del modelo Hardening Soil.....	8
3. HIPÓTESIS	9
4. METODOLOGÍA.....	9
4.1 Estimación de la fuerza dinámica por el impacto del edificio sobre el suelo	10
4.1.1 Geometría del edificio	10
4.1.2 Cargas existentes del edificio.....	11
4.1.3 Aceleración de caída, altura neta y velocidad final al momento del impacto	11
4.1.4 Tiempo de impacto.....	12
4.1.5 Desaceleración requerida	12
4.1.6 Fuerzas de impacto y descarga por área equivalente.....	13
4.1.7 Carga sinusoidal equivalente	14
4.1.8 Medio seno equivalente y descarga por área equivalente	14
4.1.9 Gráficas Fuerza de impacto más peso de la estructura vs. tiempo	15
4.2 Estratigrafía	16
4.2.1 Parámetros para PLAXIS	18
4.2.1.1 Peso unitario del suelo sobre el nivel freático γ_{unsat} en kN/m^3	19
4.2.1.2 Peso unitario del suelo debajo del nivel freático γ_{sat} en kN/m^3	19
4.2.1.3 Permeabilidad en dirección horizontal k_x en m/seg	19

4.2.1.4	Permeabilidad en dirección vertical k_y en m/seg	19
4.2.1.5	Cohesión c en kN/m^2	20
4.2.1.6	Ángulo interno de fricción ϕ en grados ($^\circ$)	21
4.2.1.7	Ángulo de dilatación ψ en grados ($^\circ$)	21
4.2.1.8	Rigidez secante en la prueba estándar triaxial drenado E_{50}^{ref} en kN/m^2	22
4.2.1.9	Rigidez tangente para la carga edométrica primaria $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ en kN/m^2	22
4.2.1.10	Rigidez de descarga / recarga $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ en kN/m^2	26
4.2.1.11	Potencia m (adimensional) que define la dependencia de la rigidez del nivel de esfuerzo.....	26
4.2.1.12	Amortiguamiento Rayleigh alfa y beta	27
4.3	Análisis dinámico de la implosión del edificio MAGAP mediante el software de ingeniería PLAXIS módulo dinámico	28
4.3.1	Ajustes generales.....	28
4.3.2	Modelo geométrico.....	30
4.3.3	Propiedades de los materiales	32
4.3.4	Generación de la malla	35
4.3.5	Condiciones iniciales.....	36
4.3.6	Cálculos	37
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS/RESULTADOS.....	41
5.1	Malla Deformada (Deformed Mesh).....	41
5.2	Desplazamientos Totales (Total Displacements).....	42
5.3	Velocidades Totales (Total Velocities).....	43
5.4	Aceleraciones Totales (Total Accelerations).....	44
5.5	Curva de Carga Dinámica B vs. Tiempo.....	45
5.6	Curva de Deformaciones Totales (A – G) vs. Tiempo	46
5.6.1	Curva de Deformación (A) vs. Tiempo	47
5.6.2	Curva de Deformación (B) vs. Tiempo	48
5.6.3	Curva de Deformación (C) vs. Tiempo.....	49
5.6.4	Curva de Deformación (D) vs. Tiempo	50
5.6.5	Curva de Deformación (E) vs. Tiempo	51
5.6.6	Curva de Deformación (F) vs. Tiempo	52
5.6.7	Curva de Deformación (G) vs. Tiempo.....	53
5.7	Curva de Velocidades Totales (A – G) vs. Tiempo.....	54
5.7.1	Curva de Velocidad (A) vs. Tiempo.....	55
5.7.2	Curva de Velocidad (B) vs. Tiempo.....	56
5.7.3	Curva de Velocidad (C) vs. Tiempo.....	57

5.7.4	Curva de Velocidad (D) vs. Tiempo.....	58
5.7.5	Curva de Velocidad (E) vs. Tiempo.....	59
5.7.6	Curva de Velocidad (F) vs. Tiempo.....	60
5.7.7	Curva de Velocidad (G) vs. Tiempo.....	61
5.8	Curva de Aceleraciones Totales (A – G) vs. Tiempo.....	62
5.8.1	Curva de Aceleración (A) vs. Tiempo.....	63
5.8.2	Curva de Aceleración (B) vs. Tiempo.....	64
5.8.3	Curva de Aceleración (C) vs. Tiempo.....	65
5.8.4	Curva de Aceleración (D) vs. Tiempo.....	66
5.8.5	Curva de Aceleración (E) vs. Tiempo.....	67
5.8.6	Curva de Aceleración (F) vs. Tiempo.....	68
5.8.7	Curva de Aceleración (G) vs. Tiempo.....	69
5.9	Puntos Adicionales (H – I – J).....	69
5.9.1	Curva de Deformaciones Totales (H – I – J) vs. Tiempo.....	70
5.9.2	Curva de Velocidades Totales (HIJ) vs. Tiempo.....	71
5.9.3	Curva de Aceleraciones Totales (HIJ) vs. Tiempo.....	72
5.10	Cálculo de Distorsión Angular.....	73
5.10.1	Distorsión entre el punto A y B.....	75
5.10.2	Distorsión entre el punto B y H.....	75
5.10.3	Distorsión entre el punto H e I.....	76
5.10.4	Distorsión entre el punto I y J.....	77
5.10.5	Distorsión entre el punto J y C.....	77
5.10.6	Distorsión entre el punto C y D.....	78
5.10.7	Distorsión entre el punto D y E.....	79
5.10.8	Distorsión entre el punto E y F.....	79
5.10.9	Distorsión entre el punto F y G.....	80
5.11	Velocidad Pico de Partícula (Peak Particle Velocity).....	81
	CONCLUSIONES.....	82
	RECOMENDACIONES.....	84
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXOS.....	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Propiedades de los materiales del subsuelo	33
Tabla 4.2 Propiedades de los materiales del subsuelo “con pilotes”	34
Tabla 4.3 Propiedades del material de las losas del edificio	35

INDICE DE GRAFICOS

Figura 2.1 Relación hiperbólica esfuerzo-deformación en la carga primaria para la prueba estándar de triaxial drenado	7
Figura 4.1 Modelo tridimensional del edificio del MAGAP	10
Figura 4.2 Descarga por impacto de la caída del edificio sobre la losa inferior del sótano (incluye el peso de la estructura).....	15
Figura 4.3 Descarga por impacto de la caída del edificio sobre la losa inferior del sótano (incluye el peso de la estructura).....	17
Figura 4.4 Vista en Google Earth del edificio MAGAP con la ubicación de la perforación realizada en el año 1999 y las calles aledañas.....	18
Figura 4.5 Permeabilidad del suelo vs. Relación de vacíos	20
Figura 4.6 Relación entre Índice de Plasticidad IP (%) vs. Ángulo de Fricción ϕ' (grados).....	21
Figura 4.7 OCR vs. S_u para diferentes suelos.....	23
Figura 4.8 OCR vs. E_u / S_u	24
Figura 4.9 Relación entre el módulo cortante y el nivel de deformaciones para diferentes IP (%)	25
Figura 4.10 Definición del E_{oed}^{ref} de los resultados de una prueba del edómetro.....	26
Figura 4.11 Ajustes generales del proyecto	29
Figura 4.12 Ajustes generales (Dimensiones).....	30
Figura 4.13 Geometría del modelo.....	31
Figura 4.14 Malla del modelo	36
Figura 4.15 Primera fase del cálculo.....	37
Figura 4.16 Segunda fase del cálculo	38
Figura 4.17 Tercera fase del cálculo (Carga dinámica armónica)	39
Figura 4.18 Selección de puntos de cálculo (A – G)	40
Figura 5.1 Malla deformada al final del cálculo	41
Figura 5.2 Desplazamientos totales al final del cálculo	42
Figura 5.3 Velocidades totales al final del cálculo	43
Figura 5.4 Aceleraciones totales al final del cálculo.....	44
Figura 5.5 Carga dinámica vs. Tiempo	45
Figura 5.6 Curva de deformaciones totales (A – G) vs. Tiempo.....	46
Figura 5.7 Curva de deformaciones totales (A) vs. Tiempo	47
Figura 5.8 Curva de deformación total (B) vs. Tiempo.....	48
Figura 5.9 Curva de deformación total (C) vs. Tiempo.....	49
Figura 5.10 Curva de deformación total (D) vs. Tiempo.....	50
Figura 5.11 Curva de deformación total (E) vs. Tiempo	51
Figura 5.12 Curva de deformación total (F) vs. Tiempo	52
Figura 5.13 Curva de deformación total (G) vs. Tiempo	53
Figura 5.14 Curva de velocidades totales (A – G) vs. Tiempo	54
Figura 5.15 Curva de velocidad total (A) vs. Tiempo	55
Figura 5.16 Curva de velocidad total (B) vs. Tiempo	56
Figura 5.17 Curva de velocidad total (C) vs. Tiempo	57
Figura 5.18 Curva de velocidad total (D) vs. Tiempo	58
Figura 5.19 Curva de velocidad total (E) vs. Tiempo	59
Figura 5.20 Curva de velocidad total (F) vs. Tiempo.....	60
Figura 5.21 Curva de velocidad total (G) vs. Tiempo	61
Figura 5.22 Curva de aceleraciones totales (A – G) vs. Tiempo.....	62

Figura 5.23 Curva de aceleración total (A) vs. Tiempo	63
Figura 5.24 Curva de aceleración total (B) vs. Tiempo	64
Figura 5.25 Curva de aceleración total (C) vs. Tiempo	65
Figura 5.26 Curva de aceleración total (D) vs. Tiempo	66
Figura 5.27 Curva de aceleración total (E) vs. Tiempo	67
Figura 5.28 Curva de aceleración total (F) vs. Tiempo	68
Figura 5.29 Curva de aceleración total (G) vs. Tiempo	69
Figura 5.30 Curva de deformaciones totales (H – I – J) vs. Tiempo	70
Figura 5.31 Curva de velocidades totales (H – I – J) vs. Tiempo	71
Figura 5.32 Curva de aceleraciones totales (H – J) vs. Tiempo	72
Figura 5.33 Tipos de asentamiento	73
Figura 5.34 Límites de distorsión angular	74
Figura 7.1 Protección contra caída de rocas	86

RESUMEN (ABSTRACT)

El tema se “Análisis dinámico del efecto causado por el impacto de la caída por implosión del edificio del MAGAP sobre el suelo adyacente mediante el uso del software de ingeniería para modelación por elementos finitos PLAXIS con su módulo dinámico” tiene una importancia particular, ya que trata de dar herramientas adicionales para la toma de decisión en el proceso de demolición por implosión del edificio MAGAP en Guayaquil. El objetivo es determinar con aproximación la fuerza del impacto producto de la implosión para poder observar luego de un análisis en un software especializado el nivel de deformaciones que tendrá el suelo alrededor del edificio. Se utilizó el método de “elementos finitos” que permite estimar el comportamiento del suelo “continuo”, a través de su división en pequeños elementos (polígonos de 3 y 4 lados), permitiendo el análisis al ser sometido a cargas, deformaciones, cambios en la malla, entre otras. Se utilizó el programa PLAXIS Version 8, porque posee un módulo dinámico que permite el análisis de cargas de impacto como la que se estima ocurrirá por el proceso de implosión del edificio, esperando lograrse unos resultados bastante cercanos a la realidad en lo que se refiere a estimación de deformaciones, velocidades y aceleraciones en el suelo producto de la implosión del edificio del MAGAP. Al final del trabajo se concluye que si no se toman medidas que provoquen un amortiguamiento importante de la carga de impacto, ocurrirán importantes asentamientos en los primeros 20 metros desde el eje del edificio, así como también importantes distorsiones angulares en los 5 metros adyacentes al borde del edificio, que podrían ocasionar daños en las estructuras existentes en estas zonas.

Palabras Claves: implosión, edificio, MAGAP, elementos finitos, PLAXIS, dinámico

INTRODUCCIÓN

El edificio del MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca), ubicado en la Avenida Quito, entre Padre Solano y Alejo Lascano, situado en el centro de la ciudad de Guayaquil – Ecuador, presentaba una serie de daños arquitectónicos y estructurales por lo que luego de un estudio se recomendó su demolición utilizando el proceso de implosión (explosión hacia el interior). Éste método nunca ha sido usado en nuestro país por lo que no existen registros ni experiencias anteriores para basarse. Han existido varias opiniones a favor y en contra de este proceso de demolición debido a que se presume afectaría al suelo de manera considerable y por ende a las estructuras aledañas por lo que el presente trabajo trata de ser un aporte más para la más adecuada toma de decisiones.

El presente trabajo tiene como alcance definir las fuerzas de impacto para estimar la respuesta dinámica del suelo en los alrededores del edificio y así poder evaluar los posibles efectos del proceso de demolición en las estructuras adyacentes al edificio. También evaluar si las deformaciones permanentes o transitorias (vibraciones) que se produzcan en el suelo por efecto de la implosión del edificio llegan a niveles máximos permisibles, los cuales están estipulados en varias normas internacionales y en la literatura.

Este trabajo de grado contiene un marco teórico que explica simplícidamente las características del programa PLAXIS. Luego se hace una explicación de la metodología que se llevó a cabo para la realización del análisis dinámico; desde el cálculo de las fuerzas dinámicas hasta los pasos que se siguió para la utilización del programa. Finalmente se muestran los resultados del análisis, sus conclusiones y recomendaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siendo ésta la primera vez que se haría una implosión de un edificio en el Ecuador, más aún de un edificio alto de 25 pisos, vale la pena preguntarse si es ésta la solución óptima o viable. La ciudad de Guayaquil tiene en su mayor parte suelo blando, el cual si fuera inducido a éste tipo de cargas dinámicas, podría ocasionar daños materiales de gran magnitud, ya que existe la posibilidad de que las ondas provocadas por la implosión hagan que el suelo entre en resonancia, lo cual amplificaría las deformaciones en el suelo. En la cercanía del edificio se encuentran estructuras como una gasolinera y varias edificaciones de 2 o más niveles, algunas de ellas construidas hace muchos años, cuyo nivel de estabilidad estructural se desconoce, así como también acueductos y tuberías de utilidades en el subsuelo. Existen en los códigos de ingeniería o códigos propios de cada país y hasta de ciudades, valores de velocidad de onda máximos permisibles para diferentes frecuencias, diferentes suelos y diferentes estructuras. A pesar de que el edificio se encuentra en mal estado, se ha hablado de recuperar el edificio estructuralmente, es decir, reforzarlo, la cual podría ser una alternativa a la de su demolición por implosión, aunque su evaluación no es parte del presente trabajo.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivos Generales

- Obtener los parámetros específicos que requiere el programa PLAXIS para que el análisis sea lo más cercano a la realidad.
- Determinar el nivel de deformación en el suelo por causa de la implosión del edificio MAGAP para varias distancias y profundidades.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar el tipo de modelo para realizar el análisis.
- Determinar el tiempo de caída del edificio durante la implosión.
- Determinar la carga dinámica que impactará contra el suelo debido a la caída del edificio.
- Determinar cuánto se asentará el suelo por el impacto a varias distancias del edificio.
- Determinar si por los niveles de deformaciones habrá algún daño arquitectónico, estructural o funcional en las estructuras adyacentes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Programa PLAXIS Version 8.6

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, adquirió el programa PLAXIS Version 8.6, con el cual se realizó el presente trabajo. Del “Manual de Información General de PLAXIS Version 8” (*Plaxis Version 8 General Info Manual*) (2007) traducido al español, se sabe que el programa PLAXIS Version 8 es un programa de elementos finitos destinado al análisis bidimensional de deformaciones y estabilidades en ingeniería geotécnica. Las aplicaciones geotécnicas requieren modelos avanzados para la simulación del comportamiento no-lineal, tiempo-dependiente y anisotrópico de los suelos y/o rocas. Además, ya que el suelo es un material de múltiples fases, se requieren procedimientos especiales para tratar con las presiones de poro hidrostáticas y no hidrostáticas en el suelo. Si bien, el modelado del propio suelo es un problema importante, muchos proyectos de túneles implican el modelado de estructuras y la interacción entre las estructuras y el suelo. PLAXIS está equipado con características para tratar con los diversos aspectos de las estructuras geotécnicas complejas.

2.1.1 Módulo Dinámico

El suelo y las estructuras son a menudo sometidos no sólo a cargas estáticas debido a las construcciones en y sobre la superficie del suelo, sino también a cargas dinámicas. Si las cargas son poderosas, como en los sismos, éstos podrían causar daños graves. Con el módulo de PLAXIS dinámico se pueden analizar los efectos de las vibraciones en el suelo.

Las vibraciones pueden ocurrir ya sea de manera artificial o natural. En áreas urbanas, las vibraciones pueden ser generadas debido a la hincada de

pilotes, el movimiento de vehículos, maquinaria pesada y/o el paso de un tren. Una fuente natural de vibraciones en el subsuelo son los sismos.

Los efectos de las vibraciones deben ser calculadas con un análisis dinámico cuando la frecuencia de la carga dinámica es del orden de o superior a la frecuencia natural del medio. Las vibraciones de baja frecuencia pueden ser calculadas con un análisis pseudo-estático.

Al modelar una respuesta dinámica de una estructura de suelo, la inercia del subsuelo y la dependencia del tiempo de la carga son consideradas. Además, la amortiguación debido al material y/o de la geometría se tiene en cuenta. Inicialmente, el modelo lineal-elástico puede ser utilizado para la simulación de los efectos dinámicos, pero, en principio, cualquiera de los modelos de suelo disponibles en PLAXIS se puede utilizar.

El exceso de presión de poros puede ser incluido en el análisis si se asume un comportamiento del suelo no drenado. La licuefacción, sin embargo, no está incluida en la Versión 8, aunque como generalmente se encuentra relacionada con un número elevado de ciclos de cargas y descargas, que no se espera ocurra en la implosión, no limita la validez de los resultados.

Por la forma cilíndrica del edificio, y como las vibraciones suelen tener características tridimensionales de propagación, se optó por modelar el problema utilizando la condición axisimétrica del programa y no la bidimensional de condición de deformación plana. La ventaja de la utilización del método axisimétrico, es que permite un análisis 3-D, incluyendo la amortiguación geométrica en el análisis, que para estos casos es de mayor importancia que la amortiguación viscosa propia del suelo.

2.1.2 El modelo “Hardening Soil” (Endurecimiento isotrópico)

Tomado del “Manual de Dinámica de PLAXIS Version 8” (*Plaxis Version 8 Dynamics Manual*) (2007) y traducido al español, “*el modelo “Hardening Soil” es un modelo avanzado para simular el comportamiento de los diferentes tipos de suelo, tanto en suelos blandos como en suelos duros*”, según Schanz (1998). Al ser sometido a una carga desviadora primaria, el suelo muestra una disminución de su rigidez y simultáneamente desarrolla deformaciones plásticas irreversibles. En el caso particular de una prueba triaxial drenada, la relación observada entre la deformación axial y el esfuerzo desviador puede ser bien aproximada por una hipérbola. Este tipo de relación se formuló por primera vez por Kondner (1963) y utilizado más adelante en el muy conocido modelo hiperbólico (Duncan y Chang, 1970) El modelo “Hardening Soil”, sin embargo, sobrepasa al modelo hiperbólico por mucho. En primer lugar mediante el uso de la teoría de la plasticidad en lugar de la teoría de la elasticidad. En segundo lugar mediante la inclusión de la dilatación del suelo y en tercer lugar, al introducir un límite de rendimiento.

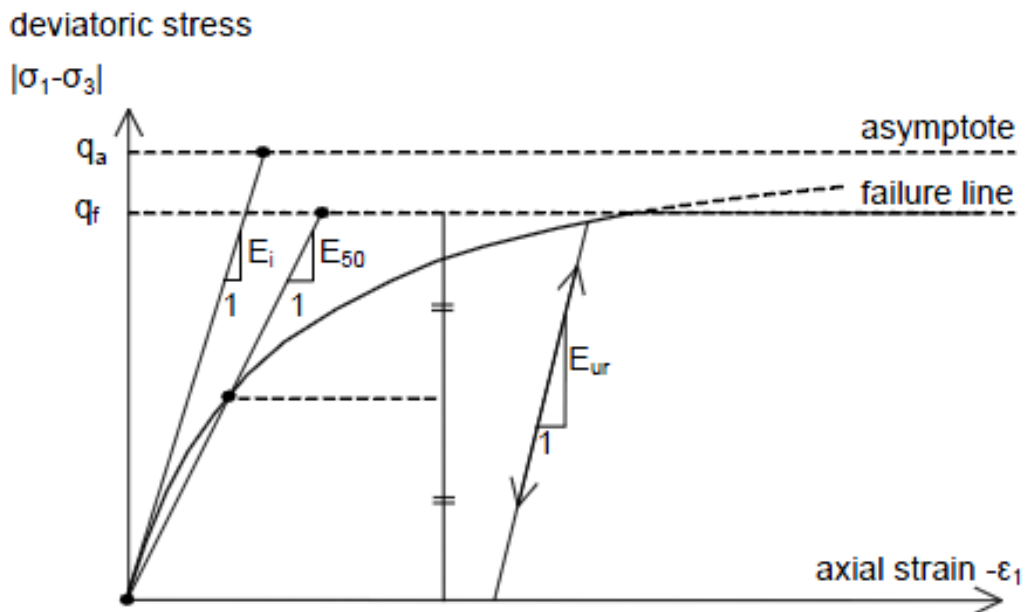


Figura 2.1 Relación hiperbólica esfuerzo-deformación en la carga primaria para la prueba estándar de triaxial drenado

2.1.2.1 Parámetros del modelo “Hardening Soil”

2.1.2.1.1 Parámetros generales del suelo

γ_{unsat}	: Peso unitario del suelo sobre el nivel freático	(kN/m ³)
γ_{sat}	: Peso unitario del suelo debajo del nivel freático	(kN/m ³)
k_x	: Permeabilidad en dirección horizontal	(m/día)
k_y	: Permeabilidad en dirección vertical	(m/día)

2.1.2.1.2 Parámetros de falla del modelo Mohr-Coulomb

c	: Cohesión (efectiva)	(kN/m ²)
φ	: Ángulo interno de fricción (efectiva)	(°)
ψ	: Ángulo de dilatación	(°)

2.1.2.1.3 Parámetros básicos de la rigidez del suelo del modelo Hardening Soil

- E_{50}^{ref} : Rigidez secante en la prueba estándar triaxial drenado (kN/m²)
- E_{oed}^{ref} : Rigidez tangente para la carga odométrica primaria (kN/m²)
- E_{ur}^{ref} : Rigidez de descarga / recarga (kN/m²)
- m : Potencia para la dependencia a nivel de estrés de la rigidez (-)

3. HIPÓTESIS

El programa PLAXIS será capaz de modelar con precisión la caída por implosión del edificio MAGAP y se observará que las ondas vibratorias se atenúan debido a la geometría del análisis. Los niveles de deformación podrían superar los valores máximos permisibles establecidos en la literatura.

4. METODOLOGÍA

Se realizará un modelo del proceso de implosión del edificio para estimar las deformaciones dinámicas del suelo en los alrededores del edificio utilizando el software de modelación por elementos finitos Plaxis con su módulo dinámico desarrollado en la Universidad de Delft (Holanda). Considerando que el edificio es circular en su torre, el análisis dinámico se lo realizará mediante el método axisimétrico que permite un análisis tridimensional en estos casos.

Para esto, se estimarán las fuerzas dinámicas que impacten en el suelo durante la implosión. Para la estimación de la fuerza dinámica se asumirá que los escombros de demolición de los pisos más bajos provocarán una desaceleración en la caída de los escombros de los pisos superiores durante el impacto. Los parámetros dinámicos del suelo que se requieren para la ejecución del análisis en el programa, se estimaron en base a los resultados de un sondeo existente en la esquina suroeste del edificio facilitado por la consultora Nylic. Los parámetros requeridos por el programa para el análisis dinámico, son diferentes a los parámetros normalmente utilizados para los análisis estáticos, y para su estimación se utilizaron ecuaciones empíricas existentes en la literatura.

4.1 Estimación de la fuerza dinámica por el impacto del edificio sobre el suelo

4.1.1 Geometría del edificio

Se determinó en primer lugar la geometría del edificio. A pesar de que se trató de contactar a la consultora encargada de los estudios para la evaluación del edificio, no se pudieron conseguir los planos del edificio MAGAP, en parte también debido a su antigüedad, pero se encontró una noticia en la página digital del periódico EL UNIVERSO que data del 16 de Junio del 2011 donde menciona que el edificio tiene 25 pisos con una altura de más de 92 metros. En promedio cada piso tiene 3.5 metros de altura si se mide sólo la altura total de pisos. El área de la mezzanine es de 58 x 32 metros cuadrados mientras que el radio de la torre circular es de 25 metros. El edificio tiene un sótano de 5 metros de profundidad (un sótano y medio), el cual usarían como recipiente para que ahí caigan los escombros.

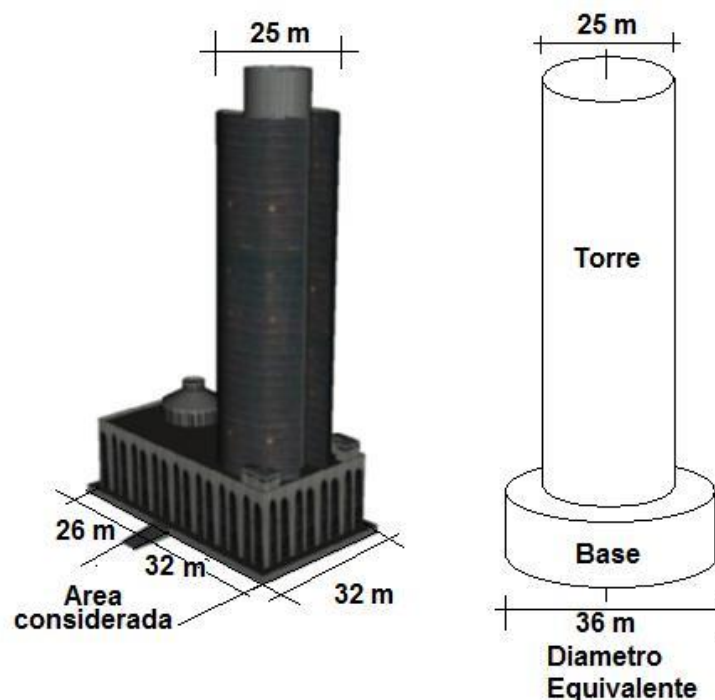


Figura 4.1 Modelo tridimensional del edificio del MAGAP

La base del edificio se modela como el círculo de área equivalente al cuadrado de 32 x 32 mts, que se asume produce el principal aporte a la carga dinámica de impacto en la zona baja del edificio, despreciándose el efecto de la zona alejada de 26 x 32 mts.

4.1.2 Cargas existentes del edificio

Se asume una carga muerta (w_{DL}) para cada piso de 0.6 Ton/m², la cual al multiplicarse por sus respectivas áreas se obtiene el peso de cada piso. Debido a que el edificio no es uniforme, como se indicó en el inciso anterior, en la base, se toma únicamente el área del cuadrado de 32 x 32 metros bajo la torre, despreciando el efecto del área de la base más alejada. Esta área del cuadrado (área equivalente de la mezzanine) se la reemplaza por la de un círculo equivalente de 36 metros de diámetro, para poder realizar el modelo axisimétrico. Luego se multiplicará este área equivalente de la mezzanine en los primeros cinco pisos (dos sótanos y tres pisos) por la carga muerta. En el resto de pisos el área será la de la torre circular. La sumatoria de todos los pesos de los pisos da como resultado el peso total del edificio (ΣW_{piso}), el cual es igual a 93701 kilonewtons.

4.1.3 Aceleración de caída, altura neta y velocidad final al momento del impacto

La altura neta (H_{neta}) será la resta entre la altura del entrepiso (H) y los escombros por cada piso, el cual se asumió que sería 0.4 metros. Se asumirá que la aceleración con la que caen los pisos del edificio es del 100% de la gravedad (caída libre). La velocidad final al momento del impacto (v_{final}) está en función de la aceleración asumida (a) y de la altura neta de cada piso (H_{neta}). La ecuación de la velocidad final es la siguiente:

$$v_{final} = \sqrt{2 * a * H_{neta}}$$

4.1.4 Tiempo de impacto

El tiempo de caída (Δt_{caida}) está en función de la velocidad final (v_{final}) al momento del impacto y de la altura neta de cada piso (H_{neta}). Se asume un tiempo de retraso ($\Delta t_{retraso}$) para que caiga cada piso de 0.05 segundos entre cada uno, es decir, todos los pisos no inician su caída al mismo tiempo sino que hay un retardo en iniciar su caída producto de la detonación progresiva en el método de implosión. Así, se obtiene mediante la suma de éstos dos tiempos, el tiempo de inicio del impacto ($t_{inic\ impact}$) de cada suelo contra el piso del sótano.

$$\Delta t_{caida} = \frac{2 * H_{neta}}{v_{final}}$$

$$t_{inic\ impact} = \Delta t_{caida} + \Delta t_{retraso}$$

4.1.5 Desaceleración requerida

En primer lugar se asume una distancia de desaceleración (Δh) en la que los elementos del edificio se detendrán con velocidad cero. Para el primer piso se considera que la distancia en la que se desaceleran hasta detenerse los elementos del edificio, es de 0.35 metros (Δh_1). Con la distancia de desaceleración asumida se calculó el tiempo de desaceleración ($\Delta t_{desacelerac}$) hasta llegar al reposo (velocidad final (v_{final}) = 0). Se suma éste último tiempo al tiempo de inicio del impacto ($t_{inic\ impact}$) para sacar el tiempo final del impacto ($t_{fin\ impact}$). El tiempo final de impacto del último piso así estimado fue de cerca de cinco (5) segundos (desde que el edificio empezó a caer), el

cual coincide con los tiempos observados en los videos que existen en el Internet para edificios de hormigón de similar altura, demolidos por implosión. Finalmente se divide la velocidad final para el tiempo de desaceleración para obtener la desaceleración producida (-a).

$$\Delta h = \Delta h_1 * \sqrt{n}$$

Donde n es el número del piso correspondiente.

$$\Delta t_{desacelerac} = \frac{2 * \Delta h}{v_{final}}$$

$$t_{fin\ impact} = t_{inic\ impact} + \Delta t_{desacelerac}$$

$$-a = \frac{v_{final}}{\Delta t_{desacelerac}}$$

4.1.6 Fuerzas de impacto y descarga por área equivalente

Se puede determinar la fuerza de impacto ($F(t)$) de cada piso multiplicando la desaceleración por el peso de cada piso (-a) y dividiéndolo para la gravedad (g). Si a éste valor se le suma la sumatoria del peso de los pisos inferiores (ΣW_{piso}) se puede obtener la fuerza total ($R(t)$). Como el programa PLAXIS, requiere la carga de impacto por unidad de área, a estos dos valores de fuerzas se les divide el área equivalente ($A_{equivalente}$) para obtener la descarga total (Q).

$$F(t) = \frac{W_{piso} * (-a)}{g}$$

$$Q = \frac{F(t)}{A_{equivalente}}$$

La forma de la curva, con un pico en la caída de los pisos de la base, se debe a que el área de contacto con el suelo, a través de la cual se transmite el impacto de la implosión, para todos los pisos se considera la de la base (1024 m^2), entonces, como los pisos de la base pesan más que los de la torre, porque tienen mayor área (36 mts de diámetro en la base contra 25 mts de diámetro en la torre), la descarga será mayor en la caída de los pisos inferiores que en los de la torre.

4.1.7 Carga sinusoidal equivalente

Se calcula la carga sinusoidal equivalente (F_{se}) para todos los pisos. Se asume primeramente un periodo (T), el cual se tendrá que tantear una vez obtenido el medio seno equivalente más adelante para que coincidan la curva fuerza de impacto vs. tiempo y el medio seno equivalente vs. tiempo. Se calcula la relación inversa del periodo para obtener la frecuencia (f). Ésta frecuencia es la que se deberá introducir en el programa PLAXIS para la carga dinámica junto con la fuerza final de impacto. Al final se multiplica la frecuencia por 2π para obtener la frecuencia angular (ω).

4.1.8 Medio seno equivalente y descarga por área equivalente

Obtenidas ya las fuerzas de impacto se procede a calcular la descarga total (Q_{se}), dividiendo la fuerza de impacto ($F(t)$) para el área de la base. Luego, para obtener el ángulo necesario en radianes para cada piso, se multiplica la frecuencia angular (ω) obtenida anteriormente por el tiempo final de impacto ($t_{fin \text{ impact}}$). Éste valor se lo puede transformar en grados para saber en qué posición de la función seno empieza la carga. Esto es importante ya que se requiere introducir este valor en PLAXIS. Finalmente se calcula el medio seno equivalente con la siguiente fórmula:

$$F_{se} = F(t) * \text{Seno}(\omega t + \phi_0)$$

Donde $F(t)$ es la fuerza de impacto, ωt es el ángulo en radianes y ϕ_0 el ángulo inicial que para todos los pisos se asume como nulo. La descarga de medio seno equivalente, no considera el pico inicial de la curva, aunque trata de ser un valor medio del impacto (igual áreas bajo ambas curvas).

4.1.9 Gráficas Fuerza de impacto más peso de la estructura vs. tiempo

A continuación se grafica la fuerza de impacto ($F(t)$) de cada piso contra el tiempo en el que éste termina de impactar contra el suelo ($t_{fin\ impact}$). Luego se grafica el medio seno equivalente (F_{se}) contra el tiempo final de impacto. Aquí se empieza a manipular la variable frecuencia (f) para que visualmente sean lo más parecidas posible las curvas de fuerza de impacto y el medio seno equivalente. Se utilizó la curva que incluye el peso de la estructura.

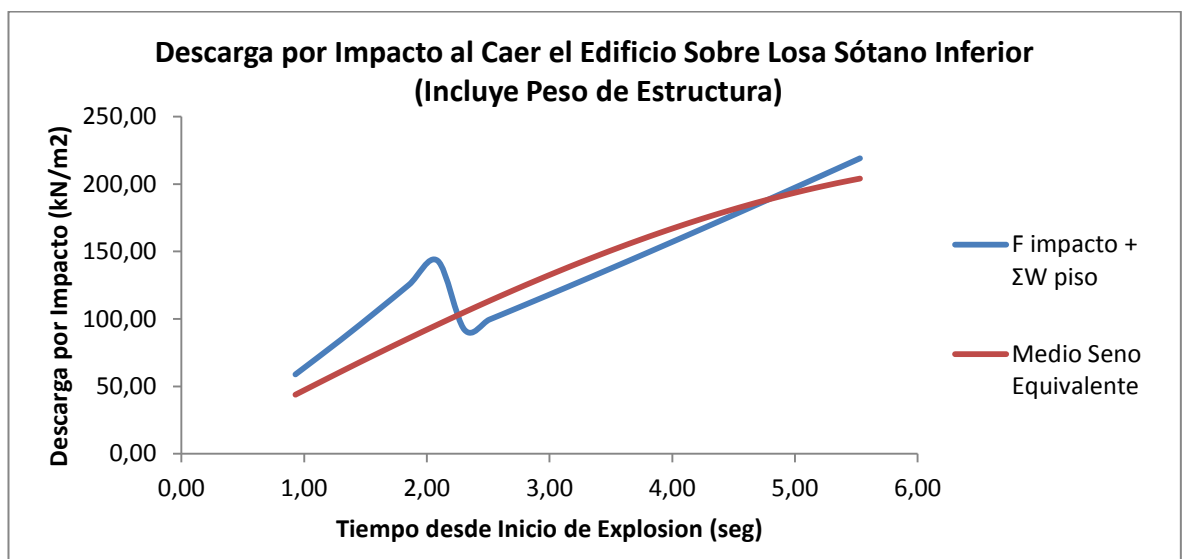


Figura 4.2 Descarga por impacto de la caída del edificio sobre la losa inferior del sótano (incluye el peso de la estructura)

4.2 Estratigrafía

La estratigrafía del suelo que se encuentra debajo del edificio se la determinará en base a los resultados de un sondeo existente en la esquina suroeste del edificio facilitada por la consultora Nylic.

PERFORACION ESQUINA SUROESTE (AV. QUITO Y ALEJO LASCANO) EDIFICIO MAGAP

Subcapa No.	Profundidad subcapa (m)		H m	SUCS	Tipo de suelo	ω %	IP %	G _s	e	S _u T/m ²	OCR	V _t T/m ³	N _{1,60} N/m ²	c kN/m ²	φ'	K ₀	K _z	σ' _{vo} T/m ²	σ' _m T/m ²	G _{max} T/m ²	ρ Tseg ² /m ⁴	V _s m/seg	T _r seg	Relleno
	superior	inferior																						
1	0	1,4	0,70	1,4	Grav	25	0	2,65	0,66	-	-	1,80	20	1	31	0,48	46	1,3	0,83	2929	0,18	126	0,04	
2	1,4	3	2,20	1,6	CH	73	44	2,70	1,97	3,8	5,00	1,54	-	5	27	0,55	-	2,8	1,92	4461	0,16	169	0,04	
3	3	15,5	9,25	12,5	CH	78	63	2,70	2,11	3,0	1,46	1,53	-	4	24	0,59	-	6,5	4,73	7007	0,16	212	0,24	CH
4	15,5	18,5	17,00	3,0	CH	54	45	2,70	1,46	3,2	1,28	1,58	-	4	27	0,55	-	10,7	7,45	8787	0,16	234	0,05	
5	18,5	20,5	19,50	2,0	CH	88	50	2,70	2,38	3,6	1,00	1,43	-	5	26	0,56	-	12,0	8,48	9376	0,15	254	0,03	
6	20,5	22,5	21,50	2,0	ML	45	11	2,65	1,19	-	-	1,55	5	2	28	0,53	34	13,0	8,90	7101	0,16	212	0,04	ML
7	22,5	28,1	25,30	5,6	CH - MH	84	51	2,70	2,27	5,0	1,15	1,50	-	8	26	0,56	-	14,9	10,55	7731	0,15	225	0,10	CH - MH
8	28,1	29,1	28,60	1,0	Pt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0	0,00	-	-	-
9	29,1	30,1	29,60	1,0	CH	70	44	2,70	1,89	4,6	1,00	1,50	-	7	27	0,55	-	15,6	10,85	7840	0,15	226	0,02	
10	30,1	34,5	32,30	4,4	CH	46	41	2,70	1,24	5,8	1,14	1,76	-	8	28	0,53	-	17,5	12,01	8248	0,18	214	0,08	CH - CL
11	34,5	43,5	39,00	9,0	CH - CL	41	28	2,70	1,11	9,5	2,00	1,82	-	10	30	0,50	-	22,8	15,23	9288	0,19	224	0,16	
12	43,5	46	44,75	2,5	CL	36	25	2,70	0,97	11,8	2,40	1,87	-	10	30	0,50	-	27,6	18,41	10213	0,19	231	0,04	

H = Espesor de la capa

G_s = Gravedad específica

e = Relación de vacíos

OCR = Razón de Sobreconsolidación

N_{1,60} = N corregido (valores de N mayores a 80 son extrapolados)

K₀ = Coeficiente de Presión de tierra en reposo

K_z = Muestra la influencia de "n" y la amplitud de la deformación λ

σ'_m = (σ'_{vo} + 2 K₀ σ'_{vo}) / 3

G_{max} = Módulo Máximo Dinámico de Corte

ρ = Densidad del suelo = V_t / g

V_s = Velocidad de la Onda de Corte = (G_{max} / ρ)^{1/2}

T_r = Periodo del suelo = 4H / V_s

λ* = Índice de Compresión modificada = 100% / 500

E_{oed}^{ref} = Rigidez Tangente para Carga Edométrica Primaria = p_{ref} / λ*

E₅₀^{ref} = Rigidez Secante en la Prueba Estándar de Triaxial Drenada = E_{oed}^{ref}

E_{ur}^{ref} = Rigidez Descarga / Recarga = 3 * E₅₀^{ref}

Figura 4.3 Descarga por impacto de la caída del edificio sobre la losa inferior del sótano (incluye el peso de la estructura)

Con estos datos se procedió a unificar ciertos estratos que tienen similares valores para con esto aliviar la cantidad de datos que deberá procesar el programa y se obtengan resultados de forma más rápida, sin perder precisión. Algunos parámetros requeridos por el programa para el análisis dinámico, son diferentes a los parámetros normalmente utilizados para los análisis estáticos, y para su estimación se utilizarán ecuaciones empíricas existentes en la literatura.



Figura 4.4 Vista en Google Earth del edificio MAGAP con la ubicación de la perforación realizada en el año 1999 y las calles aledañas.

4.2.1 Parámetros para PLAXIS

Una vez que se unifique los estratos correspondientes se procede a determinar los parámetros necesarios para el análisis dinámico que se llevará a cabo, los cuales se detallan a continuación.

4.2.1.1 Peso unitario del suelo sobre el nivel freático γ_{unsat} en kN/m^3

Éste parámetro se lo obtiene del sondeo. Es el peso por unidad de volumen que tiene el suelo cuando éste no está saturado.

4.2.1.2 Peso unitario del suelo debajo del nivel freático γ_{sat} en kN/m^3

Éste parámetro se lo obtiene del sondeo. Es el peso por unidad de volumen que tiene el suelo cuando éste sí está saturado, esto es, sobre el nivel freático.

4.2.1.3 Permeabilidad en dirección horizontal k_x en m/seg

Es la distancia en que el agua penetra en dirección horizontal dentro del suelo en un tiempo determinado. De la figura 19.5 del libro “Mecánica de Suelos” (*Soil Mechanics*) (1969) se obtuvieron los valores de permeabilidad para cada tipo de suelo.

4.2.1.4 Permeabilidad en dirección vertical k_y en m/seg

Es la distancia en que el agua penetra en dirección vertical dentro del suelo en un tiempo determinado. De la figura 19.5 del libro “Mecánica de Suelos” (*Soil Mechanics*) (1969) se obtuvieron los valores de permeabilidad para cada tipo de suelo.

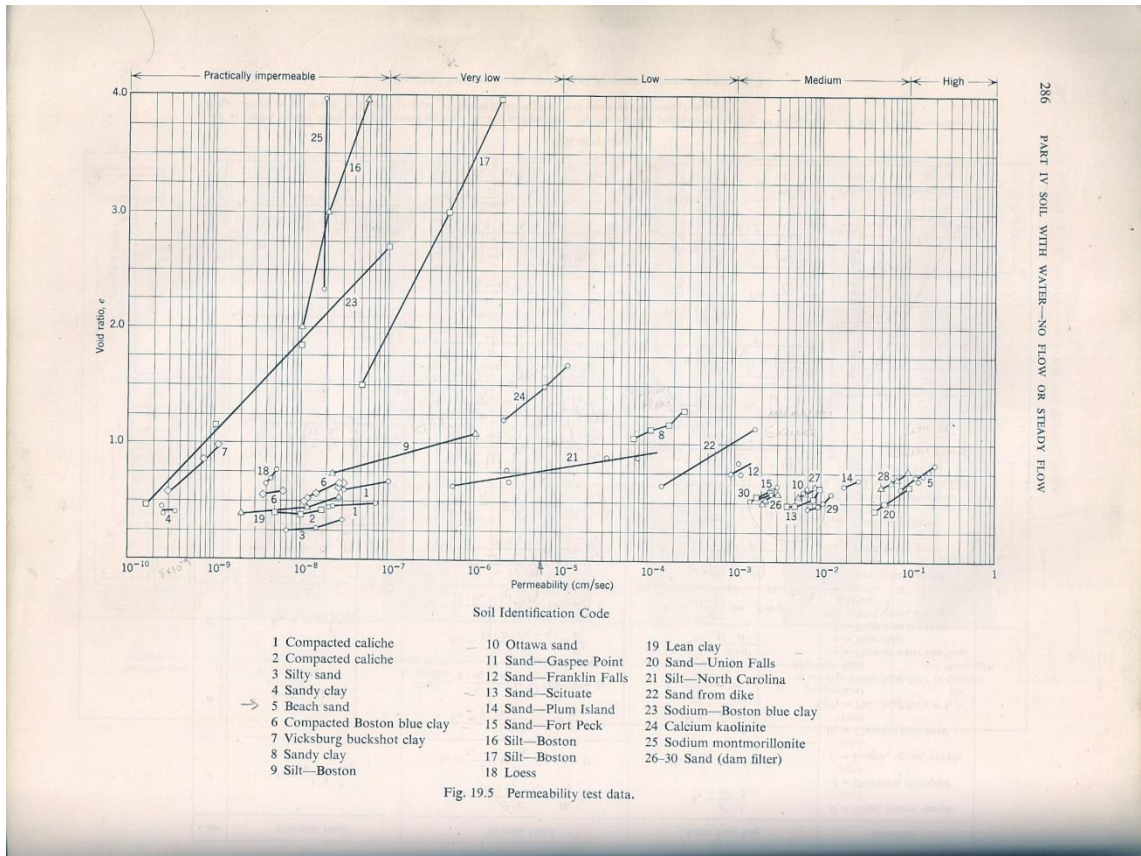


Figura 4.5 Permeabilidad del suelo vs. Relación de vacíos

4.2.1.5 Cohesión c en kN/m^2

Éste parámetro se lo obtiene del sondeo. La cohesión tiene las dimensiones de esfuerzo. PLAXIS puede manejar arenas sin cohesión ($c = 0$), pero algunas opciones no funcionarán bien. Para evitar complicaciones, se aconseja a los usuarios introducir por lo menos un valor pequeño (usar $c > 0.2 \text{ kN/m}^2$).

4.2.1.6 Ángulo interno de fricción ϕ en grados ($^{\circ}$)

Éste parámetro se lo obtiene del sondeo. El ángulo de fricción se lo introduce con la unidad de grados. Altos ángulos de fricción, obtenidos algunas veces en arenas densas, incrementarán más o menos exponencialmente el tiempo de computación. De la figura 19.7 del libro “Mecánica de Suelos en la Práctica Ingenieril” (*Soil Mechanics in Engineering Practice*) (1996) se obtuvieron los valores de ángulo de fricción para los suelos cohesivos.

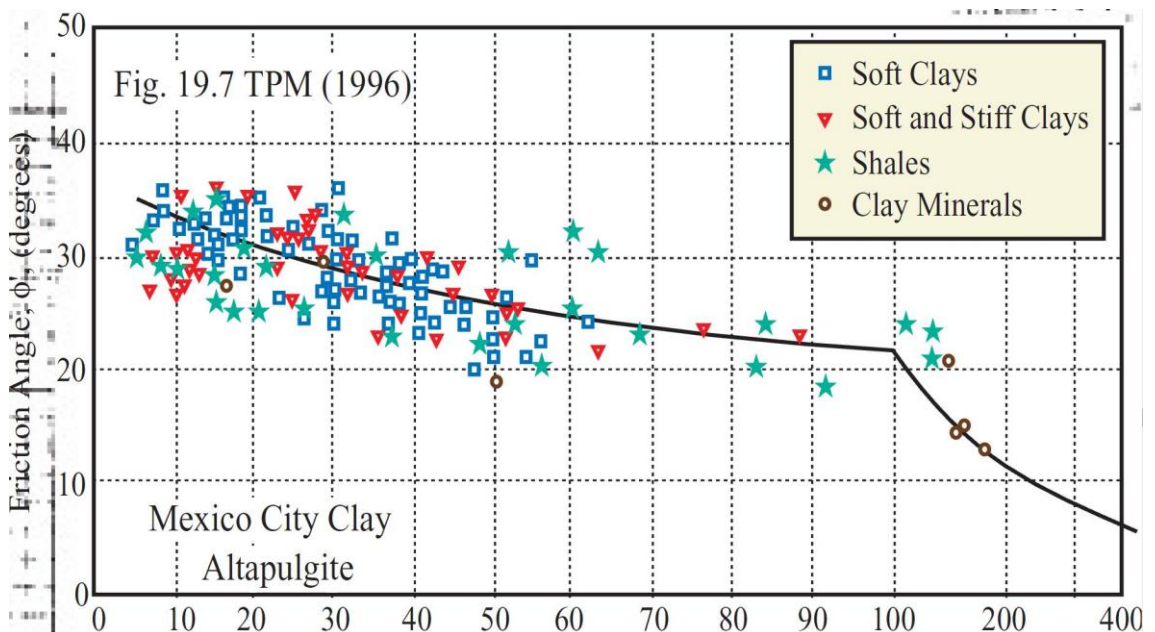


Figura 4.6 Relación entre Índice de Plasticidad IP (%) vs. Ángulo de Fricción ϕ' (grados)

4.2.1.7 Ángulo de dilatación ψ en grados ($^{\circ}$)

El ángulo de dilatación está especificado en grados. Los suelos arcillosos tienden a mostrar poca dilatación ($\psi \approx 0$). La dilatación de las arenas depende de la densidad y del ángulo de fricción. Para valores de ϕ menores a 30° , el ángulo de dilatación es en su mayoría cero.

4.2.1.8 Rigidez secante en la prueba estándar triaxial drenado E_{50}^{ref} en kN/m^2

Éste parámetro se lo obtiene de las pruebas triaxiales drenadas, esto es, compresión drenada con deformación lateral, y se toma el valor del módulo de rigidez referencial correspondiente a la presión de confinamiento referencial p^{ref} . En PLAXIS, se utiliza un ajuste predeterminado donde $p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$. Por defecto, PLAXIS utiliza $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$.

4.2.1.9 Rigidez tangente para la carga edométrica primaria E_{oed}^{ref} en kN/m^2

Éste parámetro se lo obtiene de las pruebas edométricas, esto es, compresión drenada sin deformación lateral (anillo rígido), y se toma el valor del módulo de rigidez tangente referencial correspondiente a la presión de confinamiento referencial p^{ref} . En PLAXIS, se utiliza un ajuste predeterminado donde $p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$. La ecuación para calcular éste parámetro es: $E_{oed}^{ref} = p^{ref} / \lambda^*$ donde λ^* es el índice de compresión modificada. Para una estimación aproximada de los parámetros del modelo, uno puede utilizar la correlación $E_{oed}^{ref} = E_u$, donde E_u es el módulo de Young no drenado. E_u se lo obtiene de los siguientes gráficos:

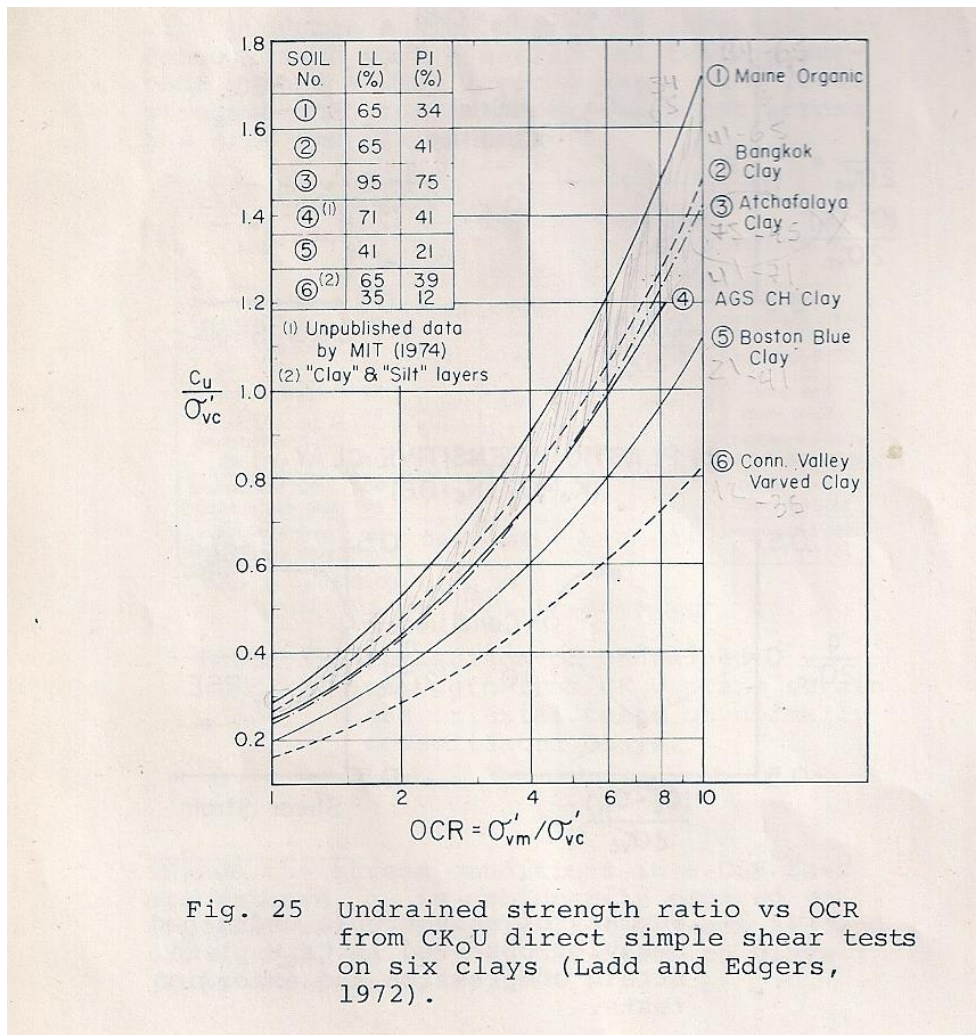


Fig. 25 Undrained strength ratio vs OCR from CK_{OU} direct simple shear tests on six clays (Ladd and Edgers, 1972).

Figura 4.7 OCR vs. S_u para diferentes suelos

Primero, en la figura 25 del "Reporte del Estado del Arte sobre Características de Fuerzas y Esfuerzo-Deformaciones" (*Stress-Deformation and Strength Characteristics State-of-the-Art Reports*) (1977), se determina el suelo al cual nuestro caso se asemeja. El más semejante es el suelo 4. Luego, en la figura 28 del mismo reporte, se elige entre dos figuras con diferentes factores de seguridad (a: FS = 3 y b: FS = 1.5). En nuestro caso se elige la figura 28 a) y con el suelo 4. Ya que la relación de sobreconsolidación (OCR) en el suelo de Guayaquil, es alrededor de 1, se obtiene que $E_u = 600 * S_u$.

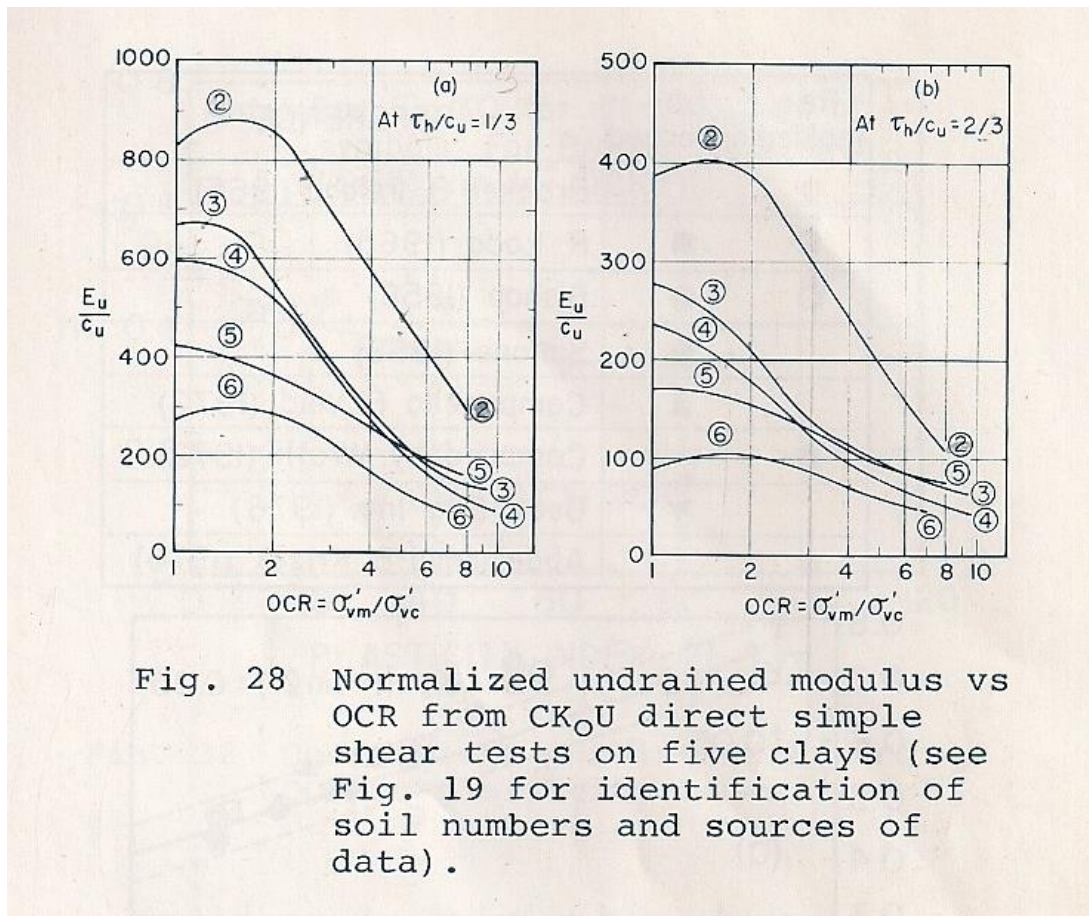


Figura 4.8 OCR vs. E_u / S_u

Como éste módulo E_u se lo utiliza para problemas estáticos, hay que realizar una relación para problemas dinámicos:

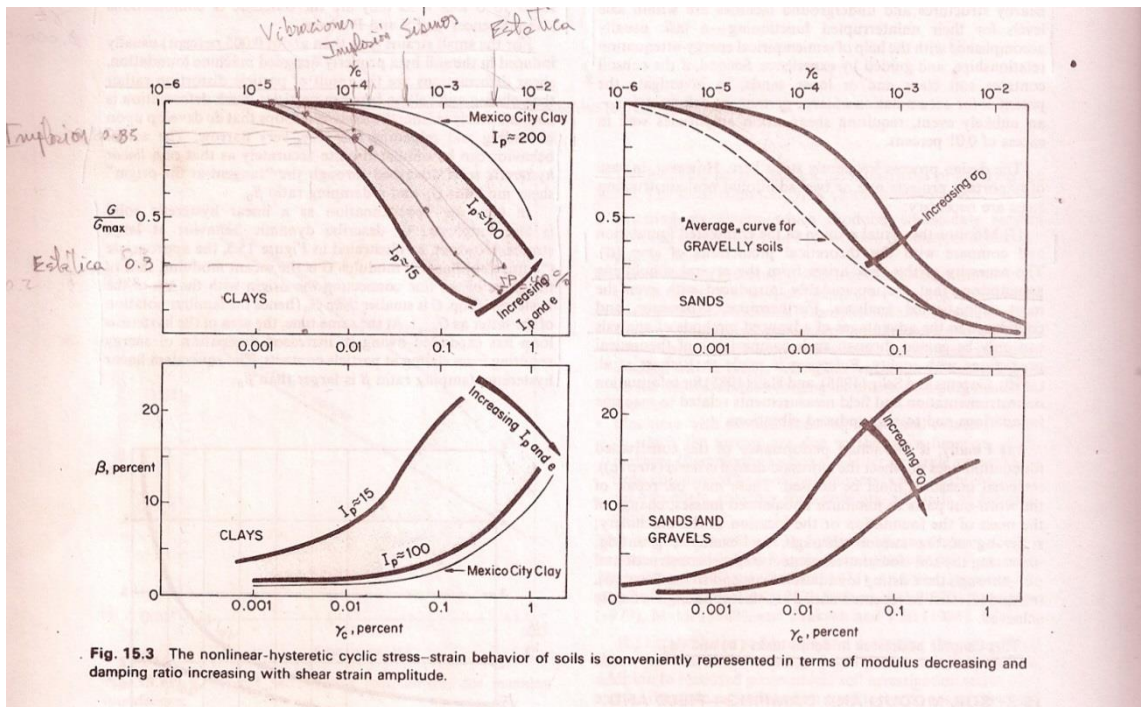


Figura 4.9 Relación entre el módulo cortante y el nivel de deformaciones para diferentes IP (%)

En la figura 15.3 del Manual de Ingeniería de Cimientos (*Foundation Engineering Handbook*) 2da Edición, se puede determinar la relación entre el módulo cortante y el nivel de deformaciones para diferentes IP (%). El IP en este caso está alrededor de 40%. El nivel de deformaciones para implosiones está por 10^{-4} y para estático está entre 10^{-2} y 10^{-3} se deduce que nuestra relación G / G_{max} es de $0.85 / 0.33$ que es aproximadamente igual a 2.5. Al ser el módulo cortante directamente proporcional al módulo de Young se asume la misma relación para ambas. Se puede multiplicar la relación estático/dinámico por el módulo no drenado y finalmente se obtiene una ecuación para el módulo odométrico referencial. $E_{oed}^{ref} = E_u = 1500 * Su$.

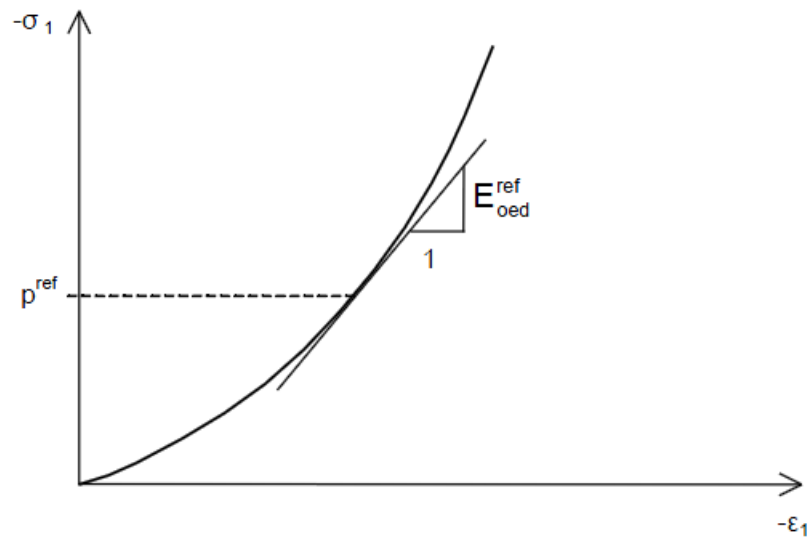


Figura 4.10 Definición del E_{oed}^{ref} de los resultados de una prueba del edómetro

4.2.1.10 Rigidez de descarga / recarga E_{ur}^{ref} en kN/m^2

Éste parámetro es el módulo de Young referencial para descarga / recarga con deformación lateral y en condición no drenada, correspondiente a la presión de confinamiento referencial p^{ref} . En PLAXIS, se utiliza un ajuste predeterminado donde $p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$. En varios casos prácticos es apropiado utilizar $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$; éste ajuste es predeterminado en PLAXIS.

4.2.1.11 Potencia m (adimensional) que define la dependencia de la rigidez del nivel de esfuerzo

La cantidad de dependencia de la rigidez, del nivel de esfuerzo viene dada por la potencia m . Con el fin de simular un comportamiento de la compresión logarítmica, como se observa para arcillas blandas, la potencia debe ser tomada igual a 1.0. Janbu (1963), tomado del "Manual de Modelos de Materiales de PLAXIS Version 8" (*Plaxis Version 8 Material Models Manual*)

(2007), traducido al español, reporta valores de m de alrededor de 0.5 para arenas y limos en Noruega, mientras Von Soos (1980) reporta diferentes valores en el rango de $0.5 < m < 1.0$.

4.2.1.12 Amortiguamiento Rayleigh alfa y beta

El amortiguamiento del material en un suelo es causado generalmente por sus propiedades viscosas, por la fricción y por el desarrollo de la plasticidad. Sin embargo, en PLAXIS los modelos de suelo no incluyen viscosidad como tal. En cambio, se asume un término de amortiguamiento, que es proporcional a la masa y rigidez del sistema (Amortiguamiento Rayleigh). En los tipos de problemas de una sola fuente utilizando un modelo axisimétrico, puede no ser necesario incluir el amortiguamiento Rayleigh, ya que la mayoría del amortiguamiento es causada por la propagación radial de las ondas (amortiguamiento geométrico). Por ésta razón se consideró a los parámetros α y β iguales a 0.

4.3 Análisis dinámico de la implosión del edificio MAGAP mediante el software de ingeniería PLAXIS módulo dinámico

Usando PLAXIS, es posible simular una carga dinámica distribuida sobre el suelo y obtener resultados del efecto que ésta causa.

Debido a la naturaleza tridimensional del problema, se utiliza un modelo axisimétrico, en el cual, el amortiguamiento geométrico es significativo en atenuar la vibración, en comparación con el amortiguamiento viscoso, propio del suelo de cimentación, que se desprecia.

El modelado de las fronteras es uno de los puntos clave. Con el fin de evitar reflexiones de onda falsas en las fronteras del modelo (que no existen en la realidad), se deben aplicar condiciones especiales con el fin de absorber las ondas que llegan a las fronteras.

4.3.1 Ajustes generales

El primer paso en cualquier análisis es determinar los parámetros básicos del modelo de elementos finitos. Esto es hecho en la ventana de Ajustes generales (General settings). En estos ajustes se incluyen la descripción del problema, el tipo de análisis, el tipo de elementos, las unidades básicas y el tamaño del área de dibujo. El problema es simulado utilizando un modelo axisimétrico con elementos de 15 nodos. Los valores de Aceleración (Acceleration) se los mantiene como vienen predeterminados.

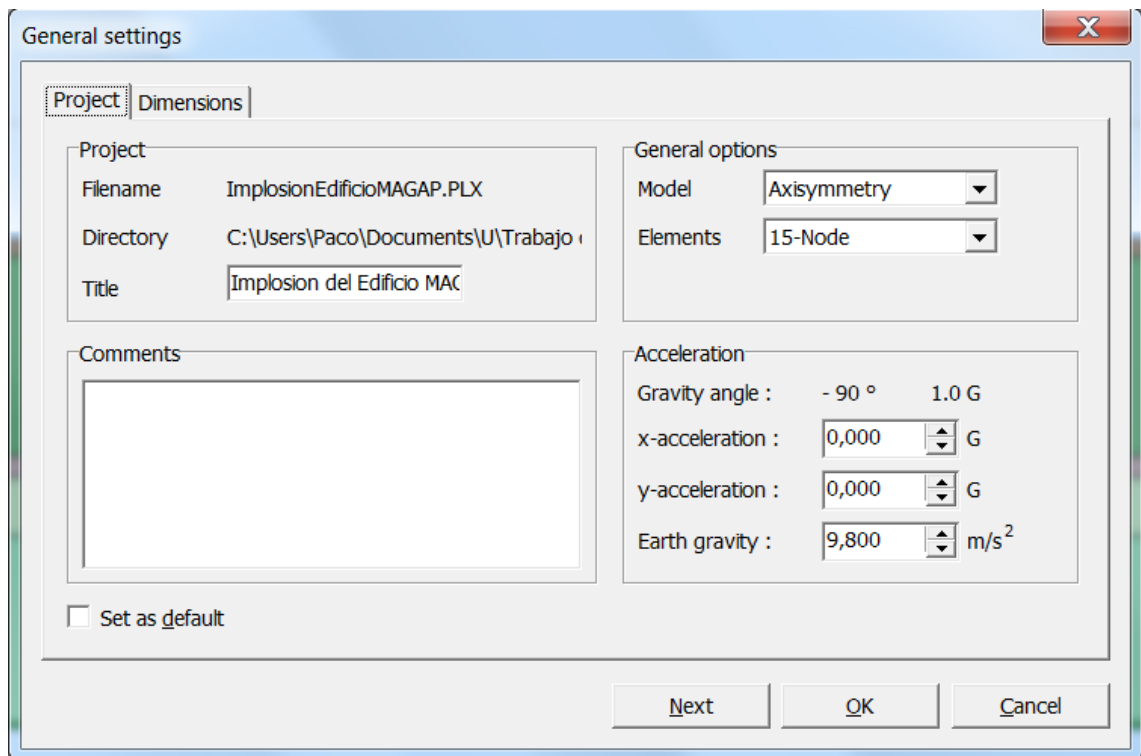


Figura 4.11 Ajustes generales del proyecto

En la pestaña *Dimensiones* (Dimensions) se escoge en el cuadro de *Unidades* (Units) la *Longitud* (Length) = m (metros); *Fuerza* (Force) = kN (kilonewtons) y *Tiempo* (Time) = s (segundos). Se utiliza (s) segundos como unidad de tiempo, ya que los efectos dinámicos usualmente se encuentran en el orden de segundos en lugar de días, como es el caso de los problemas estáticos. En el cuadro de *Dimensiones geométricas* (Geometry dimensions) se ingresan los valores vistos en la Figura. La frontera inferior se la escogió de -45 metros debido a que el sondeo tiene esa profundidad, mientras la frontera derecha se la escogió de 250 metros debido a que se recomienda una distancia a las fronteras entre cuatro y cinco veces la profundidad de análisis, para minimizar la incidencia de la reflexión de las ondas en dichas fronteras. El cuadro de *Red* (Grid) contiene valores para determinar el espaciamiento de la red. La red provee una matriz de puntos en la pantalla que pueden ser utilizados como puntos referenciales. También pueden ser

utilizados para agarrarse de puntos regulares durante la creación de la geometría. La distancia entre los puntos está determinada por el valor de *Espaciamiento* (Spacing). El espaciamiento de los puntos agarrables pueden ser divididas aún más en intervalos más pequeños con el valor de *Número de intervalos* (Number of intervals). Se introdujo 4 en este valor para que haya un punto agarrable cada 0.25 metros en dirección x y y.

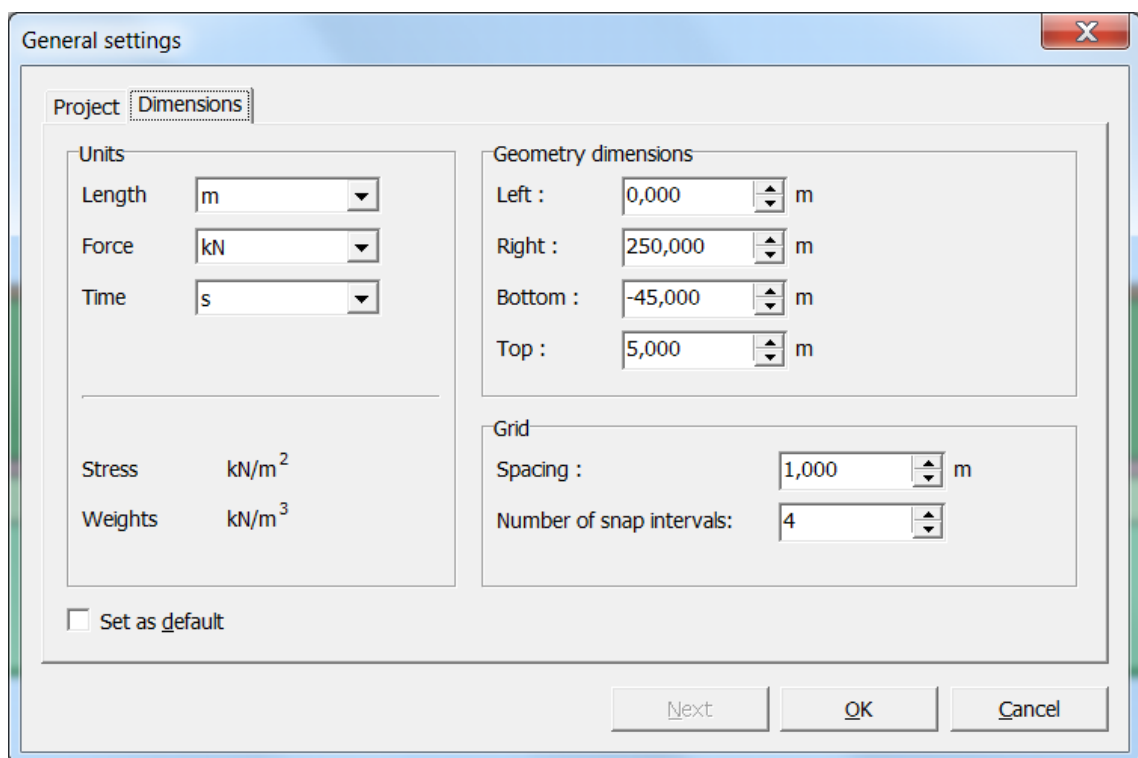


Figura 4.12 Ajustes generales (Dimensiones)

4.3.2 Modelo geométrico

Como se indicó anteriormente, las fronteras del modelo deben estar suficientemente lejos de la región de interés, para evitar alteraciones debido a posibles reflexiones. Aunque se adopten medidas especiales, como poner fronteras absorbentes, con el fin de evitar falsas reflexiones, siempre hay una pequeña influencia, por lo que se recomienda poner fronteras lejanas.

Por lo antes indicado, en un análisis dinámico, las fronteras del modelo son generalmente colocadas más lejos que en un análisis estático.

Para establecer la geometría del problema, los siguientes pasos fueron necesarios:

- Se dibujó la geometría del modelo como se ve en la Figura. Debido a que el edificio no es uniforme, se determinará un área equivalente en la mezzanine que será igual al área de un cuadrado con lados de 32 metros. Así, el área de la base de 1024 metros cuadrados se divide para π y se le saca la raíz cuadrada para obtener el radio circular equivalente promedio, el cual resulta en un radio de 18 metros.
- Como el edificio posee dos sótanos, la aplicación de la carga dinámica, se colocó sobre la losa inferior del sótano.

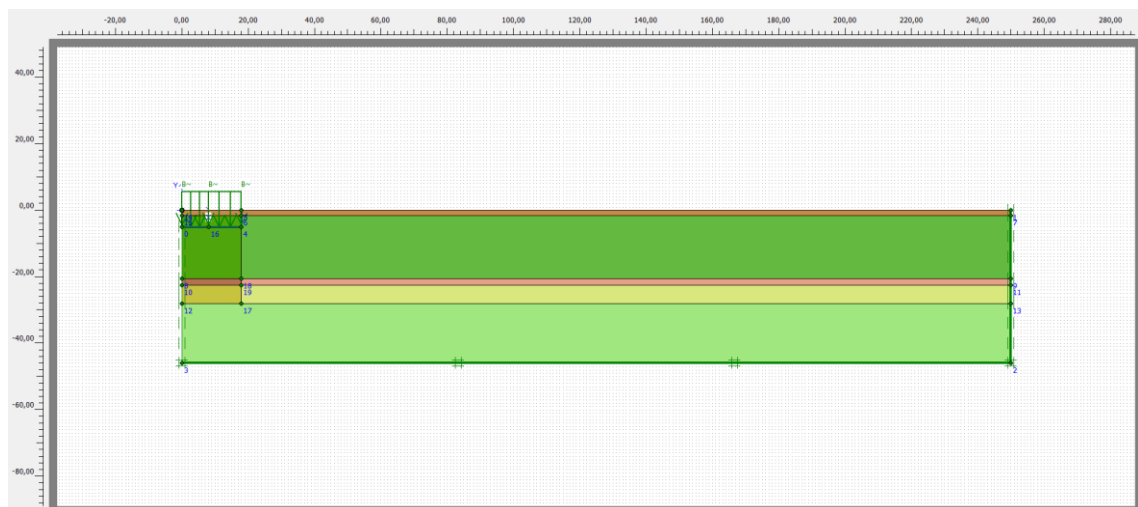


Figura 4.13 Geometría del modelo

- Se aplicó la condición de borde denominada como *Fijaciones estándar* (Standard fixities). Como resultado PLAXIS genera una fijación completa en la base de la geometría (no hay movimiento vertical ni horizontal en la frontera inferior) y condiciones de rodillo en los costados verticales ($u_x = 0$; $u_y = \text{libre}$). Una fijación en una cierta

dirección aparecerá en la pantalla como dos líneas paralelas perpendiculares a la dirección de fijación. Por lo tanto, los soportes de rodillo aparecen como dos líneas paralelas verticales y la fijación completa aparece como líneas de rayado cruzado.

- Para modelar la estructura del sótano, se aplican dos líneas de placas, una horizontal que empieza desde el eje vertical a 5 metros de profundidad y tiene una longitud de 18 metros, que representa a la losa inferior del sótano; y una vertical que intersecta el final de la línea de placa horizontal con la línea de superficie, que representa al muro perimetral del sótano.
- Se aplicó una carga distribuida a lo largo del sótano. Ésta es la carga que se definió con anterioridad que se deberá simular como la implosión del edificio. Luego se la determina en el menú de *Cargas* (Loads) como *Sistema de carga dinámica* (Dynamic load system).
- Se deben definir luego condiciones especiales de borde para tener en cuenta el hecho de que, en realidad, el suelo es un medio semi-infinito. Sin estas condiciones especiales de borde, las ondas se reflejarían en las fronteras del modelo, causando perturbaciones. Para evitar éstos falsos reflejos, se especifican fronteras absorbentes en la parte inferior y la parte derecha de la geometría.

4.3.3 Propiedades de los materiales

Para simular el comportamiento del suelo, debe ser asignado un modelo apropiado del suelo y parámetros apropiados para los materiales en la geometría. PLAXIS distingue entre los conjuntos de datos de los materiales para *Suelos e Interfaces* (Soils & Interfaces), *Placas* (Plates), *Anclas*

(Anchors) y *Geomallas* (Geogrids). La creación de conjuntos de datos de los materiales se realiza generalmente luego de la introducción de las condiciones de borde. Antes de que se genere la malla, todos los conjuntos de datos de los materiales deben haber sido definidos y todos los cúmulos (clusters) y estructuras deben tener asignado datos apropiados. En la opción *Datos de Materiales* (Material Sets) se realiza la introducción de los datos de los materiales. A continuación se detallan los parámetros a introducir en el análisis para cada capa:

Parámetro	Símbolo	Relleno	Arcilla 1	Limo	Arcilla Limosa	Arcilla 2	Unidad
Modelo del Material	Modelo	Mohr-C.	HS	HS	Hardening Soil	HS	-
Comportamiento	Tipo	No Dren	No Dren	No Dren	No Drenado	No Dren	-
Peso Unitario No Saturado	γ_{unsat}	16,5	13,7	14,0	13,5	15,9	kN/m ³
Peso Unitario Saturado	γ_{sat}	18,0	15,2	15,5	15,0	17,4	kN/m ³
Permeabilidad horizontal	k_x	1 E ⁻⁵	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻⁸	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻¹⁰	m/s
Permeabilidad vertical	k_y	1 E ⁻⁵	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻⁸	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻¹⁰	m/s
Módulo de Young	E_{ref}	50000	5100	9090	7500	11850	kN/m ²
Módulo Odométrico	E_{oed}	-	5100	9090	7500	11850	kN/m ²
Potencia	m	-	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Módulo de Descarga	E_{ur}	-	15300	27270	22500	35550	kN/m ²
Relación de Poisson	ν	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-
Esfuerzo Referencial	P_{ref}	-	100	100	100	100	kN/m ²
Cohesion	c	1,0	4,5	2,0	8,0	8,8	kN/m ²
Ángulo de Fricción	ϕ	31	26	28	26	29	°
Ángulo de Dilatancia	ψ	0	0	0	0	0	°
Reducción de Resistencia de Interfaz	R_{inter}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-

Tabla 4.1 Propiedades de los materiales del subsuelo

Debido a que el edificio está apoyado sobre pilotes y a que en el programa PLAXIS 2D no se puede modelar con precisión los pilotes (por su característica tridimensional), además de que no se pudieron obtener datos del pilotaje, se decidió considerar su influencia, aumentando en esta zona, los valores de resistencia a la cohesión, y los módulos de elasticidad en los estratos de suelo directamente debajo del edificio hasta llegar al estrato firme. En éste caso se multiplican los valores de cohesión por dos, para simular la presencia de pilotes debajo del edificio. Para hacer esto es necesario crear un duplicado de los estratos “Arcilla 1”, “Limo” y “Arcilla Limosa” y duplicarles los parámetros de resistencia (cohesión) y deformabilidad (módulos de resistencia E_{50} , E_{oed} y E_{ur}). A continuación se detallan los parámetros de los estratos “con pilotes”.

Parámetro	Símbolo	Arc. 1 + Pil.	Limo + Pil.	Arci. Lim. + Pil.	Unidad
Modelo del Material	Modelo	HS	HS	Hardening Soil	-
Comportamiento	Tipo	No Drenado	No Drenado	No Drenado	-
Peso Unitario No Saturado	γ_{unsat}	13,7	14,0	13,5	kN/m ³
Peso Unitario Saturado	γ_{sat}	15,2	15,5	15,0	kN/m ³
Permeabilidad horizontal	k_x	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻⁸	1 E ⁻¹⁰	m/s
Permeabilidad vertical	k_y	1 E ⁻¹⁰	1 E ⁻⁸	1 E ⁻¹⁰	m/s
Módulo de Young	E_{ref}	10200	18180	15000	kN/m ²
Módulo Odométrico	E_{oed}	10200	18180	15000	kN/m ²
Potencia	m	1,0	1,0	1,0	-
Módulo de Descarga	E_{ur}	30600	54540	45000	kN/m ²
Relación de Poisson	ν	0,2	0,2	0,2	-
Esfuerzo Referencial	P_{ref}	100	100	100	kN/m ²
Cohesion	c	9,0	4,0	16,0	kN/m ²
Ángulo de Fricción	ϕ	26	28	26	°
Ángulo de Dilatación	ψ	0	0	0	°
Reducción de Resistencia de Interfaz	R_{inter}	1,0	1,0	1,0	-

Tabla 4.2 Propiedades de los materiales del subsuelo “con pilotes”

Al completar la introducción de datos de materiales del suelo, se arrastra cada material al cúmulo (cluster) de suelo respectivo.

También se detallan a continuación los parámetros a introducir para las placas que van a actuar como losas.

Parámetro	Nombre	Losa e = 0,6m	Unidad
Rigidez Normal	<i>EA</i>	2,10 E ⁷	kN/m
Rigidez a la Flexión	<i>EI</i>	6,30 E ⁵	kNm ² /m
Peso	<i>W</i>	14,4	kN/m/m
Relación de Poisson	<i>v</i>	0,0	-

Tabla 4.3 Propiedades del material de las losas del edificio

Asimismo se arrastra la placa de espesor de 0,6 metros a la losa vertical y a la losa horizontal (sótano).

4.3.4 Generación de la malla

Una vez que el modelo de la geometría esté completo, la malla puede ser generada. PLAXIS permite un proceso completamente automático de la generación de la malla, en el que la geometría se divide en elementos básicos y elementos estructurales compatibles, si es que se aplica. Debido a la alta concentración de esfuerzos esperada en el área bajo el edificio, se realiza un refinamiento local aquí. La malla es generada con un *Grosor Global* (Global Coarseness) establecido en “*grueso*” (coarse) y luego la línea del sótano del edificio se refina una vez. El resultado es como se ve en la siguiente figura:

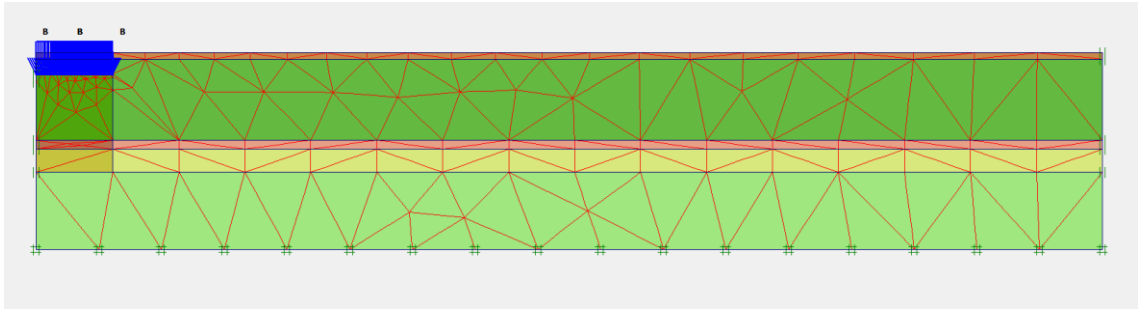


Figura 4.14 Malla del modelo

4.3.5 Condiciones iniciales

Una vez que la malla ha sido generada, el modelo de elementos finitos está completo. Antes de iniciar los cálculos, no obstante, las condiciones iniciales deben ser generadas. En general, las condiciones iniciales están comprendidas por las condiciones iniciales de las aguas subterráneas, la configuración de la geometría inicial y el estado de esfuerzos efectivos iniciales. La opción de condiciones iniciales consiste de dos modos diferentes: el modo de presión de agua y el modo de configuración de la geometría. En el modo de presión de agua se define el nivel freático general, debajo de la cual la distribución de presión de agua es hidrostática. El nivel freático general es automáticamente asignado a todos los cúmulos de suelo para la generación de presiones de poros. Se definió una línea de nivel freático general a 1.20 metros de profundidad en base al sondeo cercano al edificio. Luego se genera la presión de agua en toda la geometría y se actualiza el modelo. A continuación se generarán los esfuerzos iniciales en el suelo mediante el proceso *K0*, el cual se puede ejecutar, ya que la superficie inicial del suelo es horizontal, y posee una condición Geostática. Para superficies de suelo inclinadas (condición no Geostática), se utiliza la opción de cargas por gravedad o "*Gravity Loading*". El multiplicador total para el peso del suelo $\Sigma Mweight$, se lo mantiene en 1.0. Esto significa que el

peso total del suelo es aplicado para la generación de esfuerzos iniciales. Finalmente se actualiza el modelo y se procede a realizar los cálculos.

4.3.6 Cálculos

Para poder simular el efecto de la implosión del edificio en el suelo, se requiere un cálculo dinámico, el cual requiere de cuatro fases:

En la primera fase se hace un análisis plástico y se la designa como una etapa de construcción en la cual se define la geometría del modelo donde solo se muestran los diferentes estratos de suelo pero no hay nada más activado y la superficie del modelo queda como si fuera todo plano. Se dejan los demás parámetros por defecto. Se lo identifica como “Estado Base”.

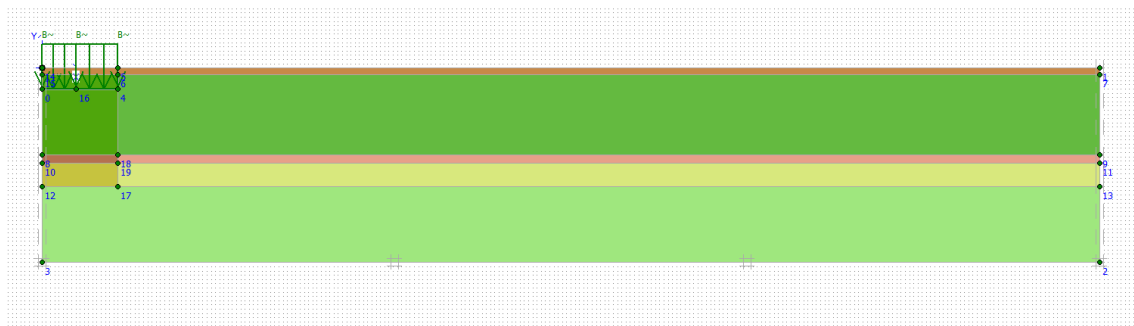


Figura 4.15 Primera fase del cálculo

En la segunda fase, que se identifica como “Excavación y Sótano”, también se realiza un análisis plástico y se la designa como etapa de construcción. Aquí se desactivan las dos primeras capas de suelo que se encuentran debajo del edificio, ya que éstas se excavan para construir el sótano. Al mismo tiempo se activan las dos placas (horizontal y vertical), las cuales simulan la estructura del sótano.

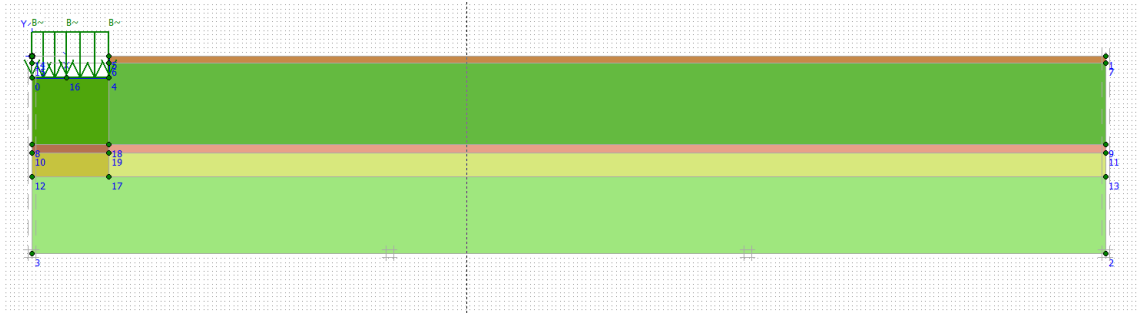


Figura 4.16 Segunda fase del cálculo

En la tercera fase es cuando se activa la carga dinámica, la cual será modelada por una carga armónica vertical. Primero se debe especificar en la pestaña *General* que se realizará el análisis mediante un análisis dinámico. En la pestaña de *Parámetros* (Parameters) se selecciona del cuadro de *Parámetros de control* (Control parameters) la opción que hace que los desplazamientos de la fase anterior regresen a ser 0 (Reset displacements to zero) y se especifica que el número de *Pasos adicionales* (Additional steps) es 250. Luego se determina el *Intervalo de tiempo* (Time interval), el cual será de 4.69 segundos, ya que ésta cantidad de tiempo se demora la carga dinámica en impactar contra el suelo desde la primera fuerza hasta la última. Se procede a determinar la carga dinámica en los *Multiplicadores totales* (Total multipliers). En el botón de la sumatoria de carga B (Σ MloadB) se puede definir la carga dinámica. Se utiliza la opción de multiplicador de carga armónica y aquí se introducen los valores obtenidos anteriormente mediante el tanteo de la variable frecuencia. El primer parámetro es la amplitud y aquí se introduce la fuerza de impacto más la carga del edificio, el cual en éste caso es de 219.16 kN/m^2 . Luego se introduce la frecuencia que se manipuló para hacer coincidir lo más posible las dos curvas, para la cual se obtuvo 0.034 Hertz o ciclos por segundo. Finalmente se inserta un ángulo inicial de fase el cual es necesario ya que la curva fuerza dinámica vs. tiempo no empieza en el origen. Se introduce 11.5 grados como ángulo

inicial de fase para que finalmente el gráfico de la carga dinámica sea el siguiente:

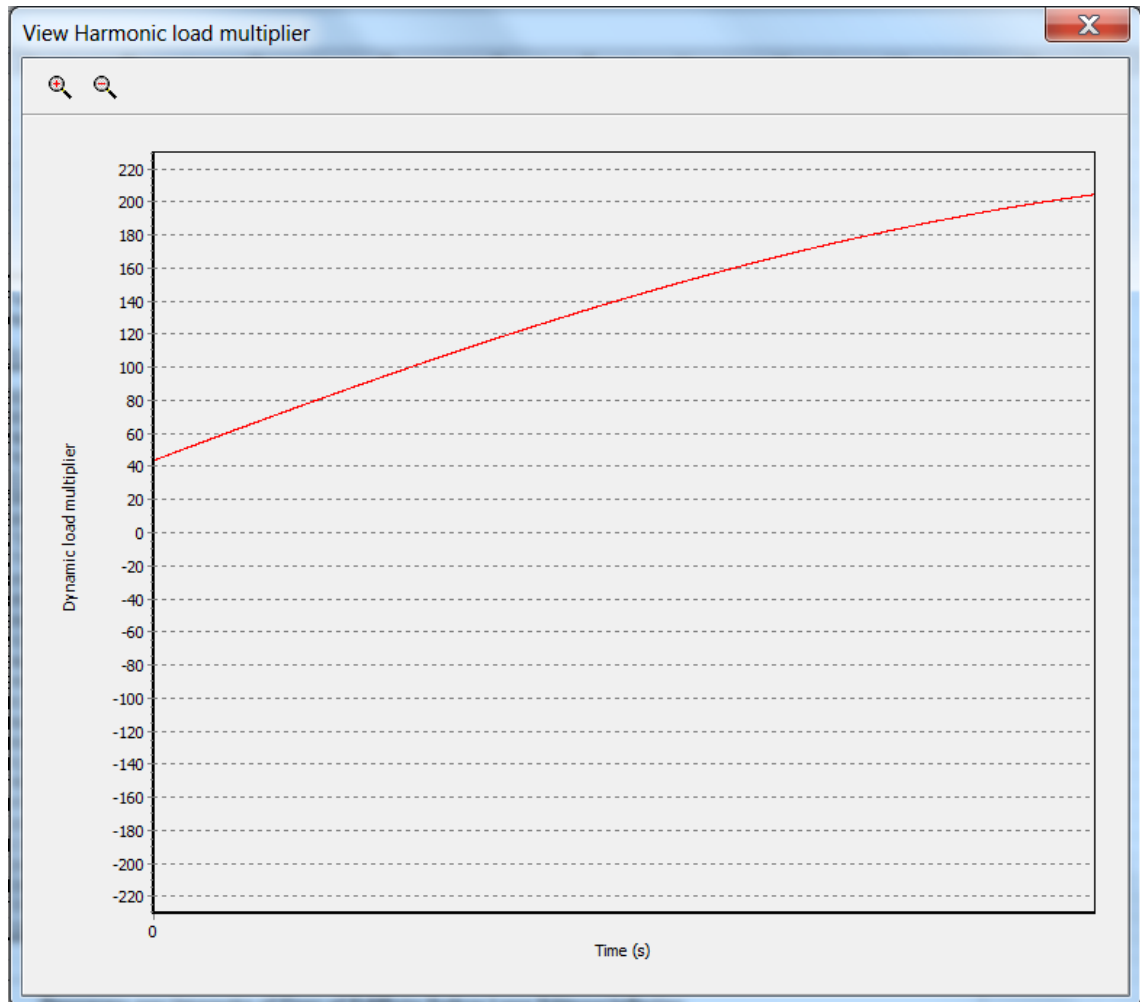


Figura 4.17 Tercera fase del cálculo (Carga dinámica armónica)

En la cuarta y última fase la carga dinámica deja de aplicarse y el suelo vibra libremente después de la excitación inicial. Se consideran los mismos parámetros introducidos en la fase tres con las excepciones de que los desplazamientos no se regresan al valor cero, todos los valores de la carga armónica se cambian a cero, y el intervalo de tiempo es de 16 segundos. Ésta es la cantidad de tiempo que se le dará al suelo para que vibre libremente.

Antes de empezar el cálculo, se seleccionan puntos de importancia en la geometría para analizar los diferentes resultados para cada punto. En este caso se seleccionaron puntos a la altura del sótano sobre el eje, A (0.0, -5.0), y en la parte más alejada del sótano, B (18.0, -5.0), así como también en la superficie a 50 metros, C (50.0, 0.0), a 100 metros, D (100.0, 0.0), a 150 metros, E (150.0, 0.0), a 200 metros, F (200.0, 0.0), y a 250 metros, G (250.0, 0.0) del eje de la geometría como se muestra en la siguiente figura:

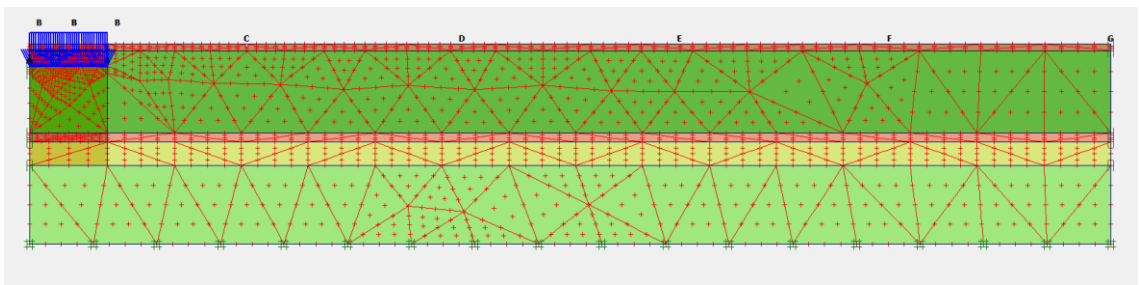


Figura 4.18 Selección de puntos de cálculo (A – G)

Finalmente se realiza el cálculo del modelo presionando en el botón *Calcular* (Calculate). El programa calculará en cada punto asignado anteriormente (A - G) diferentes parámetros como deformaciones, velocidades, aceleraciones, entre otros.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS/RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la corrida del programa con los parámetros previamente introducidos:

5.1 Malla Deformada (Deformed Mesh)

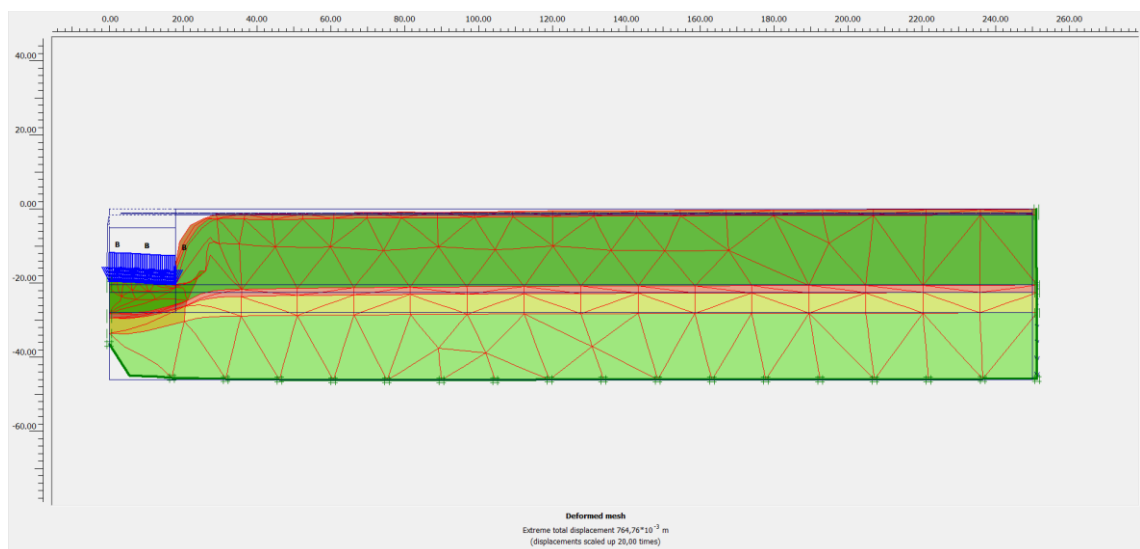


Figura 5.1 Malla deformada al final del cálculo

La *Salida* (Output) lo primero que muestra es la malla deformada, cuyos desplazamientos están escalados por veinte (20) veces para que sean más visibles. El desplazamiento total extremo es de 0.76 metros o 76 centímetros, el mismo que ocurre en el sótano.

5.2 Desplazamientos Totales (Total Displacements)

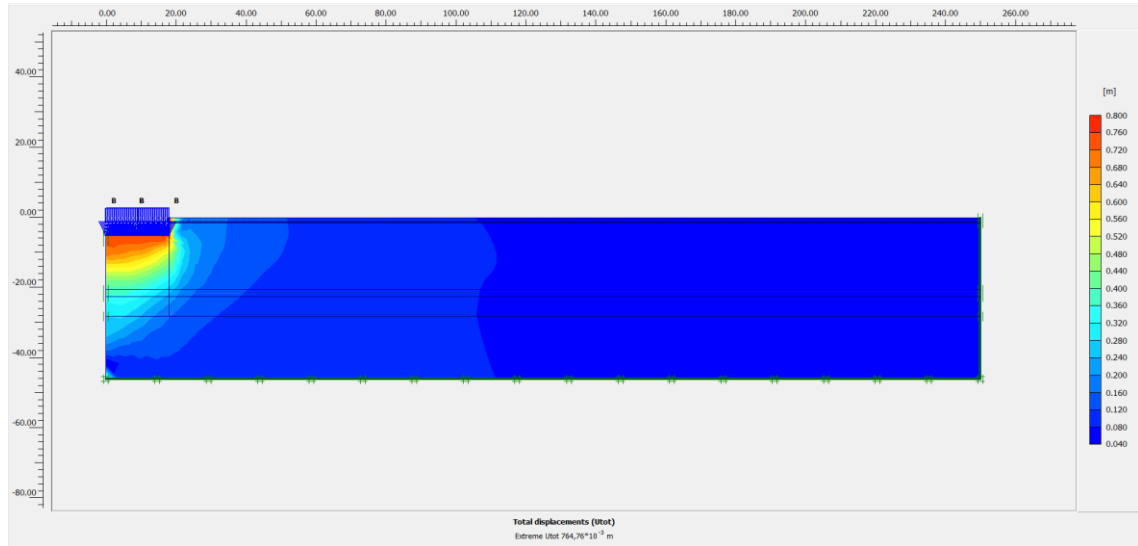


Figura 5.2 Desplazamientos totales al final del cálculo

Se muestran los desplazamientos totales por colores siendo azul más bajos (0.00) y rojo más altos (0.76 metros). Los desplazamientos más altos se observa que están justo debajo del sótano tendiendo más hacia el eje. Como se observó antes el desplazamiento total extremo es de 764.76×10^{-3} metros o 76 centímetros.

5.3 Velocidades Totales (Total Velocities)

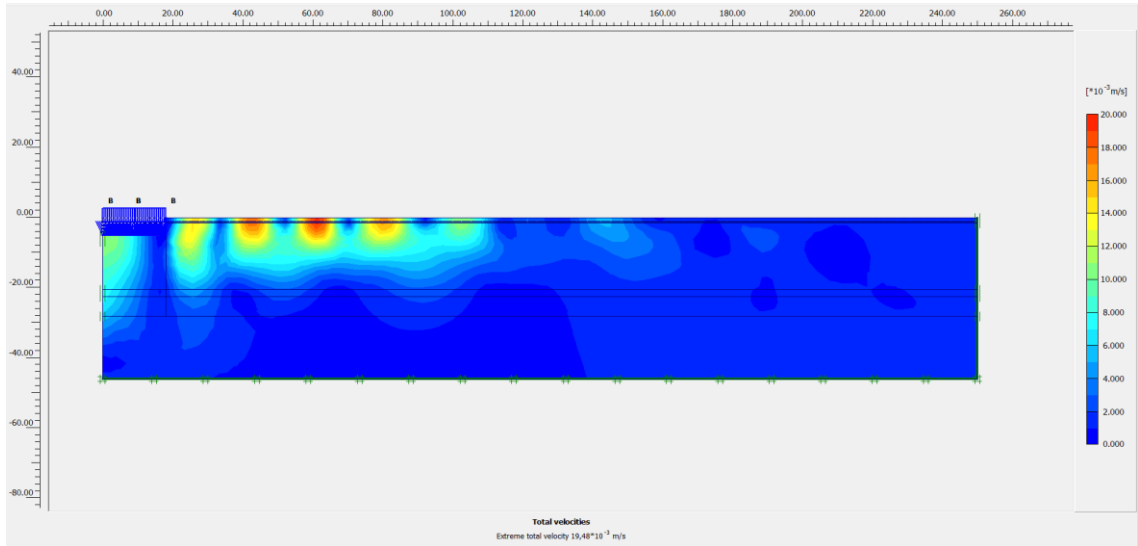


Figura 5.3 Velocidades totales al final del cálculo

Se muestran a continuación las velocidades totales por colores siendo azul más bajas (0.00) y rojo más altas (20×10^{-3} metros por segundo o 20 milímetros por segundo). Debido a que la velocidad de propagación de la onda varía con el tiempo, éste gráfico sólo muestra la velocidad máxima en cada nodo de la malla al final del análisis. El valor máximo de velocidad total es de 19.48×10^{-3} m/s o 19.48 mm/s.

5.4 Aceleraciones Totales (Total Accelerations)

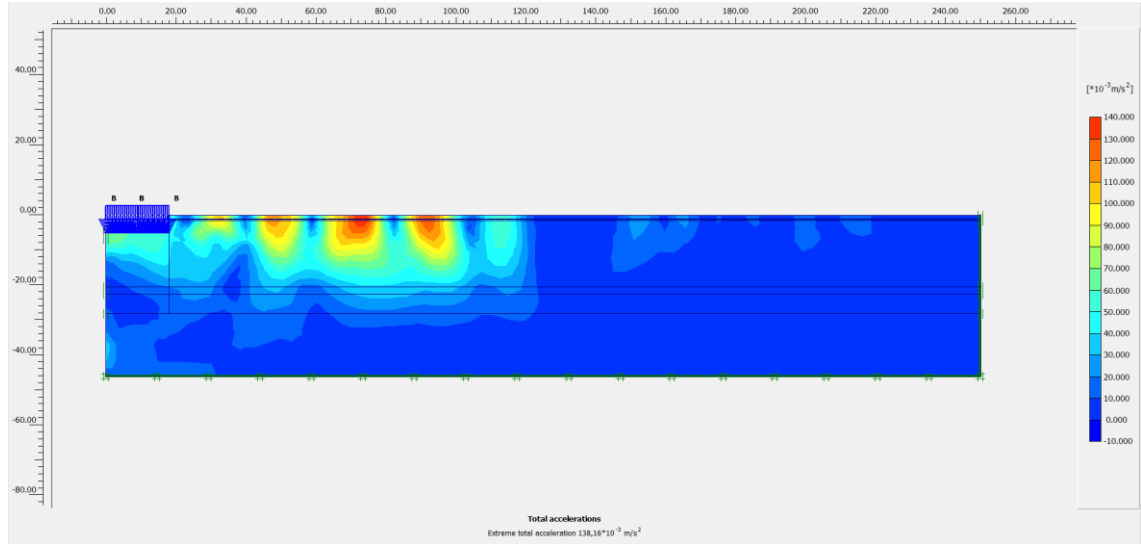


Figura 5.4 Aceleraciones totales al final del cálculo

Se muestran a continuación las aceleraciones totales por colores siendo azul más bajas (-10.00) y rojo más altas (140.00×10^{-3} metros por segundo cuadrado). Éste gráfico sólo muestra la aceleración máxima en cada nodo de la malla al final del análisis. El valor máximo de aceleración total es de $138.16 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ o 0.138 m/s^2 .

5.5 Curva de Carga Dinámica B vs. Tiempo

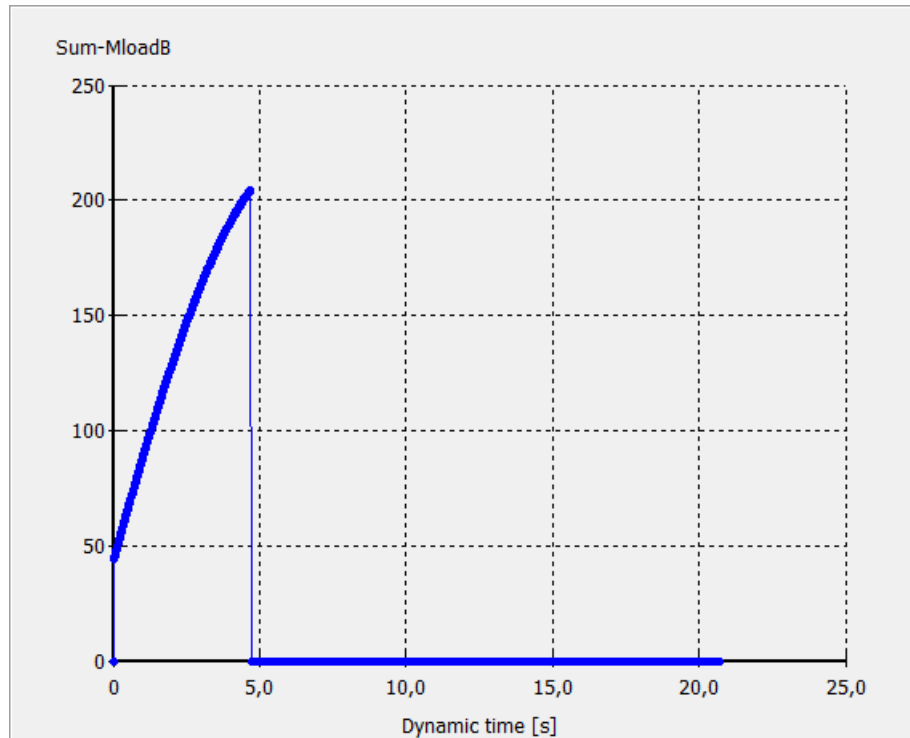


Figura 5.5 Carga dinámica vs. Tiempo

En la presente curva se muestra la magnitud de la carga dinámica a lo largo del tiempo. Se observa la misma curva que en el tercer paso del *Cálculo* con la diferencia de que al finalizar la carga, a los 4.69 segundos, ésta regresa a ser cero para simular la vibración libre (sin carga dinámica) por un tiempo adicional de 16 segundos como se realizó en el cuarto paso.

5.6 Curva de Deformaciones Totales (A – G) vs. Tiempo

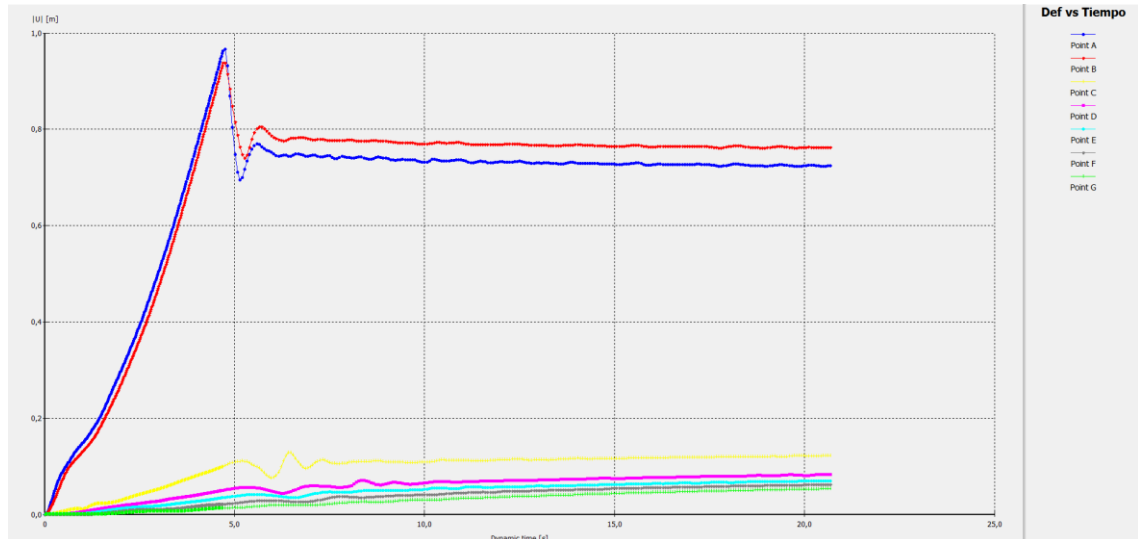


Figura 5.6 Curva de deformaciones totales (A – G) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las deformaciones en los siete diferentes puntos a lo largo de la geometría, siendo el punto A la curva de color azul, el punto B la curva de color rojo, el punto C la curva de color amarillo, el punto D la curva de color magenta, el punto E la curva de color cian, el punto F la curva de color gris, y el punto G siendo la curva de color verde. Se puede observar que en los puntos A y B, es decir, en el centro y el borde del edificio a la altura del sótano, las deformaciones serán mayores que en cualquier otro punto. Esto se produce por la gran cantidad de masa, y en consecuencia fuerza, que actúa directamente sobre estos puntos.

5.6.1 Curva de Deformación (A) vs. Tiempo

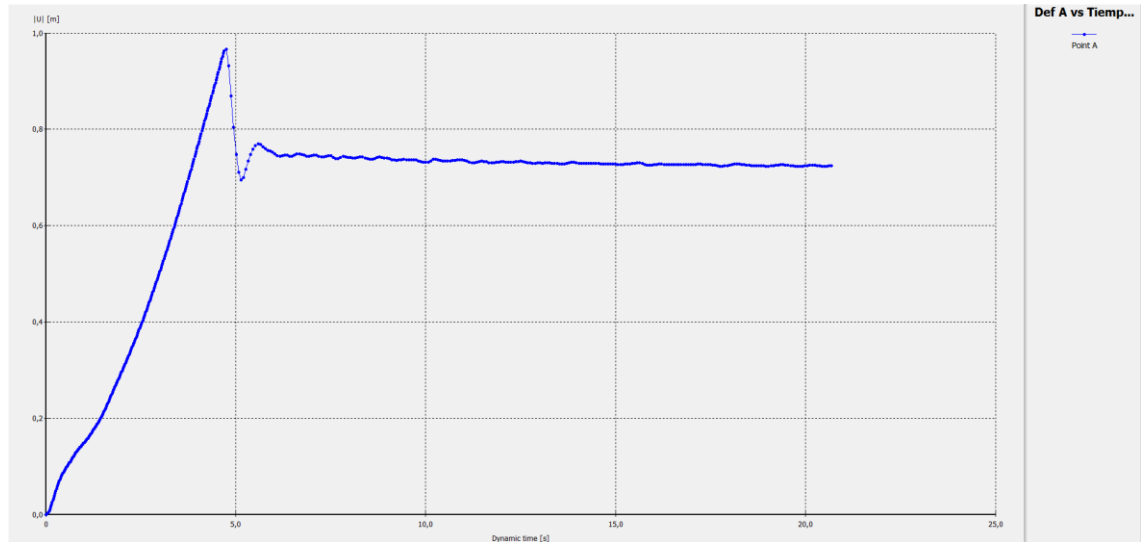


Figura 5.7 Curva de deformaciones totales (A) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto A. Se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación en el punto A es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.96 m. Luego con el pasar del tiempo queda una deformación remanente de alrededor de 0.72 m. Esto quiere decir que aproximadamente 72 centímetros se asentará el centro del edificio.

5.6.2 Curva de Deformación (B) vs. Tiempo

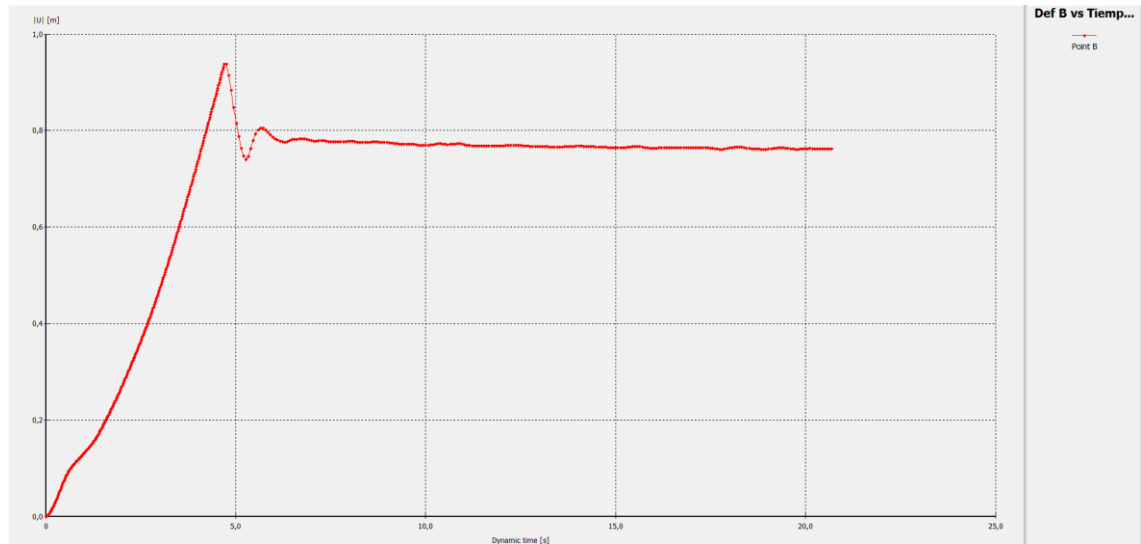


Figura 5.8 Curva de deformación total (B) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto B. Se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación en el punto B es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.94 m. Luego con el pasar del tiempo queda una deformación remanente de alrededor de 0.76 m. Esto quiere decir que aproximadamente 76 centímetros se asentará el borde del edificio.

5.6.3 Curva de Deformación (C) vs. Tiempo

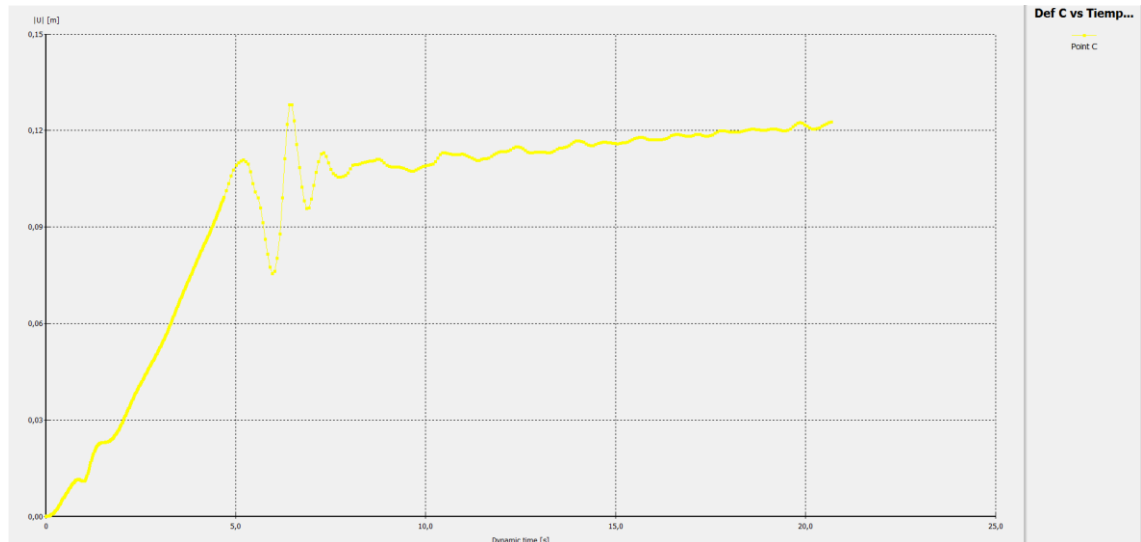


Figura 5.9 Curva de deformación total (C) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto C. Se observa que después de aproximadamente 2 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación en el punto C es máxima con una magnitud aproximada de 0.13 m. Luego disminuye brevemente pero con el pasar del tiempo ésta tiende a aumentar y al final del análisis alcanza una deformación de alrededor de 0.12 m.

5.6.4 Curva de Deformación (D) vs. Tiempo

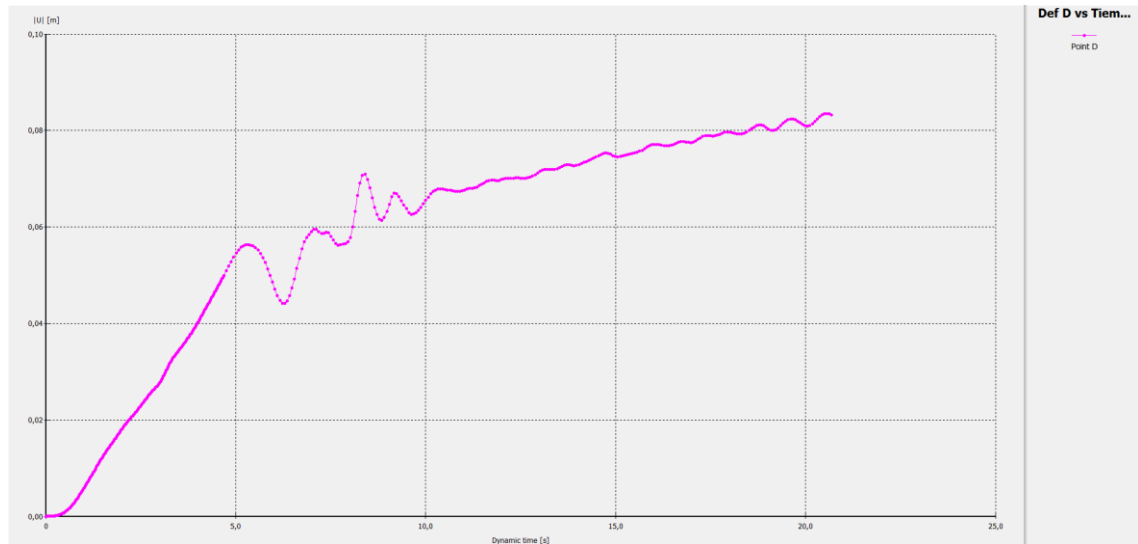


Figura 5.10 Curva de deformación total (D) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto D. Se observa que después de aproximadamente 4 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación en el punto D alcanza un aparente “pico” con una magnitud aproximada de 0.07 m. Luego con el pasar del tiempo ésta tiende a aumentar y al final del análisis alcanza una deformación de alrededor de 0.08 m.

5.6.5 Curva de Deformación (E) vs. Tiempo

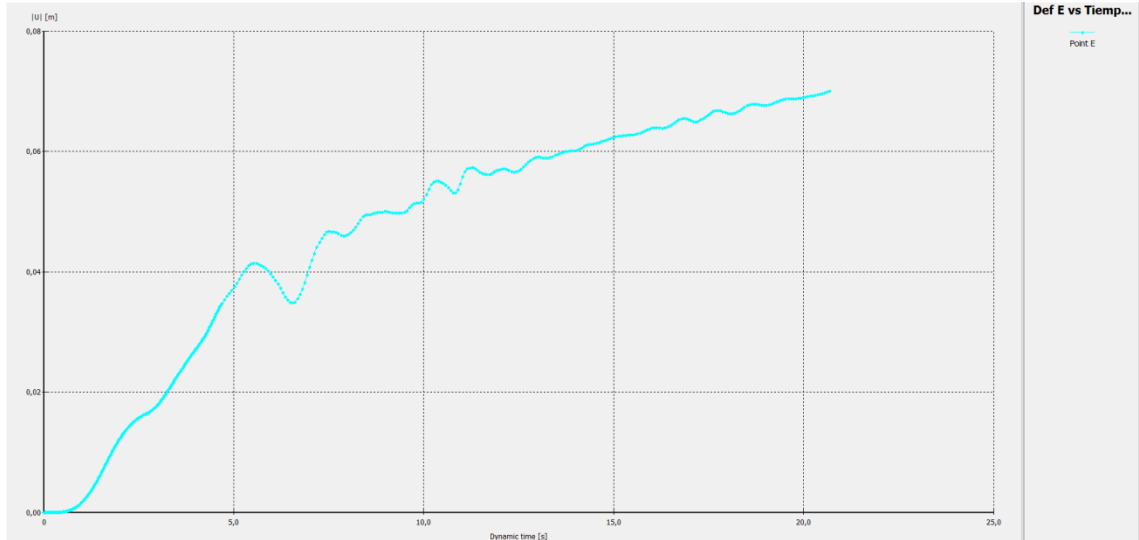


Figura 5.11 Curva de deformación total (E) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto E. Se observa que con el pasar del tiempo la deformación en el punto E tiende a aumentar y al final del análisis alcanza una deformación de alrededor de 0.07 m.

5.6.6 Curva de Deformación (F) vs. Tiempo

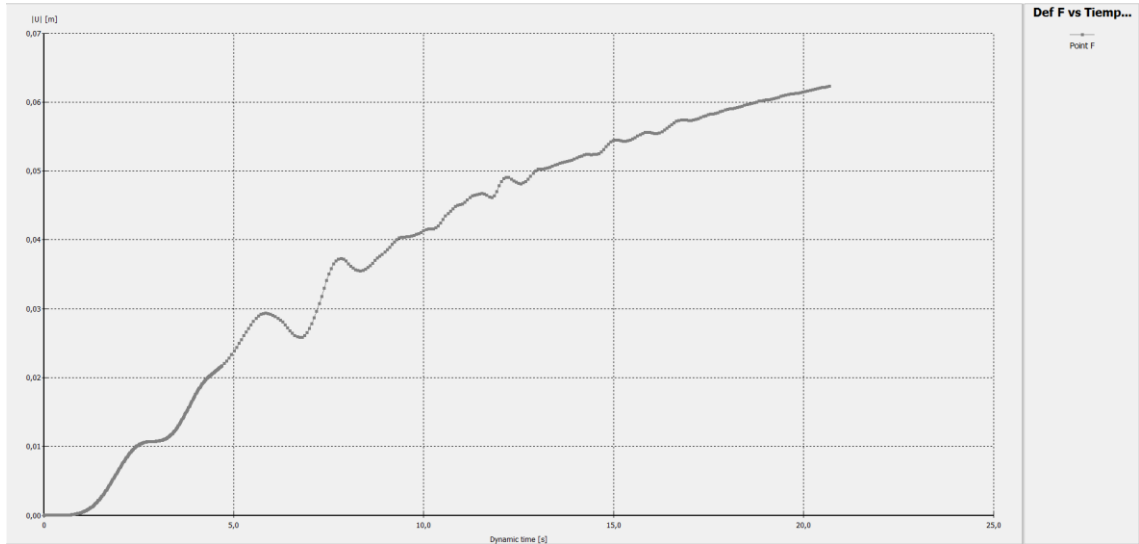


Figura 5.12 Curva de deformación total (F) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto F. Se observa que con el pasar del tiempo la deformación en el punto F tiende a aumentar y al final del análisis alcanza una deformación de alrededor de 0.06 m.

5.6.7 Curva de Deformación (G) vs. Tiempo

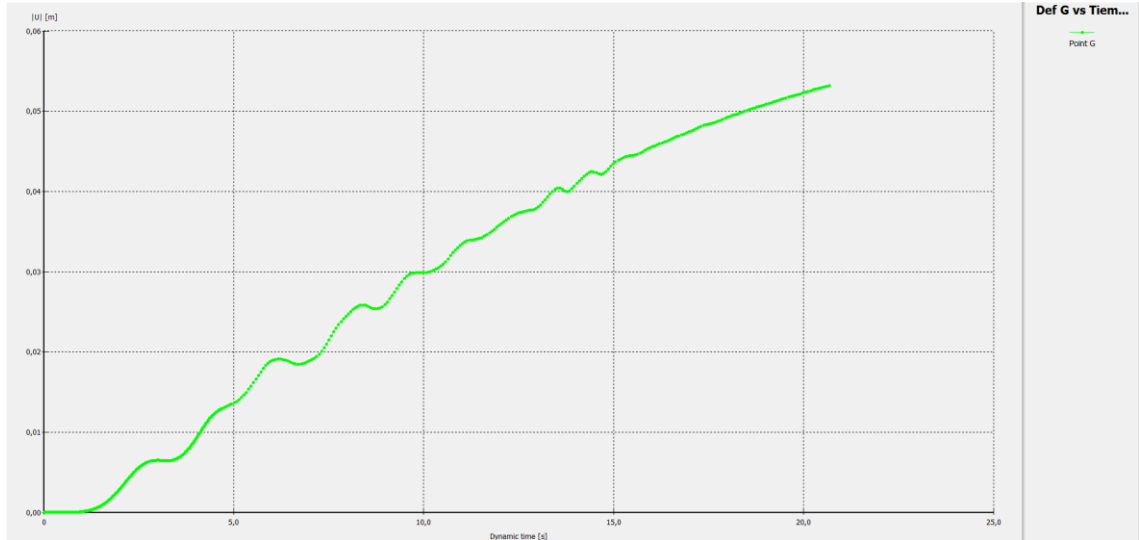


Figura 5.13 Curva de deformación total (G) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la deformación total en el punto G. Se observa que con el pasar del tiempo la deformación en el punto G tiende a aumentar y al final del análisis alcanza una deformación de alrededor de 0.05 m.

5.7 Curva de Velocidades Totales (A – G) vs. Tiempo

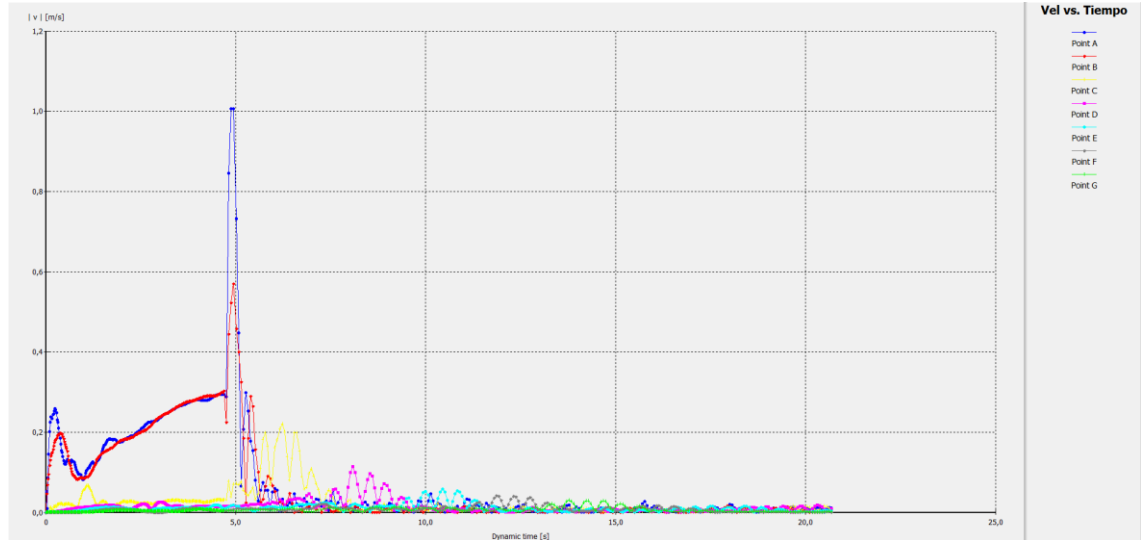


Figura 5.14 Curva de velocidades totales (A – G) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las velocidades totales en los siete diferentes puntos a lo largo de la geometría, siendo el punto A la curva de color azul, el punto B la curva de color rojo, el punto C la curva de color amarillo, el punto D la curva de color magenta, el punto E la curva de color cian, el punto F la curva de color gris, y el punto G la curva de color verde. Se puede observar que en el punto A, es decir, en el centro del edificio a la altura del sótano, las velocidades totales serán mayores que en cualquier otro punto.

5.7.1 Curva de Velocidad (A) vs. Tiempo

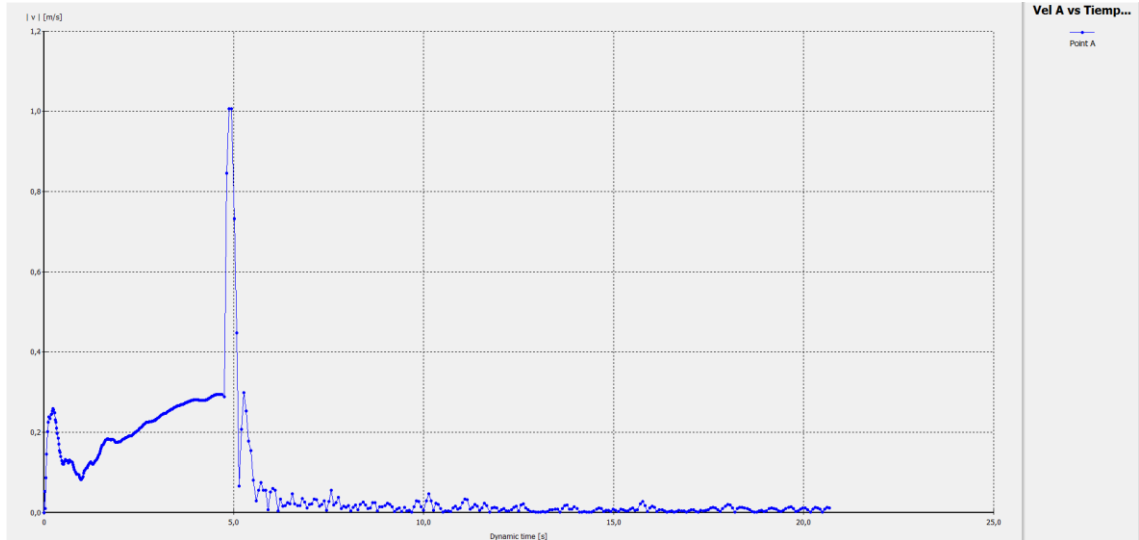


Figura 5.15 Curva de velocidad total (A) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto A. Se observa que después de un par de décimas de segundos aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto A es máxima con una magnitud apenas mayor que 1.0 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.2 Curva de Velocidad (B) vs. Tiempo

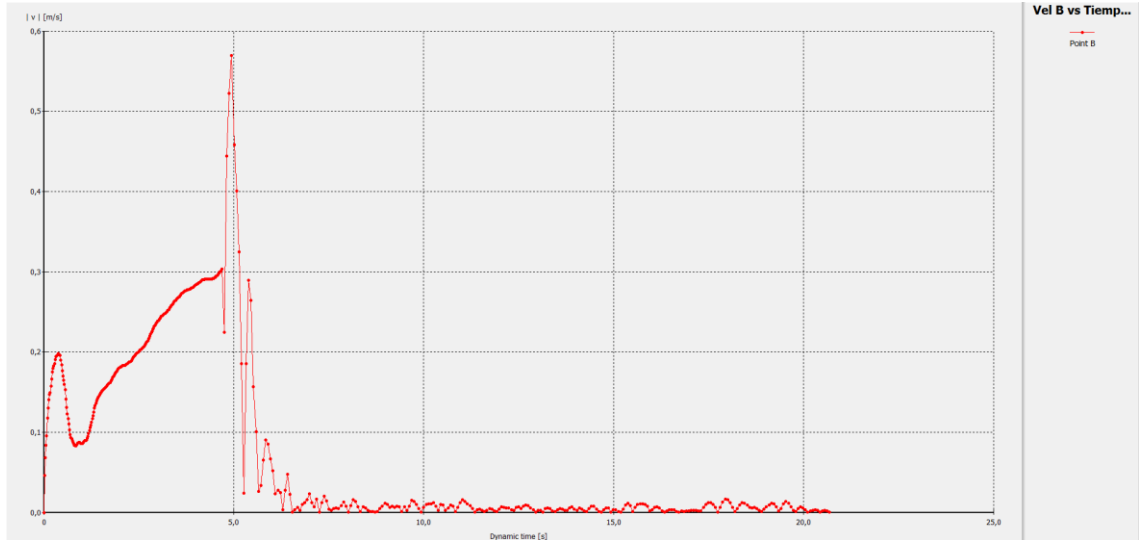


Figura 5.16 Curva de velocidad total (B) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto B. Se observa que después de un par de décimas de segundos aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto B es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.55 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.3 Curva de Velocidad (C) vs. Tiempo

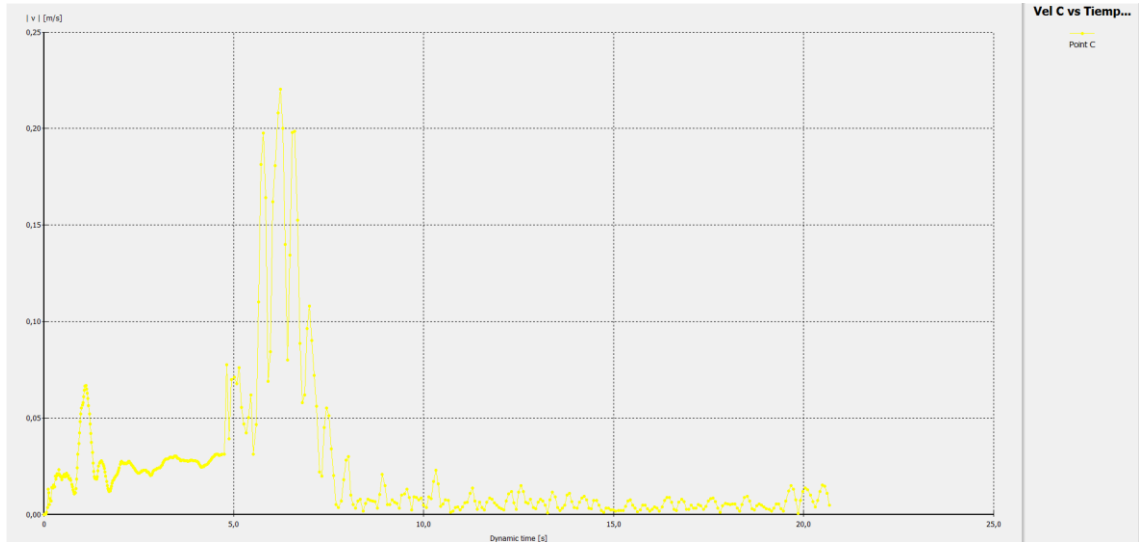


Figura 5.17 Curva de velocidad total (C) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto C. Se observa que después de un segundo aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto C es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.22 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.4 Curva de Velocidad (D) vs. Tiempo

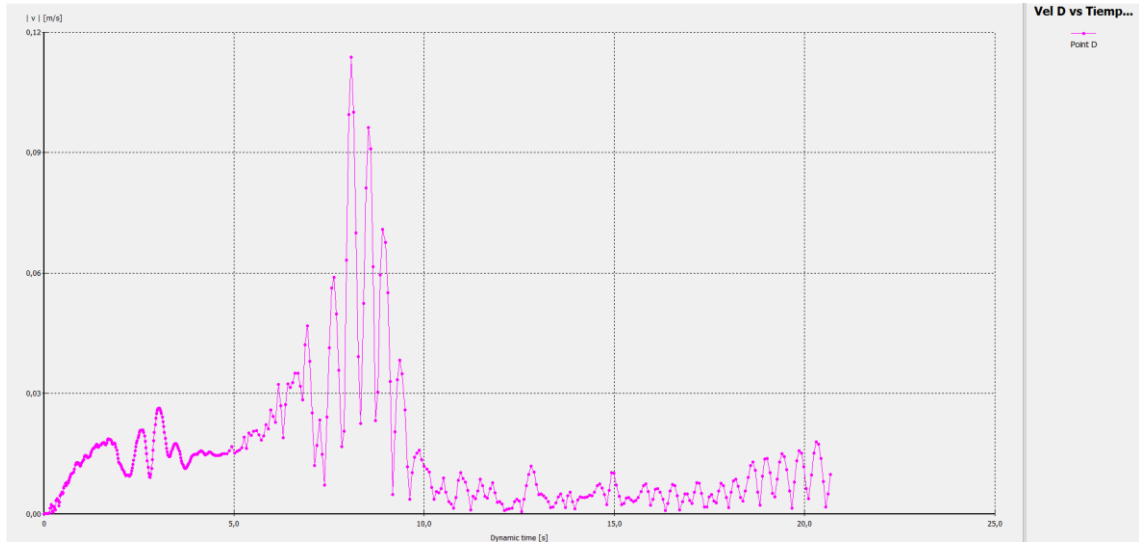


Figura 5.18 Curva de velocidad total (D) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto D. Se observa que después de aproximadamente 3 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto D es máxima con una magnitud del orden de 0.11 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.5 Curva de Velocidad (E) vs. Tiempo

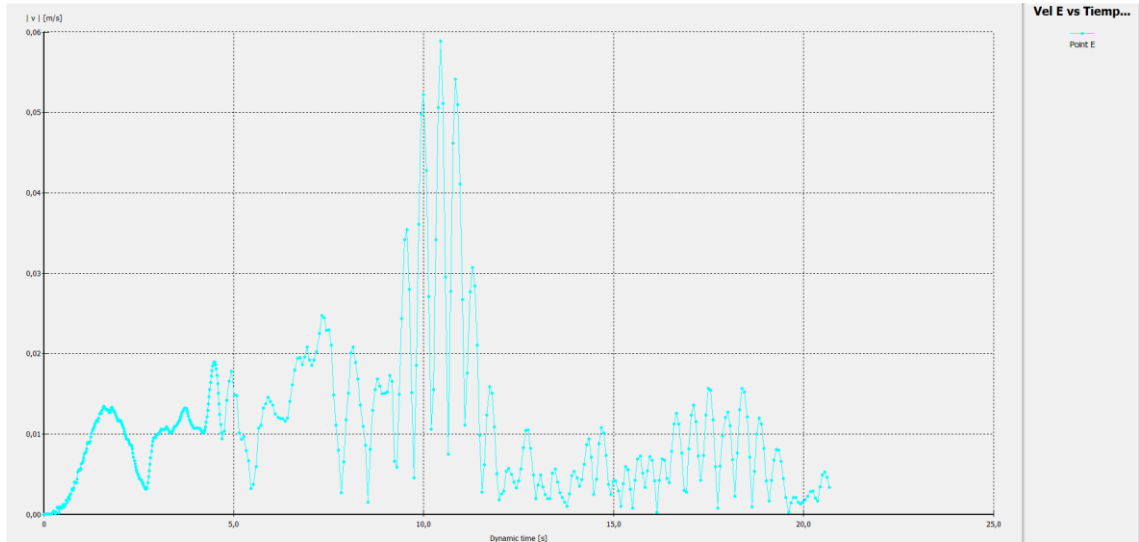


Figura 5.19 Curva de velocidad total (E) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto E. Se observa que después de aproximadamente 6 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto E es máxima con una magnitud cercana a 0.06 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.6 Curva de Velocidad (F) vs. Tiempo

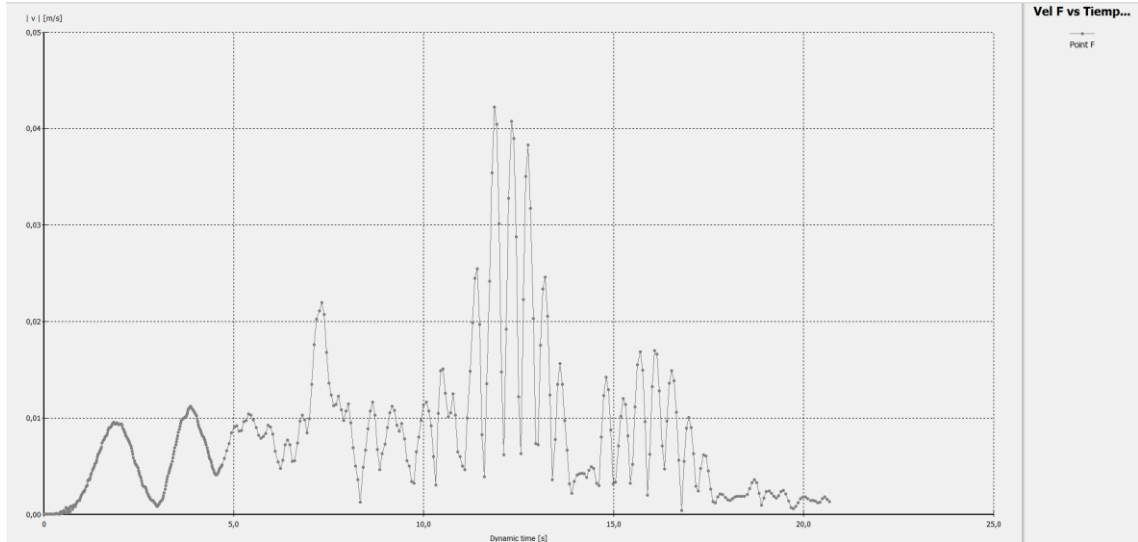


Figura 5.20 Curva de velocidad total (F) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto F. Se observa que después de unos 7 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto F es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.04 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.7.7 Curva de Velocidad (G) vs. Tiempo

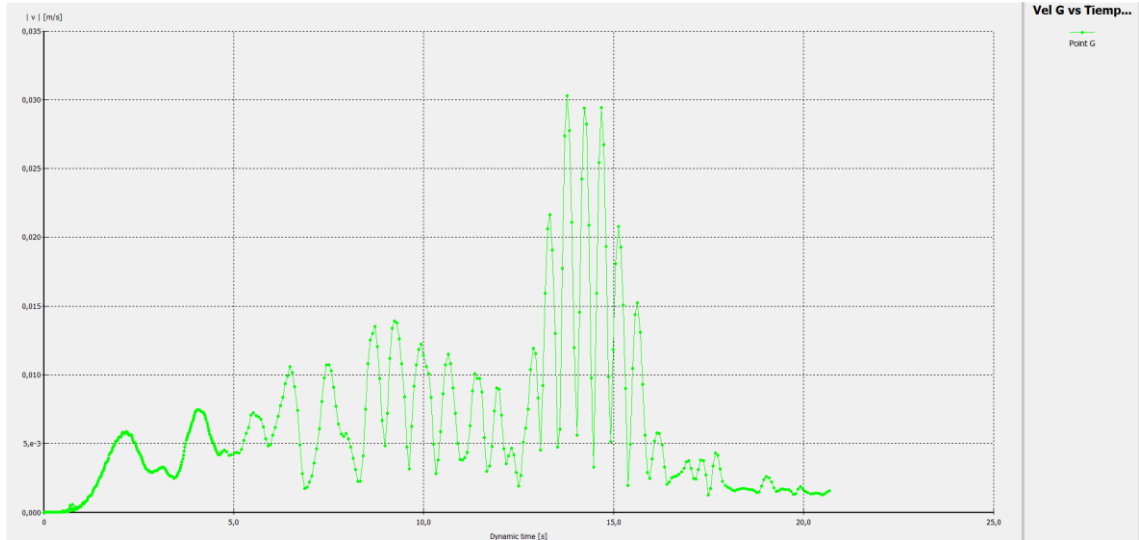


Figura 5.21 Curva de velocidad total (G) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la velocidad total en el punto G. Se observa que después de unos 8 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto G es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.03 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.8 Curva de Aceleraciones Totales (A – G) vs. Tiempo

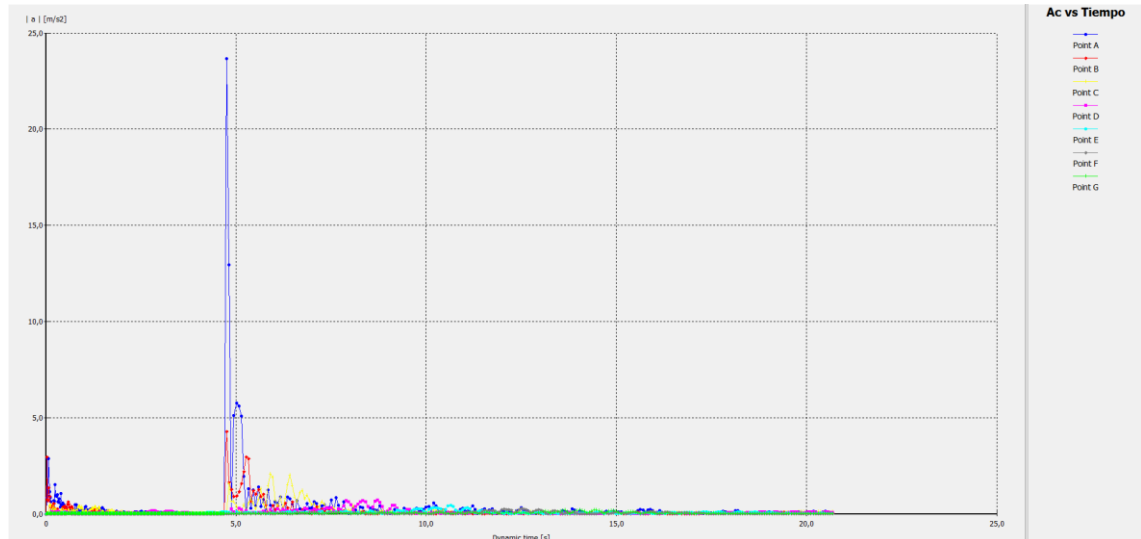


Figura 5.22 Curva de aceleraciones totales (A – G) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las aceleraciones totales en los siete diferentes puntos a lo largo de la geometría, siendo el punto A la curva de color azul, el punto B la curva de color rojo, el punto C la curva de color amarillo, el punto D la curva de color magenta, el punto E la curva de color cian, el punto F la curva de color gris, y el punto G siendo la curva de color verde. Se puede observar que en el punto A, es decir, en el centro del edificio a la altura del sótano, las aceleraciones totales serán mayores que en cualquier otro punto.

5.8.1 Curva de Aceleración (A) vs. Tiempo

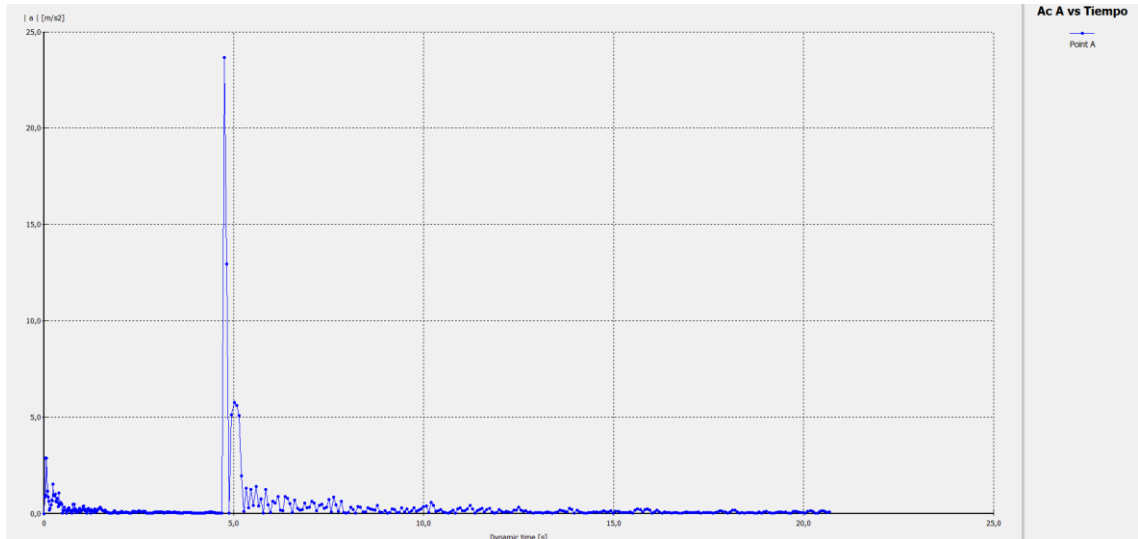


Figura 5.23 Curva de aceleración total (A) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto A. Se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto A es máxima con una magnitud del orden de 24.0 m/s^2 . , esto es, casi 2.5 veces la gravedad. Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.2 Curva de Aceleración (B) vs. Tiempo

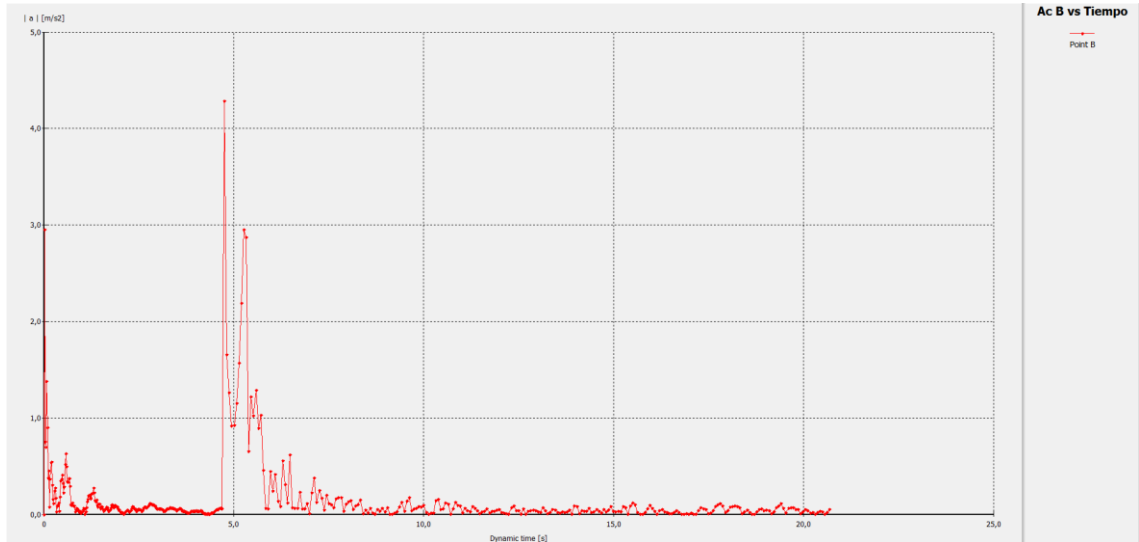


Figura 5.24 Curva de aceleración total (B) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto B. Se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto B es máxima con una magnitud de aproximadamente 4.3 m/s^2 , algo menor a la mitad de la gravedad. Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.3 Curva de Aceleración (C) vs. Tiempo

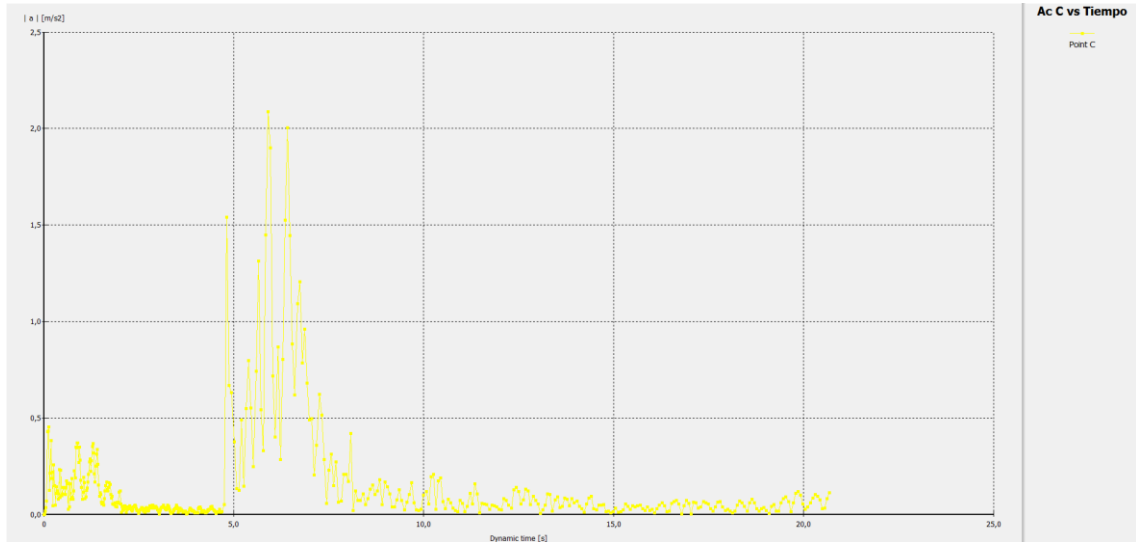


Figura 5.25 Curva de aceleración total (C) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto C. Se observa que después de un segundo aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto C es máxima con una magnitud de aproximadamente 2.1 m/s^2 o un 22% de la gravedad. Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.4 Curva de Aceleración (D) vs. Tiempo

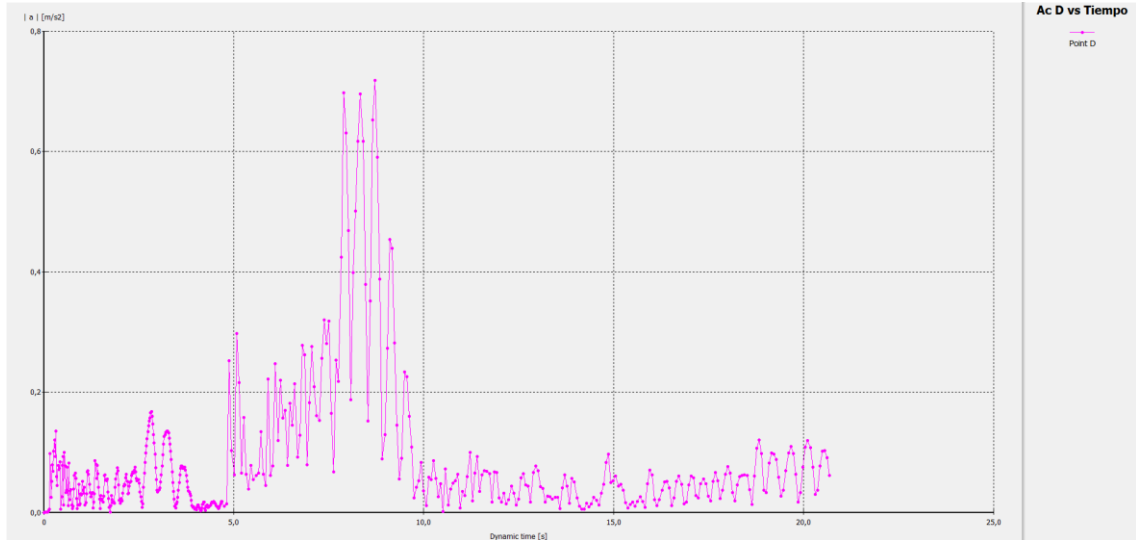


Figura 5.26 Curva de aceleración total (D) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto D. Se observa que después de 4 segundos aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto D es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.72 m/s^2 . (7.3% de la gravedad). Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.5 Curva de Aceleración (E) vs. Tiempo

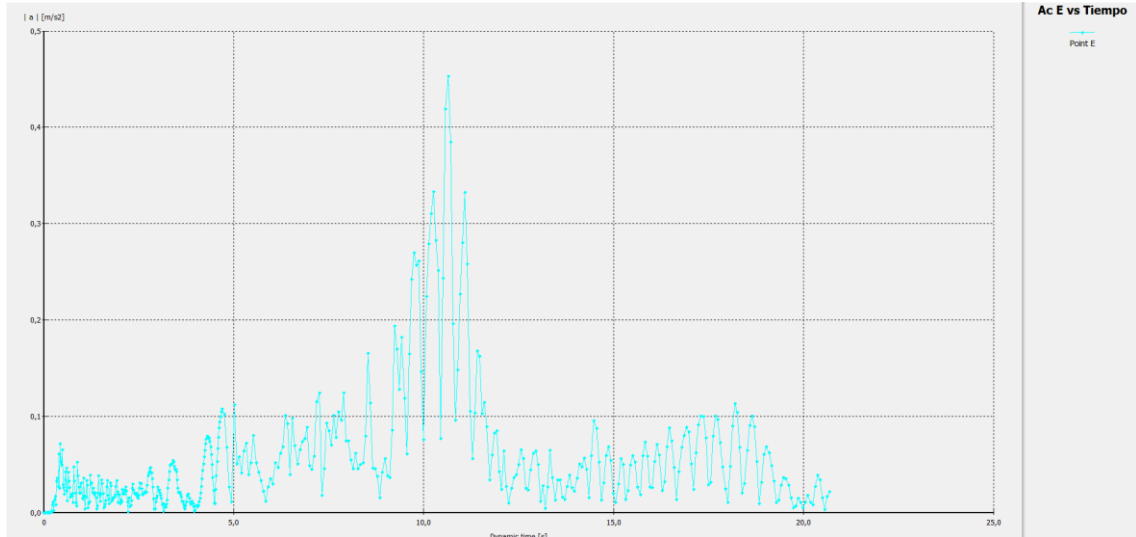


Figura 5.27 Curva de aceleración total (E) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto E. Se observa que después de unos 6 segundos aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto E es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.45 m/s^2 (4.6% de la gravedad) Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.6 Curva de Aceleración (F) vs. Tiempo

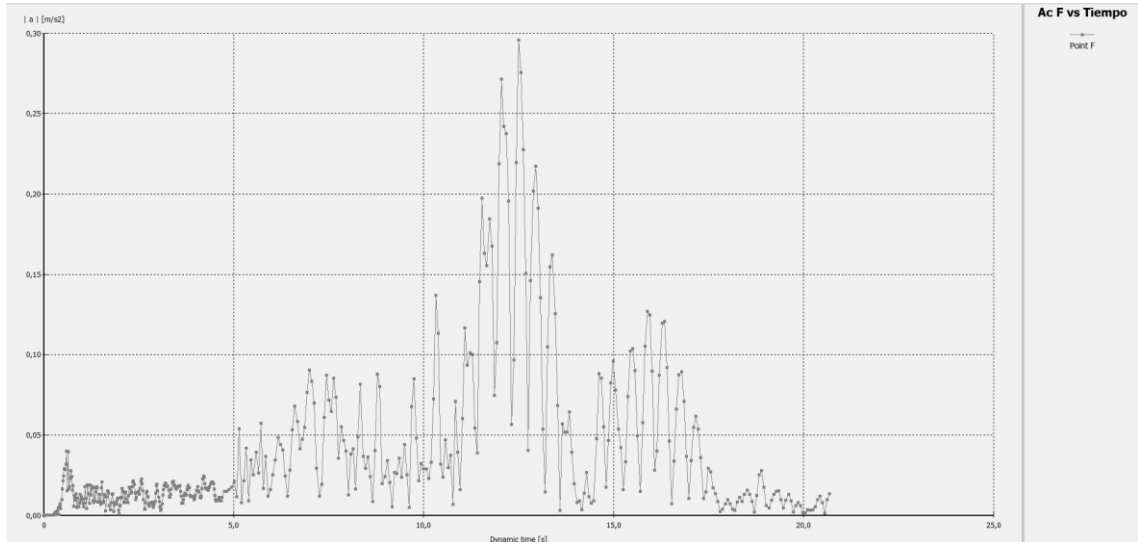


Figura 5.28 Curva de aceleración total (F) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto F. Se observa que después de unos 8 segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto F es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.30 m/s^2 (3% de la gravedad) Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.8.7 Curva de Aceleración (G) vs. Tiempo

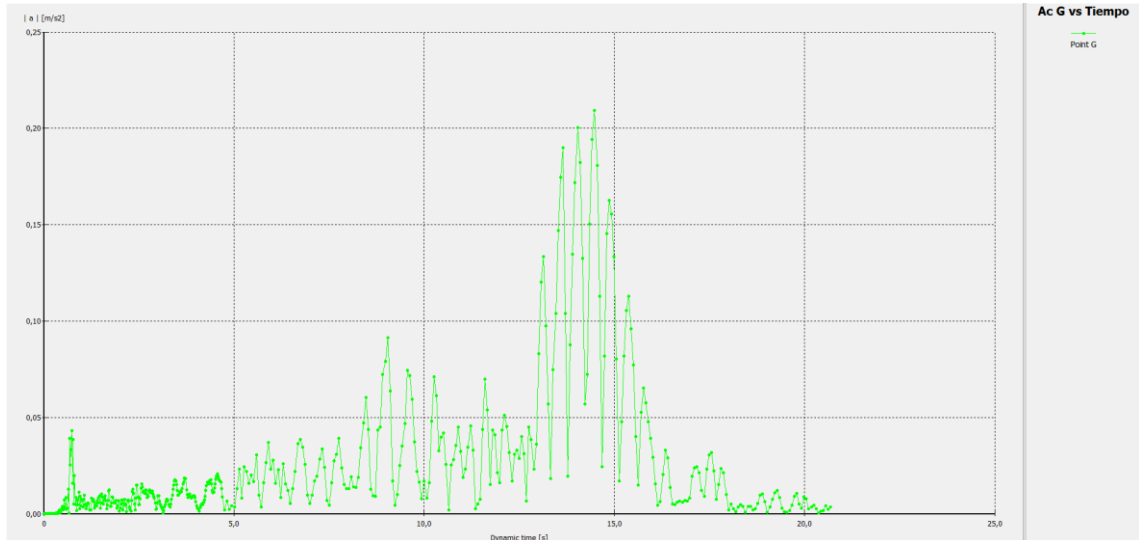


Figura 5.29 Curva de aceleración total (G) vs. Tiempo

Éste gráfico muestra la aceleración total en el punto G. Se observa que después de unos 10 segundos aproximadamente en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto G es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.21 m/s^2 (2.2% de la gravedad) Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.9 Puntos Adicionales (H – I – J)

Debido a que hay una amplia diferencia en desplazamientos entre el punto B y el C, se decidió incrementar tres puntos intermedios para saber cómo se comporta el suelo muy cercano al edificio. El punto H (20.0, 0.0) está ubicado en la superficie a 2 metros del borde del edificio, el punto I (23.0, 0.0) está ubicado en la superficie a 5 metros del borde del edificio y el punto J (33.0, 0.0) está ubicado en la superficie a 15 metros del borde del edificio.

5.9.1 Curva de Deformaciones Totales (H – I – J) vs. Tiempo

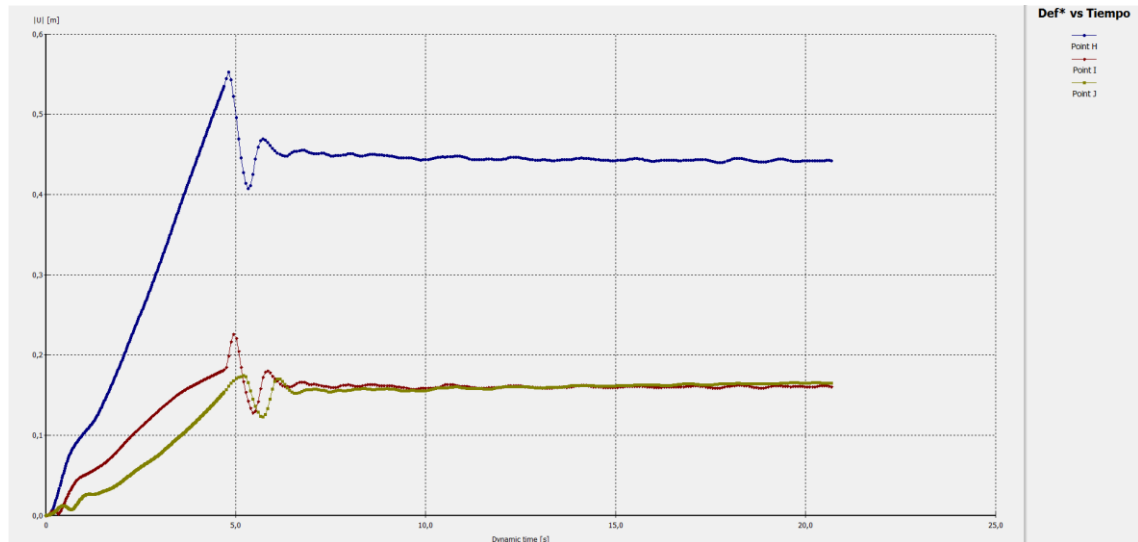


Figura 5.30 Curva de deformaciones totales (H – I – J) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las deformaciones en los tres puntos adicionales, siendo el punto H la curva de color azul oscuro, el punto I la curva de color rojo oscuro, y el punto J la curva de color amarillo oscuro. Se puede observar que en el punto H, es decir, a 2 metros del borde del edificio, las deformaciones serán mayores en comparación con los otros puntos. También se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación en el punto H es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.55 m. Luego con el pasar del tiempo queda una deformación remanente de alrededor de 0.44 m. En el punto I, en cambio, se observa que después de un par de décimas de segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.23 m. Luego con el pasar del tiempo queda una deformación remanente de alrededor de 0.16 m. Finalmente, en el punto J se observa que después de un par de décimas de segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la deformación es máxima con una magnitud de

aproximadamente 0.17 m. Luego con el pasar del tiempo queda una deformación remanente de alrededor de 0.159 m. Estos resultados sugieren que las mayores deformaciones permanentes ocurren dentro de un radio de 20 metros alrededor del eje del edificio.

5.9.2 Curva de Velocidades Totales (HIJ) vs. Tiempo

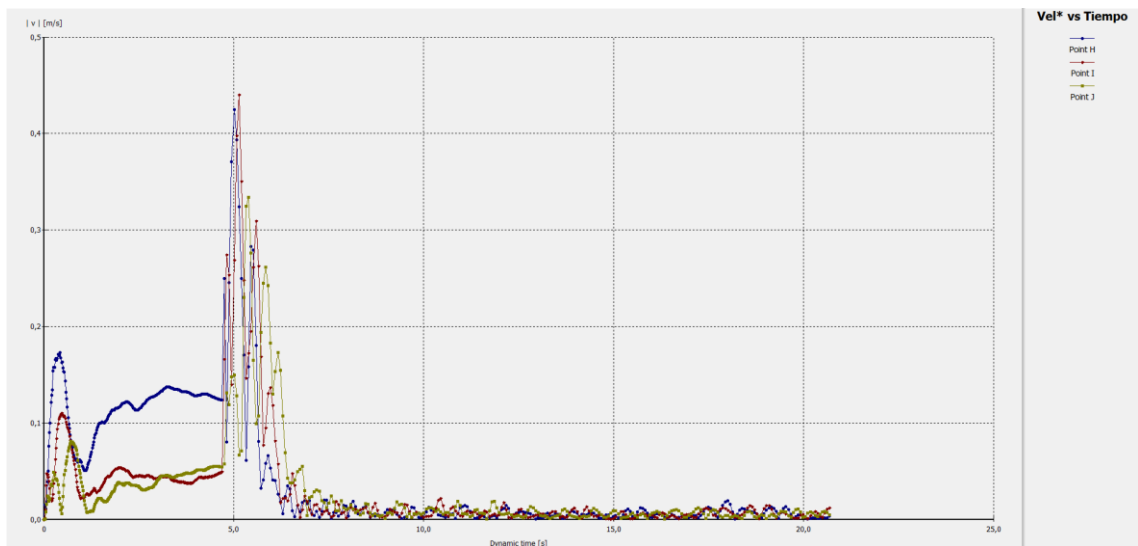


Figura 5.31 Curva de velocidades totales (H – I – J) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las velocidades en los tres puntos adicionales, siendo el punto H la curva de color azul oscuro, el punto I la curva de color rojo oscuro, y el punto J la curva de color amarillo oscuro. Se observa que después de un par de décimas de segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad en el punto H es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.43 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando. En el punto I, en cambio, se observa que después de un par de décimas de segundos en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad es máxima con una magnitud del orden de 0.44 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando. En el punto J finalmente

se observa que después de aproximadamente un segundo en que termina de actuar la carga dinámica, la velocidad es máxima con una magnitud de aproximadamente 0.33 m/s. Luego con el pasar del tiempo la velocidad se va amortiguando.

5.9.3 Curva de Aceleraciones Totales (HIJ) vs. Tiempo

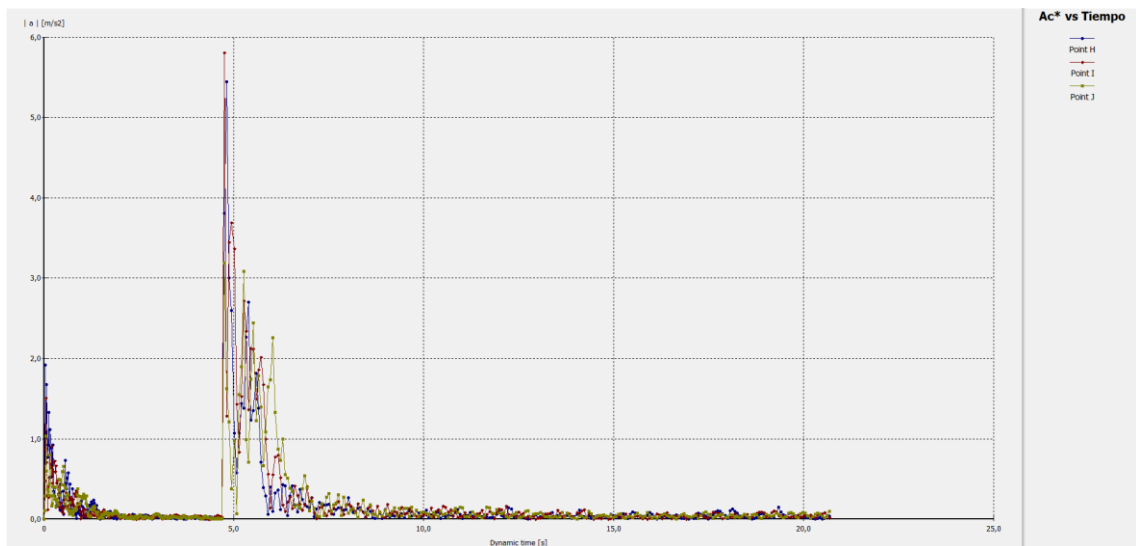
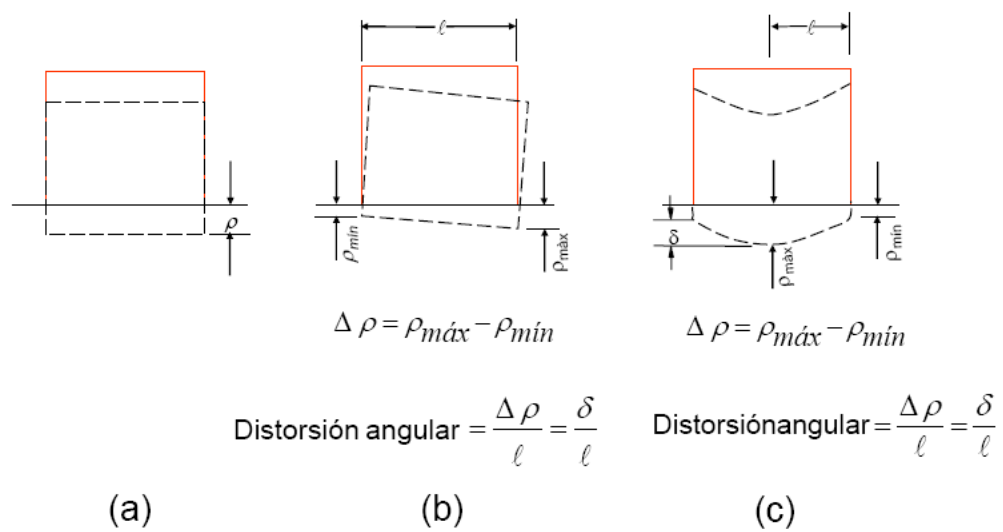


Figura 5.32 Curva de aceleraciones totales (H – J) vs. Tiempo

En éste gráfico se muestran las aceleraciones en los tres puntos adicionales, siendo el punto H la curva de color azul oscuro, el punto I la curva de color rojo oscuro, y el punto J la curva de color amarillo oscuro. Se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración en el punto H es máxima con una magnitud de aproximadamente 5.44 m/s^2 . Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando. En el punto I, en cambio, se observa que al mismo tiempo en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración es máxima con una magnitud de aproximadamente 5.80 m/s^2 . Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando. En el punto J finalmente se observa que al mismo tiempo

en que termina de actuar la carga dinámica, la aceleración es máxima con una magnitud de aproximadamente 3.19 m/s^2 . Luego con el pasar del tiempo la aceleración se va amortiguando.

5.10 Cálculo de Distorsión Angular



TIPOS DE ASENTAMIENTO: a) ASENTAMIENTO UNIFORME b) VOLTEO c) ASENTAMIENTO NO UNIFORME

Figura 5.33 Tipos de asentamiento

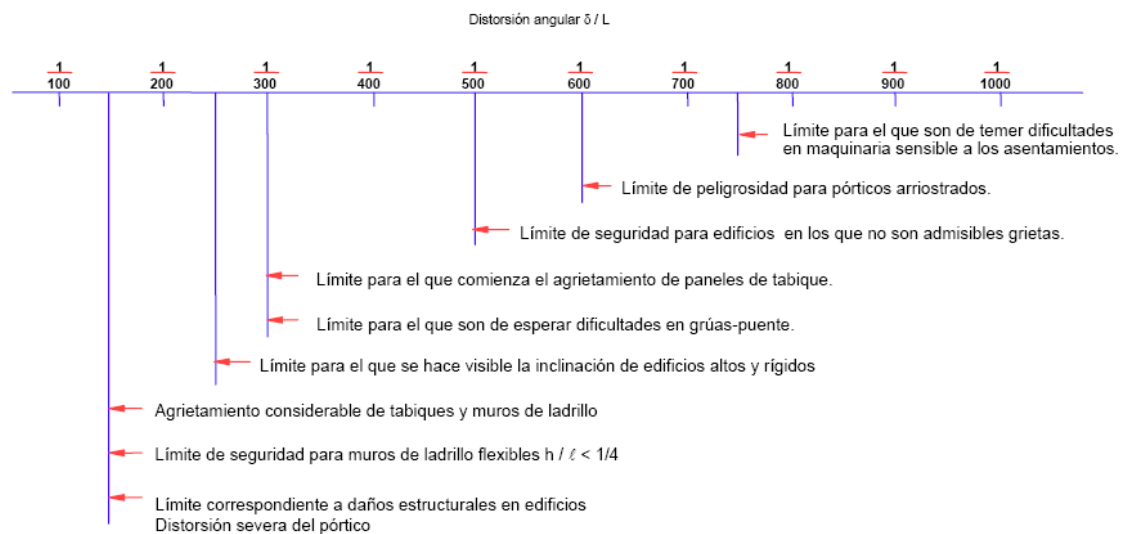
En la anterior figura se muestran tres tipos de asentamiento:

- a) Asentamiento Uniforme: El edificio se asienta la misma cantidad en el borde izquierdo como en el derecho.
- b) Volteo: El edificio se asienta más en el borde izquierdo que en el derecho o viceversa.

c) Asentamiento no Uniforme: El edificio se asienta más en el centro que en los bordes o viceversa.

Al conocer cuánto se ha asentado cada punto, se puede calcular la distorsión angular entre dos puntos sucesivos dividiendo la diferencia de asentamiento (asentamiento diferencial) para la distancia entre ellos.

Según Bjerrum (1963), existen límites máximos de distorsión angular en los cuales ocurren diferentes escenarios dependiendo de su magnitud. Los límites más utilizados en Ingeniería son el 1/300 (0.0033), para el que comienza el agrietamiento de paneles de tabique y mampostería, y el 1/150 (0.0066), para el que ocurren daños estructurales en edificios.



Ref. (Bjerrum, 1963)

Figura 5.34 Límites de distorsión angular

A continuación se realizarán cálculos de distorsión entre cada punto escogido (A – J) sucesivamente para luego saber si alguno sobrepasa cualquiera de los dos límites anteriormente mencionados.

5.10.1 Distorsión entre el punto A y B

$$\frac{\delta_{A-B}}{l} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$$

$$\frac{\delta_{A-B}}{l} = \frac{0.76 - 0.72}{18 - 0}$$

$$\left| \frac{\delta_{A-B}}{l} \right| = 0.0022$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto A y B, es decir, entre el centro del sótano del edificio y el borde del mismo. Para unos asentamientos diferenciales de 0.04 metros y para una longitud entre ambos puntos de 18 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre A y B es de 0.0022. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular antes determinado aunque entre estos dos puntos no interesa saberlo, ya que es aquí donde caerá el edificio. El mayor daño entre el punto A y B será por el impacto directo del edificio y por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto.

5.10.2 Distorsión entre el punto B y H

$$\frac{\delta_{B-H}}{l} = \frac{y_H - y_B}{x_H - x_B}$$

$$\frac{\delta_{B-H}}{l} = \frac{0.44 - 0.76}{20 - 18}$$

$$\left| \frac{\delta_{B-H}}{l} \right| = 0.16$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto B y H, es decir, entre el borde del sótano del edificio y a dos metros del borde del edificio. Para objeto de cálculo se asume que los asentamientos en el punto H a la altura del sótano serán los mismos que en la superficie y por esto, se considerará la longitud horizontal entre el punto B y la proyección del punto H a la altura del sótano. Para unos asentamientos diferenciales de 0.32 metros y para una longitud entre ambos puntos de 2 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre B y H es de 0.16. Éste valor sobrepasa todos los límites de distorsión angular y se estima que ocurran serios problemas estructurales, en cualquier estructura que se encuentre entre estos dos puntos.

5.10.3 Distorsión entre el punto H e I

$$\frac{\delta_{H-I}}{l} = \frac{y_I - y_H}{x_I - x_H}$$

$$\frac{\delta_{H-I}}{l} = \frac{0.16 - 0.44}{23 - 20}$$

$$\left| \frac{\delta_{H-I}}{l} \right| = 0.0933$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto H e I, es decir, entre los 20 y 23 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.28 metros y para una longitud entre ambos puntos de 3 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre H e I es de 0.0933. Éste valor sobrepasa todos los límites de distorsión angular y se estima que ocurran serios problemas estructurales en las estructuras existentes entre estos dos puntos.

5.10.4 Distorsión entre el punto I y J

$$\frac{\delta_{I-J}}{l} = \frac{y_J - y_I}{x_J - x_I}$$

$$\frac{\delta_{I-J}}{l} = \frac{0.159 - 0.16}{33 - 23}$$

$$\left| \frac{\delta_{I-J}}{l} \right| = 0.0001$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto I y J, es decir, entre los 23 y 33 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.001 metros y para una longitud entre ambos puntos de 10 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre I y J es de 0.0001. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto I y J será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.10.5 Distorsión entre el punto J y C

$$\frac{\delta_{J-C}}{l} = \frac{y_C - y_J}{x_C - x_J}$$

$$\frac{\delta_{J-C}}{l} = \frac{0.12 - 0.159}{50 - 33}$$

$$\left| \frac{\delta_{J-C}}{l} \right| = 0.0023$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto J y C, es decir, entre los 33 y 50 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.039 metros y para una longitud entre ambos puntos de 17 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre J y C es de 0.0023. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular antes determinado y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto J y C será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.10.6 Distorsión entre el punto C y D

$$\frac{\delta_{C-D}}{l} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C}$$

$$\frac{\delta_{C-D}}{l} = \frac{0.08 - 0.12}{100 - 50}$$

$$\left| \frac{\delta_{C-D}}{l} \right| = 0.0008$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto C y D, es decir, entre los 50 y 100 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.04 metros y para una longitud entre ambos puntos de 50 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre C y D es de 0.0008. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto C y D será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.10.7 Distorsión entre el punto D y E

$$\frac{\delta_{D-E}}{l} = \frac{y_E - y_D}{x_E - x_D}$$

$$\frac{\delta_{D-E}}{l} = \frac{0.07 - 0.08}{150 - 100}$$

$$\left| \frac{\delta_{D-E}}{l} \right| = 0.0002$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto D y E, es decir, entre los 100 y 150 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.01 metros y para una longitud entre ambos puntos de 50 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre D y E es de 0.0002. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto D y E será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.10.8 Distorsión entre el punto E y F

$$\frac{\delta_{E-F}}{l} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E}$$

$$\frac{\delta_{E-F}}{l} = \frac{0.06 - 0.07}{200 - 150}$$

$$\left| \frac{\delta_{E-F}}{l} \right| = 0.0002$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto E y F, es decir, entre los 150 y 200 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.01 metros y para una longitud entre ambos puntos de 50 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre E y F es de 0.0002. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto E y F será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.10.9 Distorsión entre el punto F y G

$$\frac{\delta_{F-G}}{l} = \frac{y_G - y_F}{x_G - x_F}$$

$$\frac{\delta_{F-G}}{l} = \frac{0.05 - 0.06}{250 - 200}$$

$$\left| \frac{\delta_{F-G}}{l} \right| = 0.0002$$

Se calcula la distorsión angular entre el punto F y G, es decir, entre los 200 y 250 metros del eje del edificio. Para unos asentamientos diferenciales de 0.01 metros y para una longitud entre ambos puntos de 50 metros, el valor absoluto de la distorsión angular entre F y G es de 0.0002. Éste valor no sobrepasa ningún límite de distorsión angular y se estima que básicamente no ocurran problemas estructurales entre estos dos puntos. El mayor daño entre el punto F y G será por los asentamientos que ocurrirán debido al impacto del edificio sobre el suelo.

5.11 Velocidad Pico de Partícula (Peak Particle Velocity)

Del Apéndice A del British Standard (BS 5228-4:1992) traducido al español:

Las vibraciones pueden ser categorizadas en:

- a) vibraciones continuas, en las cuales la variación cíclica en la amplitud es repetida varias veces;
- b) vibraciones transitorias, en las cuales la variación cíclica en la amplitud alcanza un pico y luego decae hacia cero relativamente rápido;
- c) vibraciones intermitentes, en las cuales una secuencia (a veces regular, a veces irregular) de vibraciones transitorias ocurren pero con suficientes intervalos entre eventos consecutivos para permitir que la amplitud disminuya a un nivel insignificante en los periodos intermedios.

Con las velocidades obtenidas de los gráficos en los puntos A – J, se observa que no habrá ninguna de las vibraciones anteriormente descritas, ya que las velocidades obtenidas solo tienen un pico y luego se disipan en poco tiempo a valores muy pequeños. Es decir, no hay eventos consecutivos sino un evento aislado que es el impacto del edificio sobre el suelo.

Es por esto que se considera poco probable la generación de daños en las estructuras por efecto de las velocidades pico de partícula, salvo en estructuras que se encuentren con una seguridad muy precaria, que sí podrían existir en la zona.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que el nivel de deformaciones en el sótano del edificio es importante, porque se asentaría entre 72 y 76 centímetros, así como también en los 2 metros adyacentes al borde del edificio, los cuales se asentarían aproximadamente 44 centímetros. Es decir, en los primeros 20 metros, desde el eje central del edificio, se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 76 y 44 centímetros. Entre los 20 y 50 metros del eje del edificio, se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 44 y 12 centímetros. Entre los 50 y 100 metros del eje del edificio se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 12 y 8 centímetros. Entre los 100 y 150 metros del eje del edificio se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 8 y 7 centímetros. Entre los 150 y 200 metros del eje del edificio se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 7 y 6 centímetros. Y finalmente, entre los 200 y 250 metros del eje del edificio se esperan niveles de asentamiento de un rango de entre 6 y 5 centímetros. Con los gráficos de velocidades y de aceleraciones se puede determinar que una vez que la carga dinámica actúa, ésta se disipa rápidamente con el tiempo (sólo se consideró el amortiguamiento geométrico, ya que se asumió no importante el amortiguamiento por la viscosidad del suelo).

Por el cálculo de distorsión angular se puede concluir que en los 5 metros adyacentes al borde del edificio se sobrepasarán los límites de distorsión angular, con lo cual ocurrirían serios problemas estructurales en las estructuras muy cercanas.

Sin embargo, se considera poco probable la generación de daños en las estructuras por efecto de las velocidades pico de partícula, salvo en estructuras que se encuentren con una seguridad muy precaria.

Éste trabajo de grado espera ser un aporte para mejor toma de decisiones y un mejor accionar al momento de realizar la implosión del edificio. Es una herramienta, que aunque tiene limitaciones en el modelo, permite estimar con cierta precisión el nivel de daños que causará la implosión del edificio del MAGAP en el suelo adyacente.

El presente trabajo, se puede complementar a futuro con investigaciones que se lleven a cabo, especialmente orientadas a obtener una mejor definición de las propiedades del suelo en el sitio, y a una mejor definición de la fuerza de impacto por el método de implosión, para una mayor exactitud en los resultados a obtenerse.

RECOMENDACIONES

El presente análisis, tiene ciertas limitaciones debido a las asunciones que se realizaron en algunos de los procedimientos y parámetros. Si bien no son exactos, se estima que los resultados están muy cercanos a la realidad. Para un análisis más exacto aún, se pudo haber utilizado el módulo de PLAXIS en 3D ya que el suelo no es uniforme radialmente, el edificio tampoco es perfectamente simétrico, ya que tiene un mezzanine rectangular en los primeros cinco pisos, y el edificio está apoyado sobre pilotes.

Durante el cálculo de la fuerza dinámica se asumió el método de implosión, la carga muerta por piso, el área equivalente de la mezzanine, la altura de acumulación de los escombros por piso, el tiempo de retraso entre explosivos, la distancia de desaceleración y la aproximación de la curva del medio seno equivalente vs. tiempo a la curva fuerza de impacto vs. tiempo. Los parámetros del suelo se estimaron con solo un sondeo cercano al edificio que se tenía a disposición. No se consideró el amortiguamiento por el comportamiento viscoso del suelo, aunque sí el más importante amortiguamiento por geometría, por lo que esta simplificación, se espera no afecte mayormente los resultados.

Hubo dificultades al tratar de conseguir planos e información por parte del MAGAP, así como también al buscar información sobre el tema en español, ya que es relativamente nuevo en nuestro medio.

En el capítulo 9 “Practical measures to reduce vibration” (*Medidas prácticas para reducir vibraciones*) del British Standard (BS 5228-4:1992) traducido al español, se hacen recomendaciones de cómo reducir los niveles de vibraciones transmitidas, como por ejemplo el uso de métodos alternativos (tratamiento del suelo, demolición con bola de acero), eliminación de obstrucciones (cimentaciones antiguas y sótanos antiguos), provisión de

trincheras de corte (cercanos al emisor o al receptor de vibraciones), reducción de la emisión de energía (amortiguadores entre pisos), entre otros; que podrían ser utilizados para amortiguar el efecto de la carga de impacto en el suelo adyacente.

En un artículo de la revista "Civil Engineering" de Diciembre del 2007 (pág. 50-55 y 71) llamado *Demolition by Design*, se habla de un masivo garaje de parqueos en la ciudad de New Haven, Connecticut, que debía demolerse y para prevenir el daño de tuberías de desagüe, alcantarillas sanitarias, telecomunicaciones y líneas eléctricas alrededor se tuvo que diseñar un esquema preciso de demolición para protegerlas. Entre las soluciones están la reutilización del material sacado del sitio y una enorme cantidad de llantas usadas puestas en la losa inferior del sótano para amortiguar la caída de los escombros.

La utilización de varios niveles de mallas de amortiguamiento para controlar la caída de rocas, fijadas a la estructura perimetral del sótano, también debe ser considerada. Existen por ejemplo sistemas de barrera RXI, las cuales consisten de una red de anillos flexibles que absorben energía por deformación elástica y plástica, y que otorgan una protección máxima contra caída de rocas.



Figura 7.1 Protección contra caída de rocas

Queda abierta la posibilidad de que a futuro se pueda ampliar éste análisis. Así también, cuando el edificio llegue a ser demolido (si es que así ocurre finalmente), deben realizarse mediciones de las deformaciones, velocidades, aceleraciones, asentamientos y distorsiones angulares para comparar con los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado y así proceder a la calibración de los parámetros y procedimientos utilizados en los análisis.

BIBLIOGRAFÍA

Plaxis BV (2007), *Plaxis Version 8 General Info Manual*. Delft: Plaxis BV.

Plaxis BV (2007), *Plaxis Version 8 Dynamics Manual*. Delft: Plaxis BV.

Plaxis BV (2007), *Plaxis Version 8 Material Models Manual*. Delft: Plaxis BV.

Plaxis BV (2007), *Plaxis Version 8 Tutorial Manual*. Delft: Plaxis BV.

EL UNIVERSO (2011, 11 de Junio). *20 segundos se tardará la demolición del edificio del MAGAP*. Recuperado de <http://www.eluniverso.com/2011/06/16/1/1445/20-segundos-tardara-caer-licuadora-magap.html>

Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1969), *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Terzaghi, K., Peck, R. B. & Mesri, G. (Third Edition) (1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. & Poulos, H. G. (1977), *Stress-Deformation and Strength Characteristics*. Tokyo: 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Fang, H. Y. (Second Edition) (2004), *Foundation Engineering Handbook*. New Delhi: CBS Publisher & Distributors.

BS 5228-4 (1992), *Noise control on construction and open sites*. UK. British Standards Institution.

Tang, M., Carlson, D. A., Miller, P., Goldblum, S., Paquin, G. & Ettourney, M. (December 2007). Demolition by Design. *Civil Engineering*, 50-55, 71.

ANEXOS

ANEXO 1

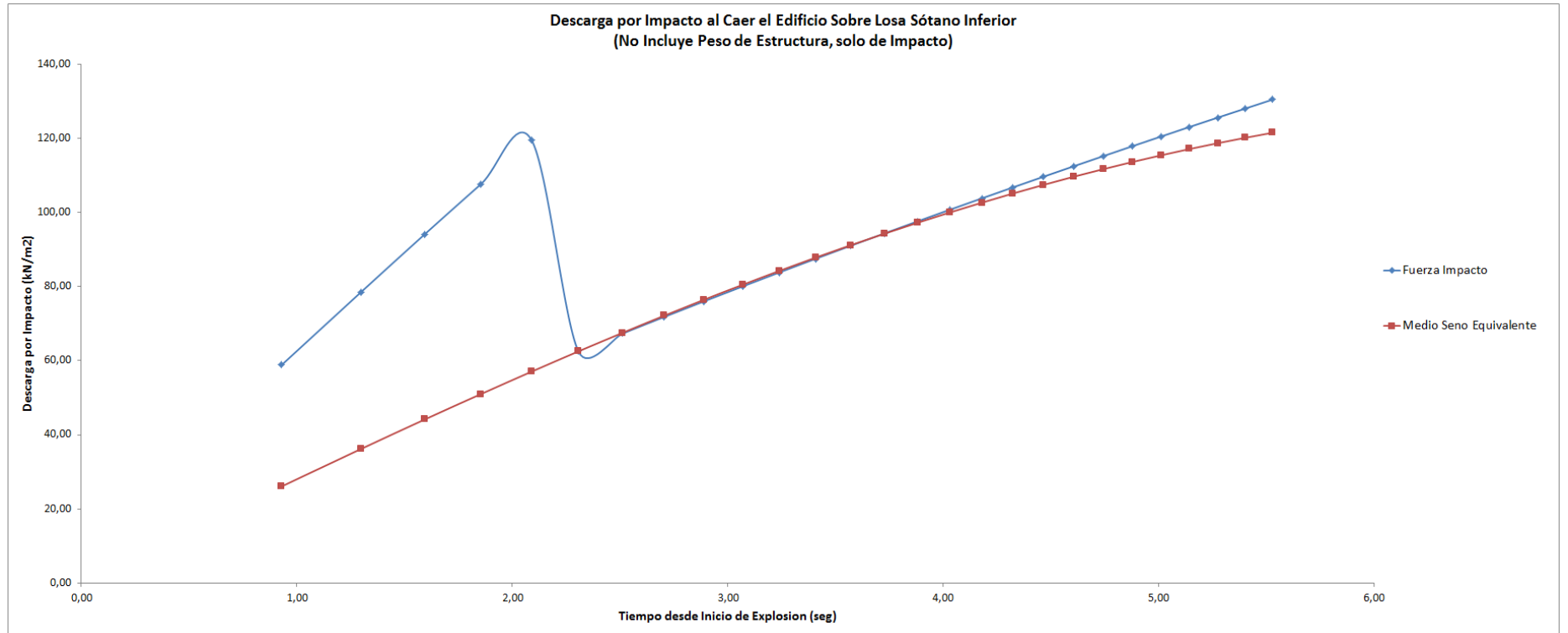
ESTIMACION DE FUERZAS DE IMPACTO POR IMPLOSION DEL EDIFICIO MAGAP

H piso= 3.5 m **Lbase1=** 58 m **A base involucrada=** 1024 m²
m base= 514 Ton **Lbase2=** 32 m **A torre=** 491 m²
m torre= 295 Ton **Dtorre=** 25 m **A equivalente =** 1024 m²
w ol= 0.6 Ton/m² **r equivalente =** 18 m
a= 100% g **N pisos=** 27
Asumo 0.4 mts de escombros / piso **ΣW piso=** 93701 Ton
Descarga Promedio en Sotano= 9150 Ton/m²

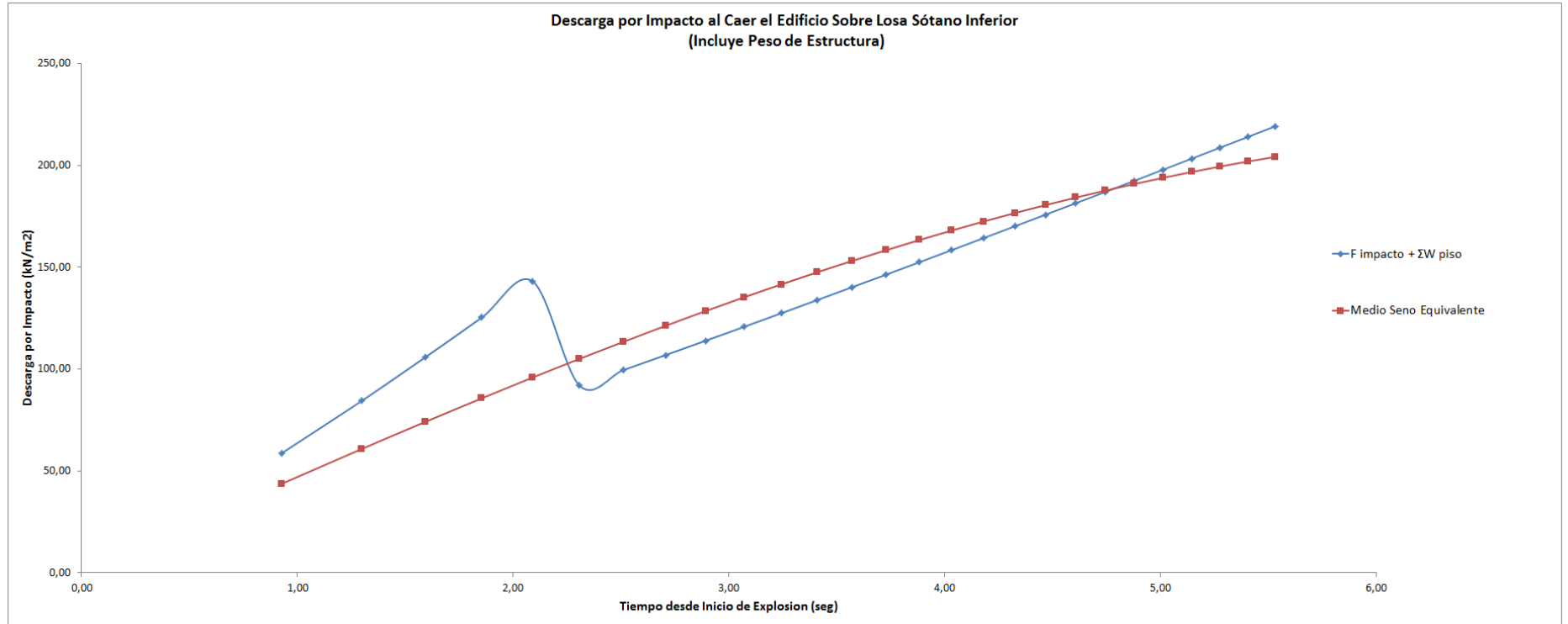
Carga Sinusoidal Equivalente
Fse = F * Seno (wt + φo)
φo = 0 rad
Periodo = 29.0 seg
Frecuencia (f) = 0.034 Hertz
Frecuencia Angular (w = 2πf) = 0.217 rad/seg

Ni (# Piso)	H (m)	W piso (kN)	ΣW piso (kN)	(2 * a * H neta) ^{1/2}		2 * H neta / v fin		Δh = Δh ₁ * (n) ^{1/2}		2 * Δh / v fin		v fin / Δt desacelerac		Fuerza Impacto	Fuerza Total F Impacto + ΣW piso	Descarga Total / Area equivalente	Descarga Total / Area equivalente	Ángulo		Medio Seno Equivalente	Medio Seno Equivalente	Medio Seno Equivalente Area equivalente	Medio Seno Equivalente Area equivalente
				a (m / seg ²)	(m)	v fin (m / seg)	Δt caída (seg)	Δt retraso inicio impact (seg)	Δh (mts)	Δt desacelerac (seg)	-a (m / seg ²)	t fin impact (seg)	radianes					grados	Sin peso				
1	3.5	6027	6027	9.81	3.5	8.29	0.84	0.00	0.84	0.35	0.084	98.1	0.93	60273	60273	58.86	58.86	0.20132	11.5	26717	44876	26.09	43.82
2	7.0	6027	12055	9.81	6.6	11.38	1.16	0.05	1.21	0.49	0.087	130.8	1.30	80368	86395	78.48	84.37	0.28101	16.1	37053	62237	36.18	60.78
3	10.5	6027	18082	9.81	9.7	13.80	1.41	0.10	1.51	0.61	0.088	157.0	1.59	96441	108496	94.18	105.95	0.34539	19.8	45235	79981	44.18	74.20
4	14.0	6027	24109	9.81	12.8	15.85	1.62	0.15	1.77	0.70	0.088	179.4	1.85	110213	128295	107.63	125.29	0.40164	23.0	52232	87732	51.01	85.68
5	17.5	6027	30136	9.81	15.9	17.66	1.80	0.20	2.00	0.78	0.089	199.3	2.09	122452	146561	119.58	143.13	0.45262	25.9	58430	98144	57.06	95.84
6	21.0	2889	33026	9.81	19.0	19.31	1.97	0.25	2.22	0.86	0.089	217.4	2.31	64032	94169	62.53	91.96	0.49983	28.6	64035	107559	62.53	105.04
7	24.5	2889	35915	9.81	22.1	20.82	2.12	0.30	2.42	0.93	0.089	234.1	2.51	68955	101981	67.34	99.59	0.54416	31.2	69170	116183	67.55	113.46
8	28.0	2889	38804	9.81	25.2	22.24	2.27	0.35	2.62	0.99	0.089	249.7	2.71	73549	109464	71.83	106.90	0.58622	33.6	73914	124152	72.18	121.24
9	31.5	2889	41693	9.81	28.3	23.56	2.40	0.40	2.80	1.05	0.089	264.4	2.89	77873	116677	76.05	113.94	0.62640	35.9	78325	131562	76.49	128.48
10	35.0	2889	44583	9.81	31.4	24.82	2.53	0.45	2.98	1.11	0.089	278.3	3.07	81969	123663	80.05	120.76	0.66501	38.1	82445	138482	80.51	135.24
11	38.5	2889	47472	9.81	34.5	26.02	2.65	0.50	3.15	1.16	0.089	291.6	3.24	85871	130453	83.86	127.40	0.70227	40.2	86305	144965	84.28	141.57
12	42.0	2889	50361	9.81	37.6	27.16	2.77	0.55	3.32	1.21	0.089	304.2	3.41	89602	137074	87.50	133.86	0.73838	42.3	89331	151055	87.82	147.51
13	45.5	2889	53251	9.81	40.7	28.26	2.88	0.60	3.48	1.26	0.089	316.4	3.57	93185	143546	91.00	140.18	0.77346	44.3	93341	156783	91.15	153.11
14	49.0	2889	56140	9.81	43.8	29.31	2.99	0.65	3.64	1.31	0.089	328.1	3.73	96635	149885	94.37	146.37	0.80763	46.3	96553	162177	94.29	158.38
15	52.5	2889	59029	9.81	46.9	30.33	3.09	0.70	3.79	1.36	0.089	339.4	3.88	99965	156105	97.62	152.45	0.84099	48.2	99579	167261	97.25	163.34
16	56.0	2889	61918	9.81	50.0	31.32	3.19	0.75	3.94	1.40	0.089	350.4	4.03	103189	162218	100.77	158.42	0.87361	50.1	102432	172053	100.03	168.02
17	59.5	2889	64808	9.81	53.1	32.28	3.29	0.80	4.09	1.44	0.089	361.0	4.18	106314	168233	103.82	164.29	0.90557	51.9	105121	176569	102.66	172.43
18	63.0	2889	67697	9.81	56.2	33.21	3.38	0.85	4.23	1.48	0.089	371.3	4.32	109351	174159	106.79	170.08	0.93632	53.7	107654	180824	105.13	176.59
19	66.5	2889	70586	9.81	59.3	34.11	3.48	0.90	4.38	1.53	0.089	381.3	4.47	112305	180002	109.67	175.78	0.96771	55.4	110039	184831	107.46	180.50
20	70.0	2889	73476	9.81	62.4	34.99	3.57	0.95	4.52	1.57	0.089	391.1	4.61	115184	185770	112.48	181.42	0.99799	57.2	112283	188599	109.65	184.18
21	73.5	2889	76365	9.81	65.5	35.85	3.65	1.00	4.65	1.60	0.089	400.6	4.74	117992	191468	115.23	186.98	1.02779	58.9	114391	192140	111.71	187.64
22	77.0	2889	79254	9.81	68.6	36.69	3.74	1.05	4.79	1.64	0.089	409.9	4.88	120735	197100	117.91	192.48	1.05714	60.6	116388	195460	113.64	190.88
23	80.5	2889	82143	9.81	71.7	37.51	3.82	1.10	4.92	1.68	0.090	419.0	5.01	123418	202672	120.53	197.92	1.08609	62.2	118219	198569	115.45	193.92
24	84.0	2889	85033	9.81	74.8	38.31	3.91	1.15	5.06	1.71	0.090	428.0	5.14	126043	208186	123.09	203.31	1.11464	63.9	119948	201474	117.14	196.75
25	87.5	2889	87922	9.81	77.9	39.09	3.99	1.20	5.19	1.75	0.090	436.7	5.27	128614	213647	125.60	208.64	1.14283	65.5	121559	204180	118.71	199.39
26	91.0	2889	90811	9.81	81.0	39.87	4.06	1.25	5.31	1.78	0.090	445.2	5.40	131136	219158	128.06	213.92	1.17068	67.1	123056	206634	120.17	201.85
27	94.5	2889	93701	9.81	84.1	40.62	4.14	1.30	5.44	1.82	0.090	453.6	5.53	133609	224420	130.48	219.16	1.19820	68.7	124442	209022	121.53	204.12

ANEXO 2



ANEXO 3



ANEXO 4

LOSA CIRCULAR DE CIMENTACION DE HORMIGON (AXI-SIMETRICO)

Modulo del Hormigon	Peso Unitario del Hormigon	Altura de Losa Circular	Ancho de Losa Circular	Altura efectiva de Hormigon Eje Neutro / m.l. Losa Circular	Area efectiva de Hormigon Eje Neutro / m.l. Losa Circular
E_c (kN / m ²)	γ_c (kN / m ³)	t (mts)	b (mts)	c / l (m ² / m)	c * b / l (m ² / m)
3,50,E+07	2,40,E+01	6,00,E-01	1,000,E+00	6,000,E-01	6,000,E-01

Peso Total / m.l. del Losa Circular	Momento Inercia Area Efectiva Hormigon a Eje Base / m.l. Losa Circular	Area Total Equiv. de Hormigon / m.l. Losa Circular	Mom. Inercia Total a Eje Neutro / m.l. de Losa Circular	Rigidez Normal / m.l. de Losa Circular	Rigidez a la Flexion / m.l.
$(b * t - A_c) * \gamma_c + A_c * \gamma_c$ (kN / m)	$c^3 / 12 * b / l$ (m ⁴ / m)	$(c * b + A_c) / l$ (m ² / m)	$(c^3 / 12 * b + A_c * j^2) / l$	$E_c * A_t$ (kN / m)	$E_c * I_t$ (kN * m ² / m)
1,440,E+01	1,800,E-02	6,000,E-01	1,800,E-02	2,100,E+07	6,300,E+05

ANEXO 5

PERFORACION ESQUINA SUROESTE (AV. QUITO Y ALEJO LASCANO) EDIFICIO MAGAP

Subcapa No.	Profundidad subcapa (m)			H m	SUCS	Tipo de suelo	ω %	IP %	G_s	e	S_u T/m ²	OCR	γ_t T/m ³	$N_{1,60}$	c kN/m ²	ϕ'	K_0	K_2	σ'_{v0} T/m ²	σ'_m T/m ²	G_{max} T/m ²	ρ Tseg ² /m ⁴	V_s m/seg	T_s seg	
	superior	inferior	medio																						
1	0	1,4	0,70	1,4	--	Grav	25	0	2,65	0,66	-	-	1,80	20	1	31	0,48	46	1,3	0,83	2929	0,18	126	0,04	Relleno
2	1,4	3	2,20	1,6	CH	Cohes	73	44	2,70	1,97	3,8	5,00	1,54	-	5	27	0,55	-	2,8	1,92	4461	0,16	169	0,04	CH
3	3	15,5	9,25	12,5	CH	Cohes	78	63	2,70	2,11	3,0	1,46	1,53	-	4	24	0,59	-	6,5	4,73	7007	0,16	212	0,24	
4	15,5	18,5	17,00	3,0	CH	Cohes	54	45	2,70	1,46	3,2	1,28	1,58	-	4	27	0,55	-	10,7	7,45	8787	0,16	234	0,05	
5	18,5	20,5	19,50	2,0	CH	Cohes	88	50	2,70	2,38	3,6	1,00	1,43	-	5	26	0,56	-	12,0	8,48	9376	0,15	254	0,03	
6	20,5	22,5	21,50	2,0	ML	Grav	45	11	2,65	1,19	-	-	1,55	5	2	28	0,53	34	13,0	8,90	7101	0,16	212	0,04	ML
7	22,5	28,1	25,30	5,6	CH - MH	Cohes	84	51	2,70	2,27	5,0	1,15	1,50	-	8	26	0,56	-	14,9	10,55	7731	0,15	225	0,10	CH - MH
8	28,1	29,1	28,60	1,0	Pt	Cohes														0,00	0	0,00			CH - CL
9	29,1	30,1	29,60	1,0	CH	Cohes	70	44	2,70	1,89	4,6	1,00	1,50	-	7	27	0,55	-	15,6	10,85	7840	0,15	226	0,02	
10	30,1	34,5	32,30	4,4	CH	Cohes	46	41	2,70	1,24	5,8	1,14	1,76	-	8	28	0,53	-	17,5	12,01	8248	0,18	214	0,08	
11	34,5	43,5	39,00	9,0	CH - CL	Cohes	41	28	2,70	1,11	9,5	2,00	1,82	-	10	30	0,50	-	22,8	15,23	9288	0,19	224	0,16	
12	43,5	46	44,75	2,5	CL	Cohes	36	25	2,70	0,97	11,8	2,40	1,87	-	10	30	0,50	-	27,6	18,41	10213	0,19	231	0,04	

H = Espesor de la capa
 G_s = Gravedad específica
 e = Relación de vacíos
 OCR = Razón de Sobreconsolidación
 $N_{1,60}$ = N corregido (valores de N mayores a 80 son extrapolados)
 K_0 = Coeficiente de Presión de tierra en reposo
 K_2 = Muestra la influencia de "e" y la amplitud de la deformación λ
 $\sigma'_m = (\sigma'_{v0} + 2 K_0 \sigma'_{v0}) / 3$

G_{max} = Módulo Máximo Dinámico de Corte
 ρ = Densidad del suelo = γ_t / g
 V_s = Velocidad de la Onda de Corte = $(G_{max} / \rho)^{1/2}$
 T_s = Período del suelo = $4H / V_s$
 λ^* = Índice de Compresión modificada $\approx 1P\% / 500$
 E_{oed}^{ref} = Rigidez Tangente para Carga Edométrica Primaria = p_{ref} / λ^*
 E_{50}^{ref} = Rigidez Secante en la Prueba Estándar de Triaxial Drenada = E_{oed}^{ref}
 E_{ur}^{ref} = Rigidez Descarga / Recarga = $3 * E_{50}^{ref}$

ANEXO 6

ESTRATIGRAFIA UNIFICADA

Subcapa No.	Profundidad subcapa (m)			H m	SUCS	Tipo de suelo	ω %	IP %	G_s	e	S_u T/m ²	OCR	V_t T/m ³	$N_{1,60}$	c kN/m ²	ϕ'	K_0	K_2	σ'_{v0} T/m ²	σ'_m T/m ²	G_{max} T/m ²	ρ Tseg ² /m ⁴	V_s m/seg	T_s seg
	superior	inferior	medio																					
1	0	1,4	0,70	1,4	--	Grav	25	0	2,65	0,66	-	-	1,80	20	1	31	0,48	46	1,3	0,83	2929	0,18	126	0,04
2	1,4	20,5	10,95	19,1	CH	Cohe	73	51	2,70	1,98	3,4	2,19	1,52	-	4,5	26	0,56	-	7,3	5,16	7312	0,15	217	0,35
3	20,5	22,5	21,50	2,0	ML	Grav	45	11	2,65	1,19	-	-	1,55	5	2	28	0,53	34	12,8	8,80	7058	0,16	211	0,04
4	22,5	28,1	25,30	5,6	CH - MH	Cohe	84	51	2,70	2,27	5,0	1,15	1,50	-	8	26	0,56	-	14,8	10,44	7690	0,15	224	0,10
5	28,1	46	37,05	17,9	CH - CL	Cohe	48	35	2,70	1,3	7,9	1,64	1,74	-	8,8	29	0,52	-	22,8	15,41	9344	0,18	230	0,31

Subcapa No.	H m	SUCS	Modelo	IP %	V_{sat} kN/m ³	S_u T/m ²	c kN/m	ϕ'	E_{oed}^{ref} kN/m ²	E_{50}^{ref} kN/m ²	E_{ur}^{ref} kN/m ²
1	1,4	--	Mohr-C	0	1,80	-	1	31	-	-	-
2	19,1	CH	HS	51	1,52	3,4	4,5	26	5100	5100	15300
3	2,0	ML	HS	11	1,55	-	2	28	9090	9090	27270
4	5,6	CH - MH	HS	51	1,50	5,0	8	26	7500	7500	22500
5	17,9	CH - CL	HS	35	1,74	7,9	8,8	29	11850	11850	35550