



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

***“COMPORTAMIENTO EN LA UNIÓN PILA-ZAPATA DE ELEMENTOS
ROBUSTOS DE LA CIMENTACIÓN DEL APOYO DE UN VIADUCTO
ELEVADO PARA TREN”***

T E S I S

QUE PRESENTA:

LUIS HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

ASESORES:

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

M. en I. VÍCTOR CECILIO ROMOALDO



CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO

05/ENERO/2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ
Secretario:	M. EN I. KARLA IVONNE GUTIERREZ VÁZQUEZ
Vocal:	ING. JUAN CARLOS ORTIZ LEÓN
1 ^{er} . Suplente:	M. EN I. MARTÍN RUBEN JIMÉNEZ MAGAÑA
2 ^{do} . Suplente:	M. EN I. GUADALUPE RAMÍREZ CERÓN

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi mamá por brindarme el apoyo toda mi vida y siempre estar pendiente de mí, nunca permitió que me rindiera y me enseñó a luchar por mis sueños. A mi papá por ayudarme aclarar la mente más de una vez con sus consejos.

A mis hermanos, nunca me dejaron de apoyar sin importar lo enojado que estuvieran conmigo y más de una noche de desvelos pasamos juntos.

Mis chabelos, Luis Javier, Kevin Alan, Sergio Michael y Carlos Antonio sin ellos nada de estos hubiera sido posible, fueron muchas horas de risas, peleas y estudio juntos durante toda la carrera, fueron mi apoyo principal muchos años, siempre codo a codo amigos. A Abel Pérez, Diego Martínez y Alejandro García por ser excelentes amigos en épocas duras de mi vida. A todos mis amigos y compañeros del béisbol y también a el coach Jorge Navarrete.

Al doctor José Alberto Escobar Sánchez, a los maestros Víctor Cecilio Romualdo y Eriberto Elías Ballinas Díaz, por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Por las horas de apoyo y enseñanza que obtuve de ellos.

A Pamela por soportar muchas de mis frustraciones y siempre estar ahí para apoyarme.

Al instituto de ingeniería por brindarme la oportunidad y apoyo durante la redacción de este documento.

Gracias a todas las personas que estuvieron durante la carrera, compañeros, profesores y amigos, gracias por sus palabras de aliento y apoyo incondicional en más de una ocasión. Nunca encontraré las palabras para describir mi gratitud.

RESUMEN

Se estudió el comportamiento sísmico de la cimentación de un apoyo de un viaducto elevado para tren, localizado en la Ciudad de México. En particular, se estudió la zona rígida de la conexión zapata-pila. La cimentación está compuesta de una zapata y ocho pilas de cimentación. La zapata tiene un espesor de 2.9 m y el diámetro de las pilas es de 1.5 m y una longitud de 35 m., teniendo una cimentación con elementos robustos.

Se elaboró un modelado matemático mediante el método de elementos finitos tipo sólido. El análisis y el modelado se efectuaron en el programa de análisis estructural *SAP2000*. En este, se modelaron pilas, zapata, columnas y suelo a través de resortes equivalentes de acuerdo con su rigidez.

El modelo se calibró con los resultados de una memoria de cálculo. Se realizaron análisis sísmicos estático, cortante basal y dinámicos, modal espectral y paso a paso. Para ello, se usaron las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en su versión 2004. Para el análisis paso a paso se emplearon espectros sintéticos, obtenidos para las características del sitio donde se localiza el apoyo.

Con los resultados se analizó el comportamiento, la transferencia esfuerzos y de deformaciones en la unión pila-zapata de cimentación, del apoyo con lo que determinó la longitud de una zona rígida.

ABSTRACT

The seismic behavior of the foundation of a support of an elevated viaduct for a train located in Mexico City was studied. In particular, the rigid zone of the footing-pile connection was studied. The foundation is composed of a footing and eight foundation piles. The footing has a thickness of 2.9 m and the diameter of the piles is 1.5 m and a length of 35 m, having a foundation with robust elements.

A mathematical modeling was developed using the solid-type finite element method. Analysis and modeling were carried out in the structural analysis program *SAP2000*. In it, piles, footing, columns, and soil were modeled through equivalent springs according to the stiffness of the soil.

The model was calibrated with the results of the calculation memory. Static, basal shear and dynamic, spectral modal and step-by-step (time-history) seismic analyzes were performed. For which the recommendations of the 2004 Complementary Technical Standards for earthquake design were used and for the time-history analysis they used synthetic spectra, obtained for the characteristics of the site where the support is located.

With the results, the behavior, the transfer of forces and deformations in the pile-footing joint of the support foundation are analyzed, thereby determining the length of a rigid zone.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO	3
1.1 CONCRETO ARMADO	3
1.2 UNIONES.....	3
1.2.2 Clasificación de uniones.....	4
1.3 ZAPATAS	5
1.4 PILAS	5
1.5 ZAPATAS SOBRE PILAS.....	6
1.6 ZONA RÍGIDA	7
GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	9
2.1 ASPECTOS BÁSICOS	9
2.2 CONSIDERACIONES DE LOS ELEMENTOS FINITOS	10
DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO	13
3.1 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS.....	13
3.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	16
3.3 GEOTECNIA	16
ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO	19
4.1 MODELADO.....	19
4.2 REVISIÓN DEL MODELO.....	22
4.2.1 Respuesta dinámica.....	22
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO	23
5.1. ANÁLISIS SÍSMICO.....	23
5.1.2 Análisis paso a paso.....	23
5.2 DESPLAZAMIENTOS.....	24
5.2 COMPORTAMIENTO DE PILAS	26
5.2.1 Pila C	27
5.2.2 Pila F.....	31
5.2.3 Pila H	34
5.2.4 Articulación plástica alejada	38
5.2.5 Cálculo de momentos en pilas	38
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	42

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de proyectos como el de una autopista, un puente, un tren, etc., genera beneficios directos e indirectos, como el crecimiento económico, desarrollo social y mejoramiento en la calidad de vida. Por ello, no se debe de tomar a la ligera el desarrollo de este tipo de proyectos. En este trabajo se estudió el comportamiento estructural de un apoyo de un viaducto elevado para tren.

El principal material que se utilizó en la construcción del apoyo fue el concreto reforzado, uno de los materiales más utilizados en las estructuras. Su uso frecuente y diverso, hace que este, tal vez, sea el material de construcción más estudiado. Su estudio no es reciente, se ha realizado durante muchos años, lo que lleva diversos cálculos, horas de investigación y pruebas de laboratorio. Todo esto para que el conocimiento siga evolucionando, ampliándose y mejorando.

La geotecnia y la ingeniería estructural son dos ramas muy importantes en la ingeniería civil, ambas ligadas entre sí, ya que se complementan en las construcción de estructuras. Por otro lado, la ingeniería sísmica, está enfocada al entendimiento y explicación del comportamiento de las estructuras sujetas a acciones sísmicas.

Enfocando los conocimientos de la ingeniería sísmica en estructuras de concreto se ha desarrollado parte de las normas de diseño, que cubre parámetros como el control de calidad, desplazamientos permisibles, tipos de análisis, dimensionamiento de elementos y cantidad de acero de refuerzo, entre otros.

Las características de las estructuras van a determinar la complejidad del cálculo estructural, puede ser un análisis simplificado o uno más refinado, según sea el caso. Con los programas especializados de análisis estructural por computadora se puede reducir el tiempo invertido en dicho cálculo. Cabe aclarar que el diseño estructural es algo más complejo que el manejo avanzada de estos programas, ya que se debe tener un conocimiento de la normatividad y la forma de aplicarla, el análisis de los resultados y la propuesta de soluciones son solo algunos de los pasos a seguir para hacer diseño estructural de forma correcta.

Las condiciones particulares a las que estará sometida una estructura o un elemento se deben conocer para que sea diseñada de forma correcta. Las estructuras se componen de varios elementos, por lo que las uniones entre ellos también deben de ser diseñadas. El mal diseño de una unión, podría ocasionar la falla de uno o varios elementos, y a escalas mayores, el colapso de la estructura.

En este trabajo, se consideró que una unión pila-zapata, y el área adyacente a esta, se comportan estructuralmente como un elemento único, teniendo como elemento principal la zapata. Lo anterior debido a que en esta porción de los elementos, se encuentra una zona con una gran rigidez.

Se analizó el comportamiento de la zona rígida y la forma en que afecta a los elementos en los que se presenta.

Este trabajo busca, con base en el desplazamiento de los elementos que componen las pilas, determinar la existencia de la zona rígida y en caso de que exista, determinar su longitud.

CAPÍTULO 1

UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO

1.1 CONCRETO ARMADO

Se conoce como concreto armado o concreto reforzado, cuando se adiciona acero al concreto, que se conoce como acero de refuerzo (figura 1.1). Con el uso del acero de refuerzo se busca el comportamiento dúctil del elemento estructural.

El concreto armado es el sistema estructural más popular y estudiado, porque aprovecha de forma muy eficiente las características de buena resistencia en compresión, durabilidad, resistencia al fuego y maleabilidad del concreto y las del acero estructural. Así, aprovechando las ventajas de los dos principales componentes, manejando de manera adecuada la posición y cantidad del refuerzo, se puede lograr un comportamiento con una gran ductilidad en elementos sujetos a flexión. (Meli, 2018).

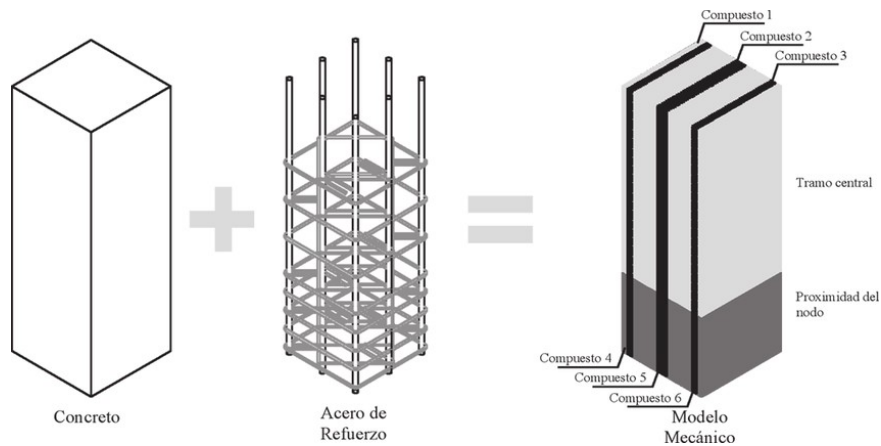


Figura 1.1. Concreto armado

Por otro lado, el uso de concreto de alta resistencia es favorable en estructuras desplantadas en zonas de alta sismicidad, debido a que disminuye la posibilidad de fallas frágiles por compresión o tensión diagonal del concreto y se favorece el desarrollo de la capacidad total del acero de refuerzo, cuya fluencia gobierna el comportamiento inelástico de la estructura (Bazán y Meli, 2018).

La mayoría de las fallas en el concreto reforzado ocurren, no por deficiencias en el análisis de la estructura o en el diseño de los elementos, sino por la atención inadecuada que se le presta al despiece del refuerzo. En muchos casos, el problema está localizado en las conexiones de los elementos estructurales principales (RCDF, 1988).

1.2 UNIONES

Las uniones se definen como la porción de un elemento que se encuentra inmerso en otro o también es el punto donde intersecan o conectan dos o más elementos. El requisito básico que se debe cumplir en las uniones, es que todas las fuerzas existentes en los extremos de los elementos deben transmitirse a través de la unión a los elementos de soporte (Nilson, 1999).

1. UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO

En las uniones en marcos de concreto reforzado que deben resistir fuerzas sísmicas, se deben de considerar tres aspectos importantes: el confinamiento del concreto, la adherencia del refuerzo y la resistencia a la fuerza cortante.

El confinamiento del concreto en la zona de unión, que se hace mediante el armado, aumenta la resistencia de esta. Lo anterior debido a que el concreto al someterse a una carga axial, podría expandirse en el plano transversal; sin embargo, la presencia del armado no permitiría la expansión y ejerciendo una fuerza de compresión. Este fenómeno es conocido como compresión de confinamiento (Bazán y Meli, 2018).

El anclaje y la adherencia del refuerzo que atraviesa la unión es importante, porque es necesario transferir grandes esfuerzos al concreto en longitudes pequeñas. Así como algunas uniones donde el signo de los esfuerzos debe cambiar de tensión a compresión, de una cara a otra de un elemento. Por ejemplo, en una columna, figura 1.2 (Bazán y Meli, 2018).

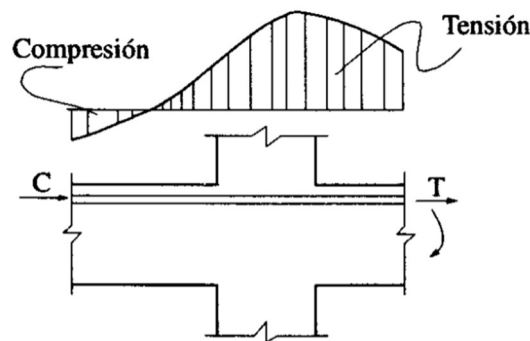


Figura 1.2. Distribución de esfuerzos en la unión de una columna y una viga (Bazán y Meli, 2018).

La resistencia a fuerza cortante de la conexión, requiere la determinación de las fuerzas que se desarrollan cuando, en los extremos de las vigas, se forman articulaciones plásticas. Es decir, cuando las vigas que llegan a la conexión alcanzan la fluencia en tensión y compresión en zonas cercanas, como en una columna (figura 1.2) (Bazán y Meli, 2018).

Las fallas en las uniones son muy frecuentes, éstas generalmente presentan un comportamiento frágil. Por lo que, para evitar dichas fallas, se deben diseñar las conexiones para que tengan una resistencia mayor que los elementos que unen, con el objetivo de que todos los elementos puedan desarrollar toda la capacidad de diseño, y también la rigidez debe de ser suficiente para no afectar la de los elementos conectados (Bazán y Meli, 2018).

1.2.2 Clasificación de uniones

El *ACI Structural Journal* (1985), clasifica las uniones en dos categorías. *Tipo 1*: que conecta elementos en estructuras diseñadas con base en la resistencia, para soportar acciones de diseño gravitacionales y normales de viento. *Tipo 2*: que conecta aquellos elementos proyectados para mantener la resistencia cuando las deformaciones de estos incursionan en el intervalo inelástico, como elementos de una estructura diseñada para movimientos sísmicos, para efectos de viento muy grandes o para efectos de explosiones (Nilson, 1999).

1.3 ZAPATAS

Son un tipo de cimentación que se desplanta a poca profundidad, debido a que se utiliza en suelos donde los estratos con capacidad de carga y rigidez necesaria para que la transmisión de cargas al suelo ocurra sin fallas y sin hundimientos excesivos (Meli, 2018).

Las zapatas no tienen un uso recomendable cuando se requiere un área de contacto amplia para la transmisión de cargas, en ese caso se recomienda utilizar otro tipo de cimentación, como una losa de cimentación. No se recomiendan cuando la mitad o una mayor porción del área del terreno, donde se va a desplantar la estructura, estaría cubierto por estas. Es importante señalar que la zapata no es un elemento eficiente para transmitir momentos flexionantes de consideración al suelo, ya que implica aumentos importantes en el dimensionamiento, lo que la vuelve ineficiente (Meli, 2018).

Existen varios tipos de zapatas, cada uno con diferentes ventajas y usos, entre los más comunes están la zapata aislada, la corrida, de sección constante, escalonada, de concreto reforzado, peralte variable, etc. Por ejemplo, las zapatas de sección constante tiene la ventaja de que son muy fáciles de construir, sin importar el espacio que se tenga para su desplante, mientras que, las de peralte variable permiten un ahorro de material, al reducir la sección en zonas donde los momentos y cortantes son menores (Meli, 2018).

1.4 PILAS

Las pilas de cimentación son similares a los pilotes, sólo que una pila tiene dimensiones mayores en su sección transversal, que suelen ser superiores a los 60 cm (Meli, 2018). Otra definición sería: son los elementos cuyo ancho sobrepasa 1 m, pero no excede del doble de ese valor (Juárez y Rico, 2004).

Las pilas de cimentación son postes que se introducen a grandes profundidades, tienen como objetivo transmitir las cargas provenientes de la superestructura a estratos más resistentes. Las pilas pueden ser excavadas o perforadas, estas son coladas in situ, debido a que sus dimensiones prohíben su hincado a golpes (figura 1.3). Los métodos de excavación a mano resultan muy costosos en la actualidad, por lo que se han desarrollado máquinas capaces de construir pilas de cimentación, que además no tienen la limitación que de presencia de agua impone a los métodos manuales (Juárez y Rico, 2004).

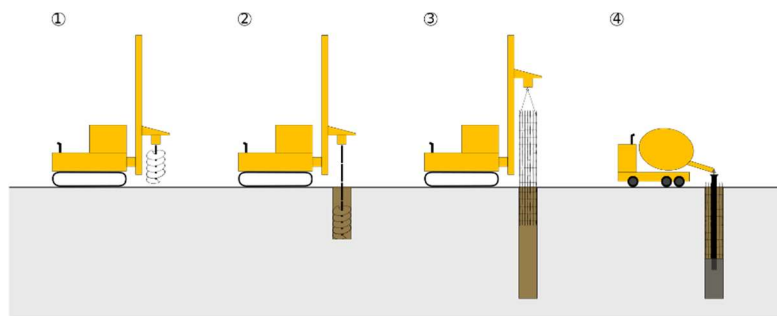


Figura 1.3. Proceso constructivo de una pila de cimentación

Las pilas de cimentación tienen una gran capacidad de carga y se emplean cuando el terreno superficial es deficiente en este aspecto; por lo tanto, son cimentaciones profundas. Otra situación de uso es cuando se tienen requisitos muy estrictos de asentamientos permisibles o cuando se quieren evitar cimentaciones muy voluminosas apoyadas en estratos de suelo poco favorables para la construcción, como en obras marítimas o en suelos saturados (Meli, 2018). Usualmente tienen una sección transversal circular u oblonga, por lo general llevan armado longitudinal y transversal.

1. UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO

La forma en que trabaja una pila es por punta o por fricción lateral. Si las pilas descansan en roca dura, sólo se toma en cuenta su resistencia por punta, despreciándose su resistencia por fricción lateral. Pero cuando el suelo es homogéneo de gran profundidad, la resistencia a fricción alcanza magnitudes importantes. Debido a sus grandes dimensiones, las pilas suelen sufrir asentamientos, que deben considerarse en el diseño (Meli, 2018).

Algunas ventajas del uso de pilas como método de cimentación son que pueden resistir cargas axiales muy elevadas, soportan la construcción por debajo del nivel freático, soportan cargas horizontales e inclinadas, se tiene una buena resistencia a la flexión, su construcción no afecta los edificios circundantes, esto debido a que no se producen vibraciones para su construcción, así que se pueden ubicar cercanas a los límites colindantes (Parada y otros, 2011).

También tienen un tiempo de servicio prolongado, aunque estén en medios agresivos como en cercanías a las zonas costeras o en pilas sobre ríos, estas son utilizadas para puentes. Debido a la transferencia de las cargas a estratos profundos son especialmente ventajosas, ya que, si existe peligro de socavación por las corrientes fluviales o marítimas, se va a tener un buen soporte.

1.5 ZAPATAS SOBRE PILAS

Para que las pilas puedan transmitir las cargas de la estructura al suelo, requieren de elementos intermedios que sean capaces de resistir las altas concentraciones de cargas debido a las columnas que soportan. Los elementos intermedios que se utilizan son zapatas o dados o contratraveses. Las pilas que se encuentran en la parte inferior se distribuyen con requisitos de espaciamiento y separación mínima del borde (Meli, 2018).

Una continuidad adecuada en la unión pila-zapata, se va a generar cuando la cabeza de la pila quede inmersa en la zapata. Se recomienda que la pila penetre como mínimo 15 cm de la cara inferior de la zapata (figura 1.4) (Meli, 2018).

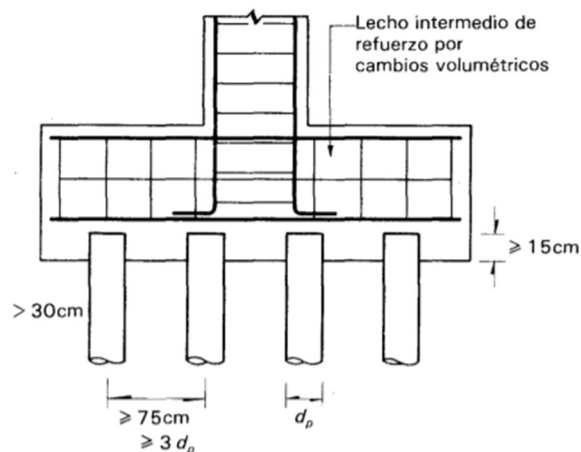


Figura 1.4. Ejemplo de la unión pilote-zapata y columna-zapata, donde se pueden observar los anclajes en los armados y como queda inmersa la pila en la zapata (Meli, 2018).

Para pilas de concreto reforzado, es común, la demolición de la parte superior para que sólo quede el armado, a este procedimiento constructivo comúnmente se le conoce como descabece. Se ancla el armado de la pila con el de la zapata, así cuando se cuele la zapata, la unión se colará también.

Cuando el número de pilas bajo una zapata es alto, las cargas que se transmiten a éstas se asemejan a una presión uniforme y el diseño de la zapata es idéntico al que se realiza cuando ésta se apoya

1. UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO

directamente sobre el suelo. Cuando se trata de pocas pilas, el efecto sobre la zapata debe considerarse como el de cargas concentradas y debe realizarse el diseño por flexión, por cortante de viga y por cortante de punzonamiento (Meli, 2018).

No sólo se debe considerar el punzonamiento de las pilas, sino también el de la columna que es parte de la superestructura. Debido a la distribución relativamente densa de las pilas bajo la zapata, el área crítica de punzonamiento de dos o más pilas se convierte en puntos críticos. Por su notable peralte y las altas cargas concentradas que se tienen que transmitir, las zapatas sobre pilas se deben reforzar en ambos lechos, superior, por la columna e inferior por las pilas y a su vez también se deben de colocar estribos. De igual manera, se coloca refuerzo en algunas secciones intermedias, esto sirve para cumplir con los requisitos por cambios volumétricos (Meli, 2018).

1.6 ZONA RÍGIDA

Con anterioridad se mencionaron algunos de los aspectos que se debe de considerar para tener uniones de buena calidad; tales como el confinamiento del concreto o el acero de refuerzo, este último, refiriéndose al anclaje que se tiene entre los armados de los diferentes elementos en la unión. La suma de todos estos elementos puede generar una rigidez muy elevada, que tiende a infinito comparada con la rigidez de los elementos que se conectan, en la unión y en los elementos que la componen, a cierta distancia adyacente (figura 1.5).

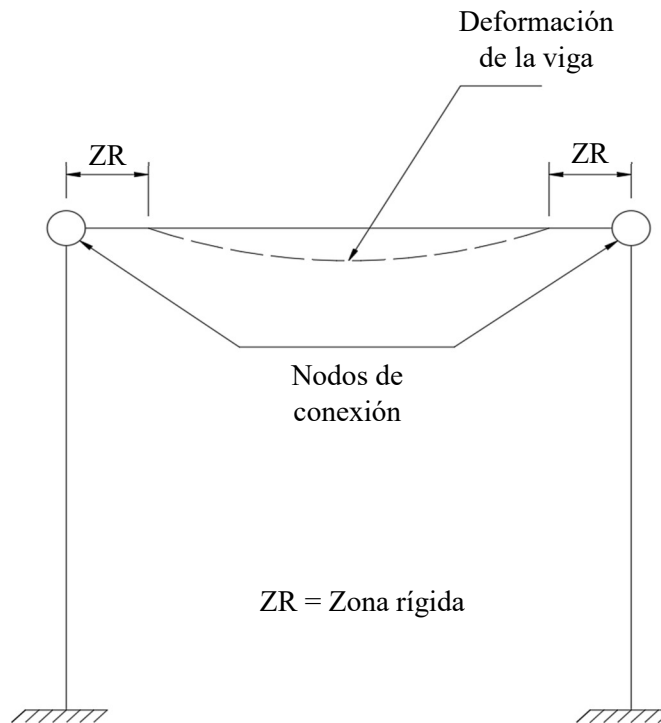


Figura 1.5. Diagrama de la zona rígida, representación del efecto sobre la deformación del elemento

La zona antes mencionada se puede definir como zona rígida. En algunos países de Latinoamérica también se le conoce como brazo rígido. Hay zonas de una barra (viga o columna), que tienen una rigidez muy superior al resto de ésta, esto pasa cuando la barra se introduce en un elemento de grandes dimensiones (Elicabe y otros, 2014).

1. UNIONES DE ELEMENTOS ROBUSTOS DE CONCRETO ARMADO

Debido a la rigidez infinita que se tiene en la zona de conexión, las deformaciones tenderían a cero, la deformación del elemento iniciará inmediatamente donde termina la zona rígida. Los momentos flexionantes que actúen en la zona rígida, no tendrían efecto alguno, esto debido a que esta zona se movería (giraría), como cuerpo rígido. De acuerdo con lo anterior se puede afirmar, que una sección recta de zona rígida después de presentar algún tipo de fuerza, se mantendrá recta (figura 1.5).

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

2.1 ASPECTOS BÁSICOS

El método de elementos finitos (MEF o FEM por sus iniciales en inglés) es un método numérico utilizado para la solución de ecuaciones. Este tiene utilidad en diversos problemas de física e ingeniería, es un procedimiento que sirve para conocer el estado de esfuerzo y deformación, por ende, los desplazamientos (Deméneghi, 2000). Debido a su complejidad, este método está diseñado principalmente para ser utilizado mediante el uso de computadoras.

El método consiste en dividir un cuerpo, estructura o medio continuo, en varios subelementos que aportaran grados de libertad y condiciones de frontera, elementos finitos. Los elementos no se van a intersectar unos con otros (figura 2.1). Al conjunto de elementos finitos que forma una partición del dominio también es llamada discretización (Ortiz y otros, 2013).

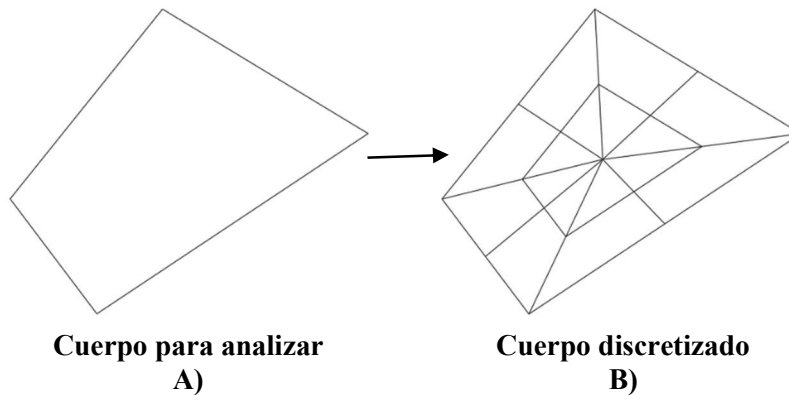


Figura 2.1. Discretización de un continuo en elementos finitos

El método propone sustituir un número de variables desconocidas, que tiende a infinito, por una cantidad limitada de variables, que dependen de la cantidad de los elementos de la discretización, con un comportamiento bien definido.

Debido a la división del cuerpo principal, habrá puntos de interés. Estos se generarán en las aristas de los elementos y se conocen como nodos (figura 2.2). Los nodos pueden pertenecer a uno o más elementos. Cabe mencionar que los nodos de un elemento deben coincidir con los nodos de los elementos adyacentes. Al conjunto de nodos en el cuerpo se le conocerá como mallado o malla (Deméneghi, 2000).

Debido al mallado, se podrán emplear ecuaciones matemáticas adicionales. La solución de estas ecuaciones describirá el comportamiento físico del medio analizado. La precisión del método depende de la cantidad de nodos y elementos, ya que ante una discretización con elementos pequeños el método será más exacto, por igual a la inversa. La cuestión es saber elegir el nivel de detalle que se requiere en los resultados.

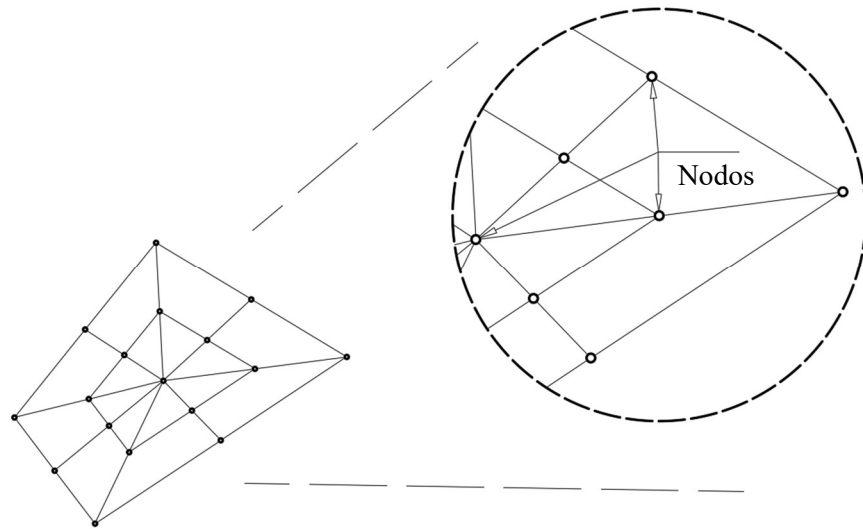


Figura 2.2. Ejemplificación de los nodos

Los nodos van a tener una relación de adyacencia o conectividad, que relacionarán un conjunto de variables definidas para cada uno. La cantidad variables de un nodo se puede escribir en un sistema de ecuaciones lineales, en una matriz. Dicha matriz se llama matriz de rigidez del sistema, y va a variar de acuerdo con la cantidad de ecuaciones del sistema. La cantidad de ecuaciones es proporcional a la cantidad de nodos (Ortiz y otros, 2013).

En cualquier sistema a analizar se debe considerar (Deméneghi, 2000):

- Medio continuo o cuerpo: espacio geométrico que se va a analizar por el sistema.
- Condiciones de contorno: variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema, puede ser cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje o focos de calor.
- Incógnitas o resultados: variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones o temperaturas.

2.2 CONSIDERACIONES DE LOS ELEMENTOS FINITOS

De acuerdo con Celigüeta (2011), las consideraciones que se deben hacer en el método de elementos finitos son:

- Los desplazamientos de los nodos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan automáticamente la configuración de la deformada en la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un cuerpo cualquiera viene determinado por los desplazamientos de sus nodos. Por ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesarias en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales se definen por el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y en sus bordes.

2. GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

- Para cada elemento existe un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento y a las fuerzas exteriores actuantes sobre él.

La solución del problema es aproximada de forma independiente para cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos, pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos. Estas deben cumplir ciertas condiciones de compatibilidad en los límites entre los elementos y apoyarse en un número finito de parámetros, que son los valores de dicha función en los nodos que configuran el elemento (Celigüeta, 2011).

No se puede asegurar que las funciones de interpolación van a satisfacer el requerimiento de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes, por lo que puede que no se cumpla la condición de compatibilidad en las fronteras entre unos y otros, entonces no se podría asegurar la integridad de las deformaciones. Además, al concentrar las cargas equivalentes en los nodos, las condiciones de equilibrio se satisfarán solamente en ellos, y no se cumplirán usualmente en las fronteras entre elementos (Deméneghi, 2000).

En el caso del modelado del comportamiento mecánico (lineal), se tienen que resolver las siguientes ecuaciones: la constitutiva la que es la relación entre deformación y esfuerzo, las de equilibrio y las de velocidad, con lo que se tendrán 15 incógnitas, seis de a las componentes de las fuerzas y momentos, seis esfuerzos (normales y tangenciales) y tres componentes de velocidad. Aunque hay casos donde se reducen las incógnitas de los problemas debido a que se pueden simplificar (Deméneghi, 2000).

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

3.1 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

El apoyo estudiado se forma por cuatro elementos: cabezal, columna, zapata y pilas. Todas las pilas son iguales entre sí en todas sus dimensiones. En la figura 3.1, se muestran las dimensiones de las secciones consideradas en el diseño y construcción del apoyo.

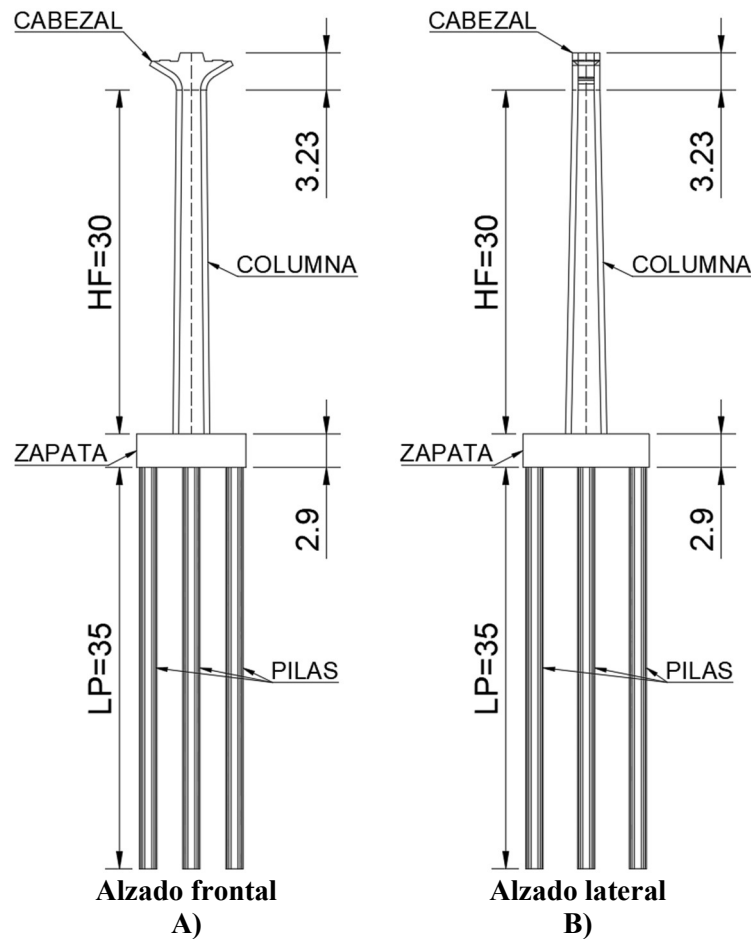


Figura 3.1. Alzados del apoyo con cimentación, con dimensiones y elementos generales

Como se puede apreciar en la figura anterior, el apoyo consta de una superestructura con altura de 33.23 m, que está distribuida en una columna de 30 m y un cabezal de 3.23 m. La subestructura mide 37.9 m, con una zapata de 2.9 m de espesor y pilas de 35 m de longitud.

Con el fin de generar una idea más clara y precisa del apoyo, en las figuras 3.2 a 3.6, se muestran los detalles de cada uno de los elementos que lo componen. Las unidades están en metros.

3. DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

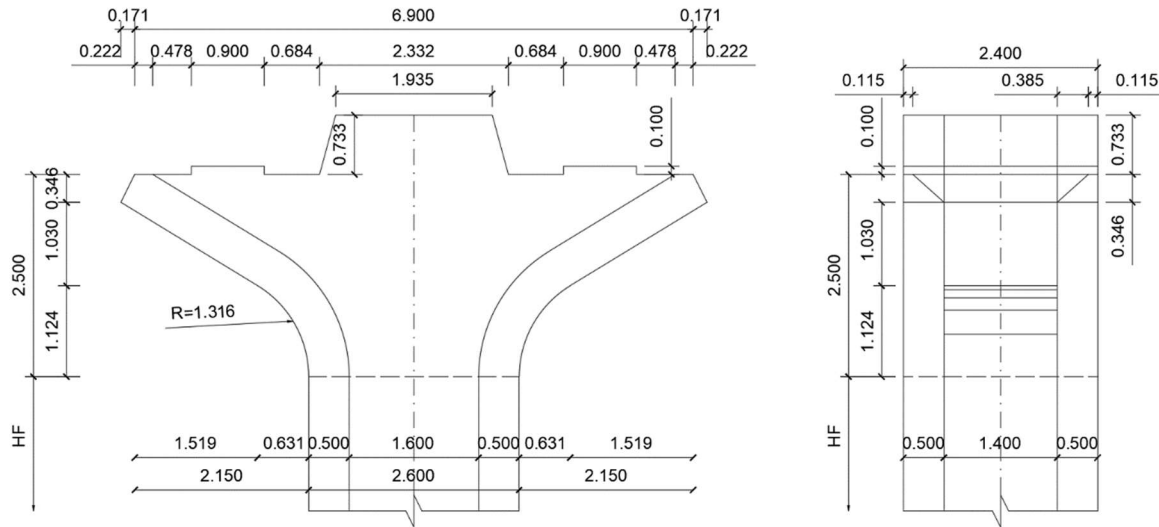


Figura 3.2. Alzado frontal y lateral del cabezal

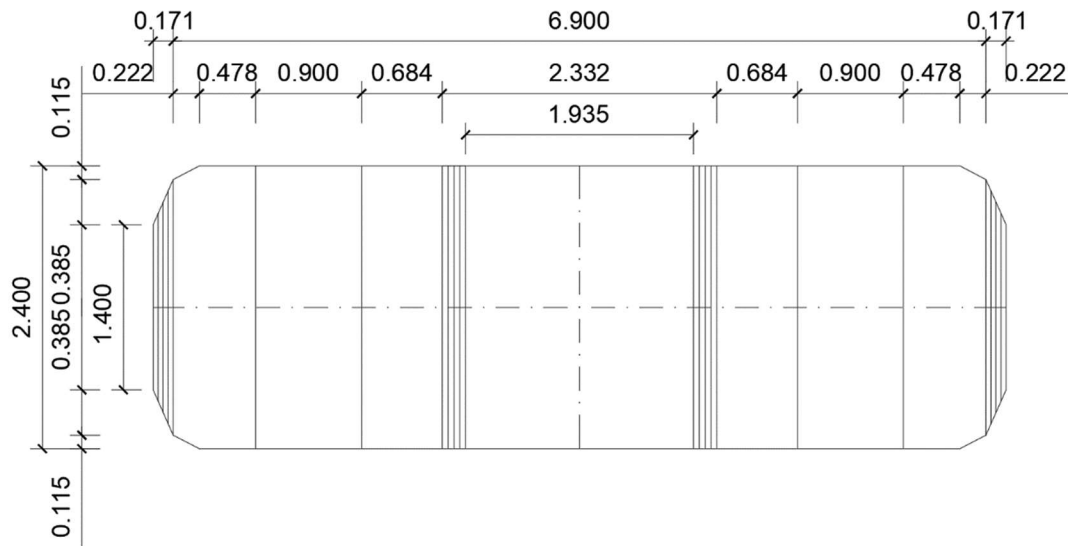


Figura 3.3. Vista en planta del cabezal

3. DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

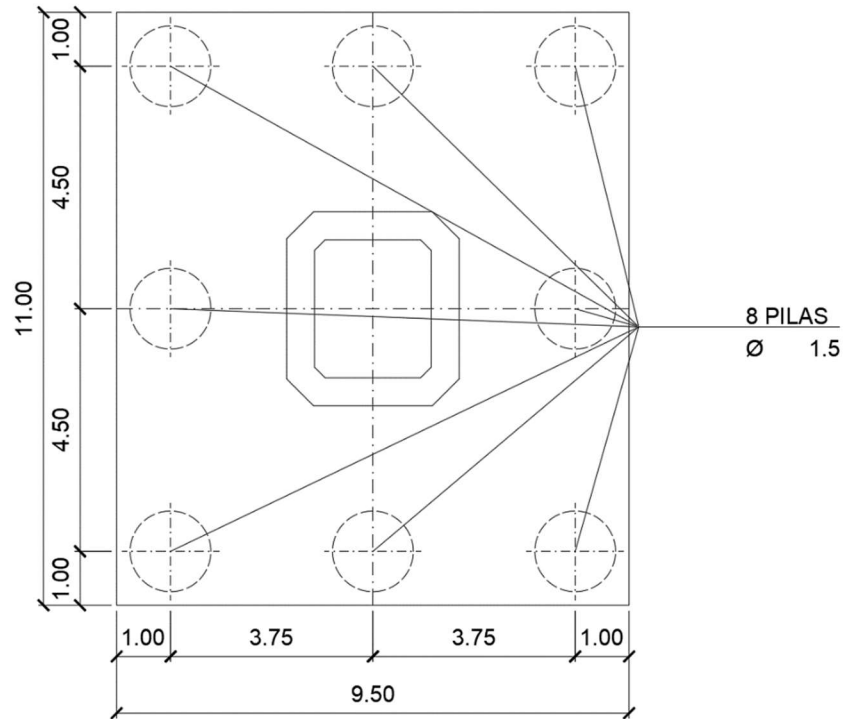


Figura 3.4. Vista en planta de la zapata con la proyección de la columna y de las pilas

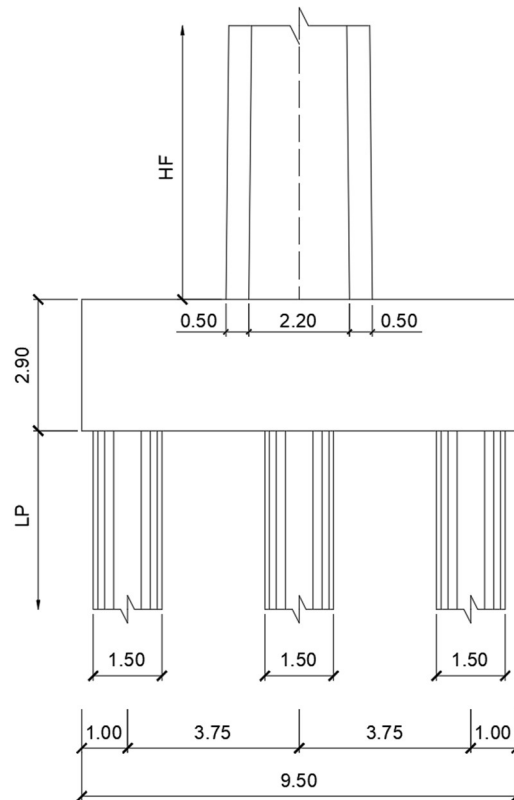


Figura 3.5. Alzado frontal de la zapata

3. DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

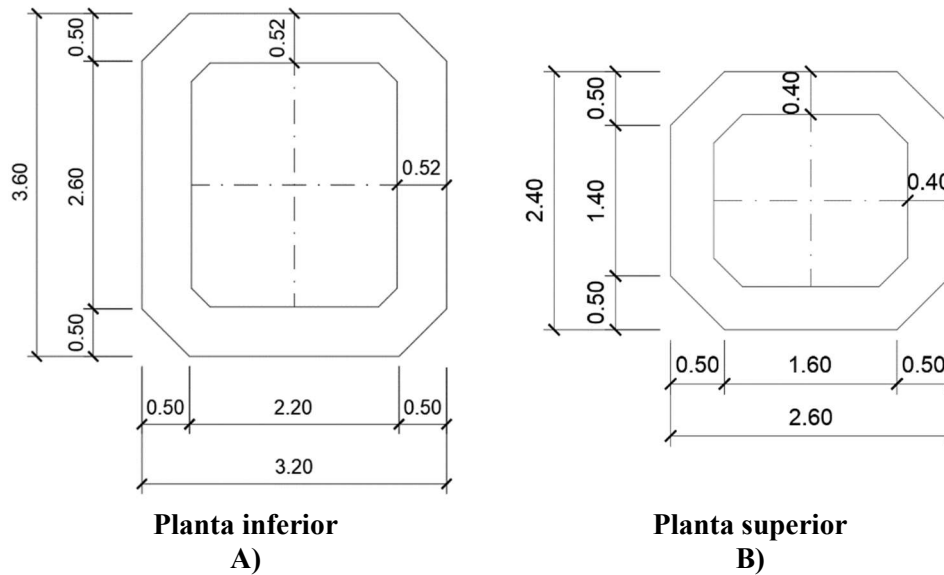


Figura 3.6. Vista en planta de las secciones inferior y superior de la columna, respectivamente

3.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

La estructura que se estudió es de concreto reforzado, con diferentes resistencias en cada uno de los elementos que la forman. Para el modelado del apoyo, se utilizaron diferentes tipos de concreto, cada uno de estos tiene diferentes propiedades mecánicas.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se consultó la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-04), del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal del mismo año (RCDF-04). En la tabla 3.1 se presentan las características del concreto utilizado en el análisis y modelado del apoyo.

Tabla 3.1. Módulo de elasticidad de cada tipo de concreto

Elemento	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo	Ecuación	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
Cabezal	600	Alta resistencia	$8500\sqrt{f'c} + 110000$	318206.63
Columna	600	Alta resistencia	$8500\sqrt{f'c} + 110000$	318206.63
Zapata	300	Clase 1	$14000\sqrt{f'c}$	242487.11
Pilas	250	Clase 1	$14000\sqrt{f'c}$	221359.44

3.3 GEOTECNIA

Se consideró el tipo de suelo en el que está desplantada la estructura, esto se hizo mediante resortes con rigidez equivalente a los módulos de reacción del suelo, tanto la reacción vertical como la horizontal. El cálculo se hizo con las propiedades de la estratigrafía, tabla 3.2. De acuerdo con las

3. DESCRIPCIÓN DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de 2004, NTCS-04, del RCDF-04, la estructura estudiada se encuentra desplantada en zona de lomas (Zona I).

Tabla 3.2. Módulos de reacción del suelo

Estrato	Profundidad (m)		Espesor (m)	Tipo de comportamiento	Kh (kg/cm ³)	Kh (t/m ³)	K _v (kg/cm ³)	K _v (t/m ³)
	De	Hasta						
1	0 0	5 0	5 0	Granular-grava	12.28	12280		
2	5 0	14.50	9.50	Arena arcillosa-compacidad media	1.43	1431		
3	14.50	28 0	13.50	Arena arcillosa-compacidad dura	13.61	13606		
4	28 0	40.50	12.50	Granular-grava	42.53	42530	21.27	21265

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

Para el análisis estructural del apoyo estudiado, se elaboró un modelo matemático de elementos finitos tipo “sólidos” con dimensiones variadas de los elementos. Éste se realizó en el programa de análisis estructural SAP2000 (CSI, 2018).

En el modelado se usaron elementos sólidos con forma de prismas triangulares y rectangulares. Los elementos estructurales del apoyo se discretizaron acorde a sus dimensiones y secciones particulares, como se ilustra en la figura 4.1.

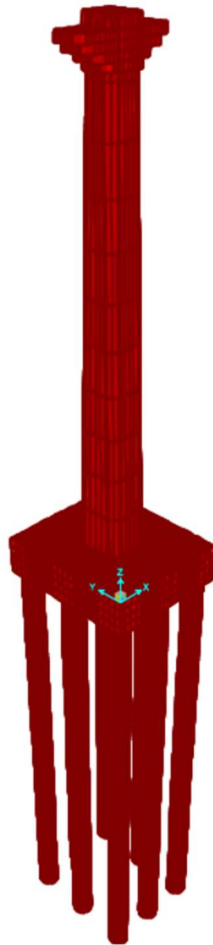


Figura 4.1. Alzado general del apoyo con elementos sólidos

4.1 MODELADO

Las características de los distintos elementos que componen al apoyo fueron las siguientes:

- Cabezal. Elementos finitos con dimensiones máxima de 50 cm x 70 cm.
- Columna. La forman elementos finitos con forma de prismas triangulares y rectangulares con altura de 3 cm, es su dimensión máxima.
- Zapata. La forman elementos finitos con forma de prismas triangulares y rectangulares con altura de 72.5 cm, es su dimensión máxima.

4. ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

- Pilas. Elementos finitos con forma de prismas triangulares. Se tienen dos longitudes diferentes, una para la zona de estudio con longitud es de 20 cm, y otra de 3.2 m en la zona en la que ya no se requieren resultados tan minuciosos.
- Suelo. Para simular el confinamiento que genera el suelo en la cimentación, se colocaron resortes en los vértices de los elementos sólidos de la cimentación de acuerdo con las propiedades del suelo.

En las figuras 4.2 a 4.5, se presentan algunas vistas de las diferentes secciones que componen el modelo del apoyo.

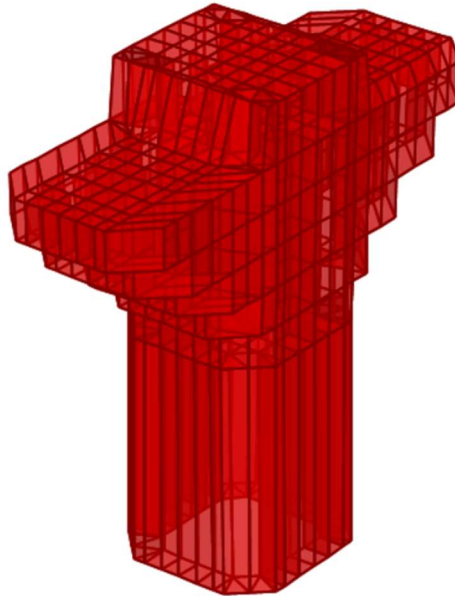


Figura 4.2. Modelado del cabezal con elementos sólidos



Figura 4.3. Modelado de la columna con elementos sólidos

4. ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DEL APOYO DEL VIADUCTO ELEVADO ESTUDIADO

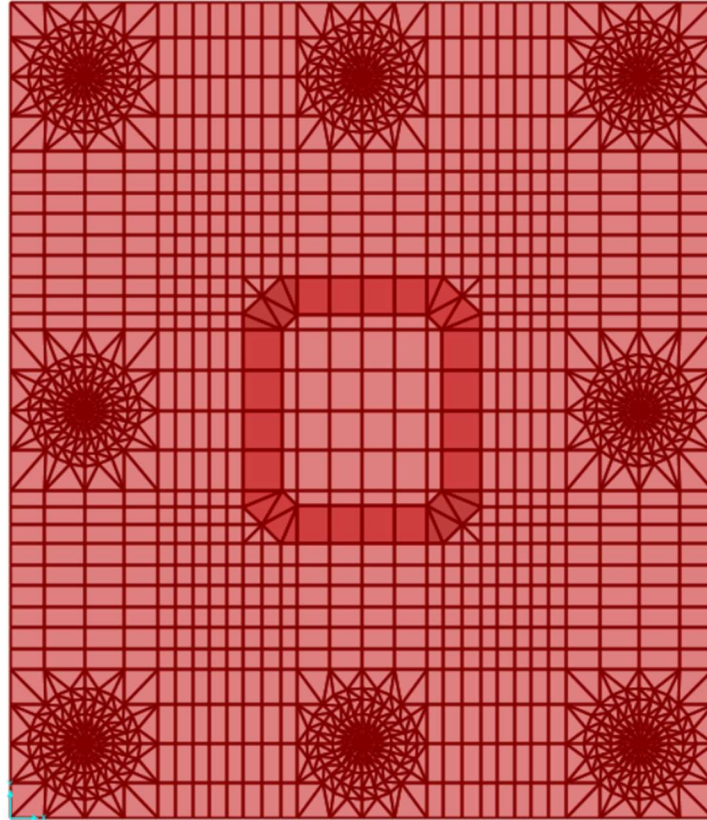


Figura 4.4. Vista de planta de la base inferior de la columna, donde se aprecia la zapata y las pilas

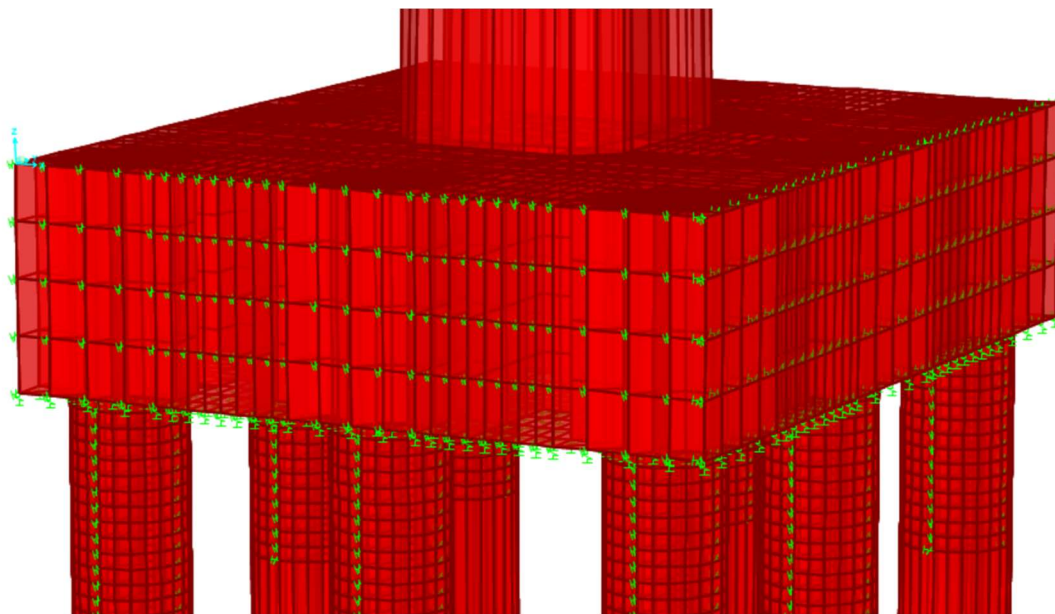


Figura 4.5. Modelado de la zapata y pilas con elementos sólidos, se aprecian los resortes que simulan el suelo

4.2 REVISIÓN DEL MODELO

4.2.1 Respuesta dinámica

En el modelado matemático se buscó que los valores de los periodos de vibración obtenidos de éste fueran los más cercanos a los periodos teóricos, obtenidos considerando que el apoyo es un péndulo invertido. Para lo anterior, únicamente se modeló el apoyo empotrado en su base, sin considerar el suelo y las pilas. La superestructura (trabes) y cargas de diseño únicamente se consideró como una masa oscilatoria de 1,577,397 kg, que se modeló en la parte superior del cabezal.

Se tienen dos períodos fundamentales de vibración: el longitudinal y el transversal. Para el estudio, se establece el eje X como el transversal y el eje Y como longitudinal. Se compararon los períodos de vibración de diseño con los obtenidos del modelo matemático (tabla 4.1), se encontró que los errores relativos son menores al 1%, por lo que, se puede suponer que el modelo reproduce lo indicado en la teoría.

Tabla 4.1. Períodos de vibración

Orientación	Período de diseño (s)	Período del modelo (s)	Error relativo (%)	Período del modelo con cimentación (s)
Longitudinal	2.13	2.129	0.3%	2.26
Transversal	2.25	2.238	0.53%	2.39

CAPÍTULO 5

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

Del modelo matemático se obtuvo la respuesta estructural, esta se midió en diferentes puntos del modelo para obtener la mayor información posible y evaluar diversos aspectos de la estructura bajo los posibles escenarios de carga a los que se verá expuesta. Para este apartado, se analizó el apoyo completo, superestructura y cimentación.

5.1. ANÁLISIS SÍSMICO

Para el estudio del apoyo se realizaron dos tipos de análisis sísmicos dinámicos: uno modal espectral y otro paso a paso. A continuación, se muestran las características de ambos análisis.

5.1.1 Análisis modal espectral

Para este análisis se siguieron las recomendaciones de las NTCS-04. El espectro utilizado en el análisis se construyó tomando en cuenta las características de la Zona I y el valor de $Q=1$, (figura 5.1).

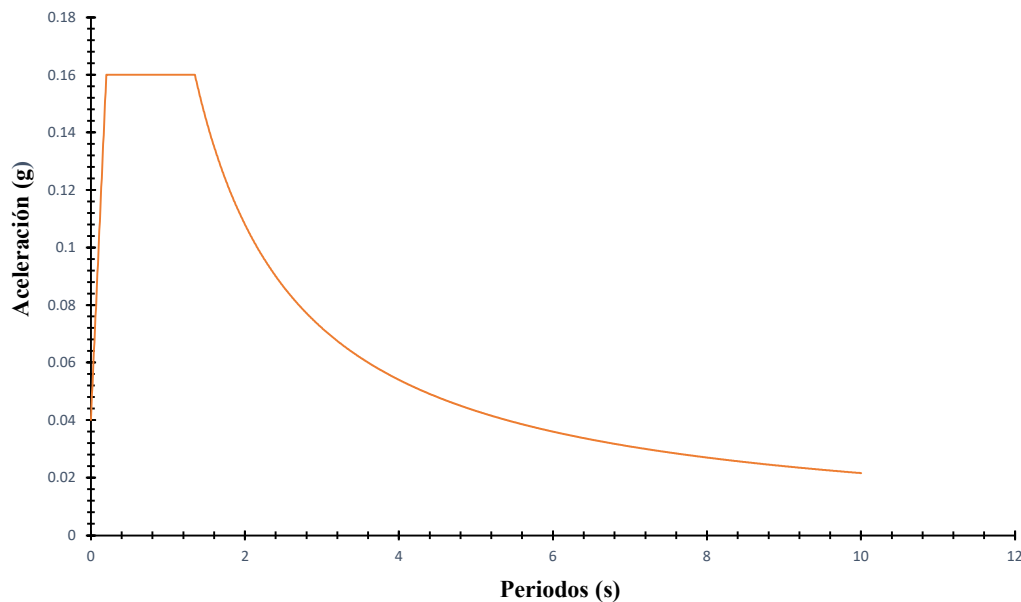


Figura 5.1. Espectro de diseño sísmico, zona I y $Q=1$

5.1.2 Análisis paso a paso

Para el análisis paso a paso, se empleó un registro de aceleraciones sintético, que se obtuvo con el espectro de diseño sísmico del sitio (figura 5.1) y una historia de aceleraciones semilla (acelerograma). La historia de aceleraciones semilla se obtuvo de una estación sísmica cercana al sitio donde se ubicará el apoyo y con un tipo de suelo similar. Esta corresponde a un sismo con una magnitud de 6.5 en la escala Richter. El acelerograma sintético tiene una aceleración máxima de 0.147 g, correspondiente a 21.145 s.

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

En la figura 5.2 se presenta el sismo sintético empleado en el análisis sísmico paso a paso del apoyo.

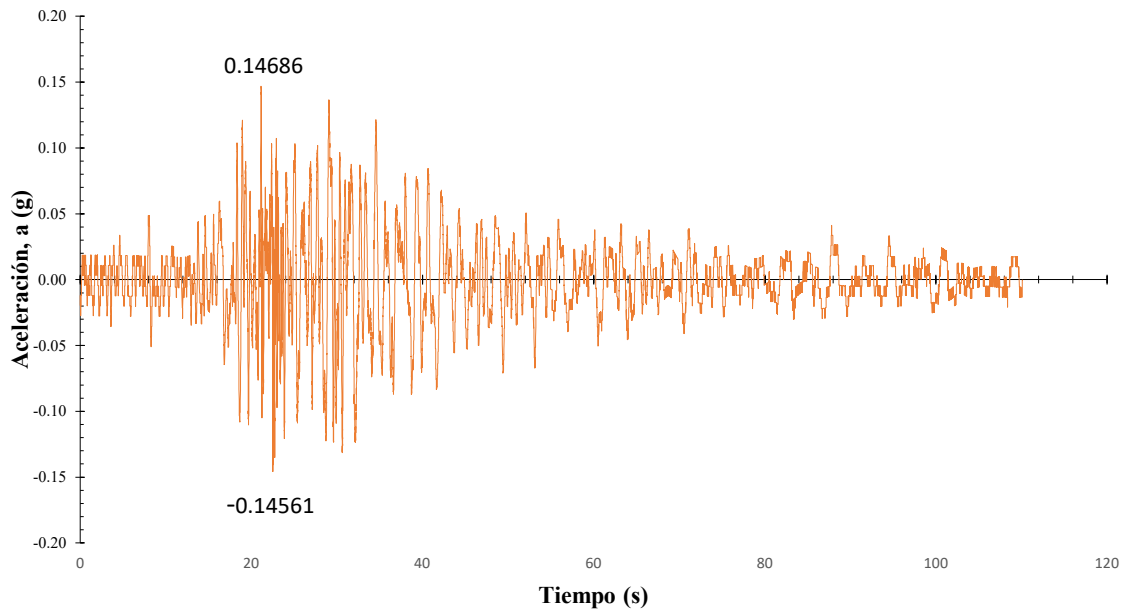


Figura 5.2. Acelerograma de sismo sintético

5.2 DESPLAZAMIENTOS

Para estudiar los desplazamientos en el apoyo se seleccionaron tres nodos (figura 5.3). Dos se encuentran en los costados del cabezal, en la zona más ancha del mismo, a una elevación de 32.5 m y el otro, al centro del cabezal, con una elevación de 33.23 m.

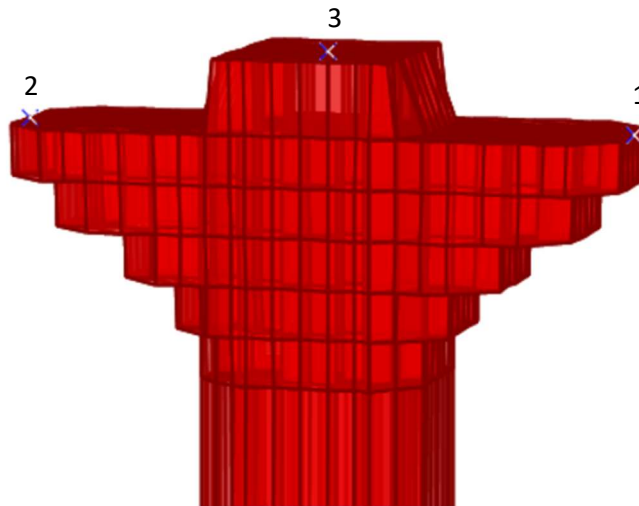


Figura 5.3. Nodos estudiados en el cabezal

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

Para el análisis sísmico modal espectral, se obtuvieron los desplazamientos máximos en el cabezal. En dicho análisis se consideraron los efectos bidireccionales y se utilizaron las siguientes combinaciones de carga:

- Combinación 1: 100%SX+30%SY
- Combinación 2: 30%SX+100%SY

En la tabla 5.1, se muestran los desplazamientos de los nodos bajo las combinaciones de análisis. Se puede observar que los desplazamientos no exceden el límite permisible, que de acuerdo con las NTCS-04, es de 0.12H.

Tabla 5.1. Distorsiones permisibles

Nodo	Ubicación	Combinación de análisis	Tipo de resultado	U1 (m)	U2 (m)	Distorsión U1	Distorsión U2
1	Derecha	1	Max	0.143	0.40	0.044	0.012
			Min	-0.143	-0.40	-0.044	-0.012
		2	Max	0.43	0.134	0.013	0.041
			Min	-0.43	-0.134	-0.013	-0.041
2	Izquierda	1	Max	0.143	0.40	0.044	0.012
			Min	-0.143	-0.40	-0.044	-0.012
		2	Max	0.43	0.134	0.013	0.041
			Min	-0.43	-0.134	-0.013	-0.041
3	Punta	1	Max	0.148	0.42	0.044	0.013
			Min	-0.148	-0.42	-0.044	-0.013
		2	Max	0.44	0.139	0.013	0.042
			Min	-0.44	-0.139	-0.013	-0.042

Con el análisis paso a paso, se obtuvieron las historias de desplazamientos en el cabezal. En las figuras 5.4 y 5.5, se presentan las historias de desplazamientos. Se puede observar que, en ninguna de las dos combinaciones, los desplazamientos máximos o mínimos, superan los desplazamientos límite.

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

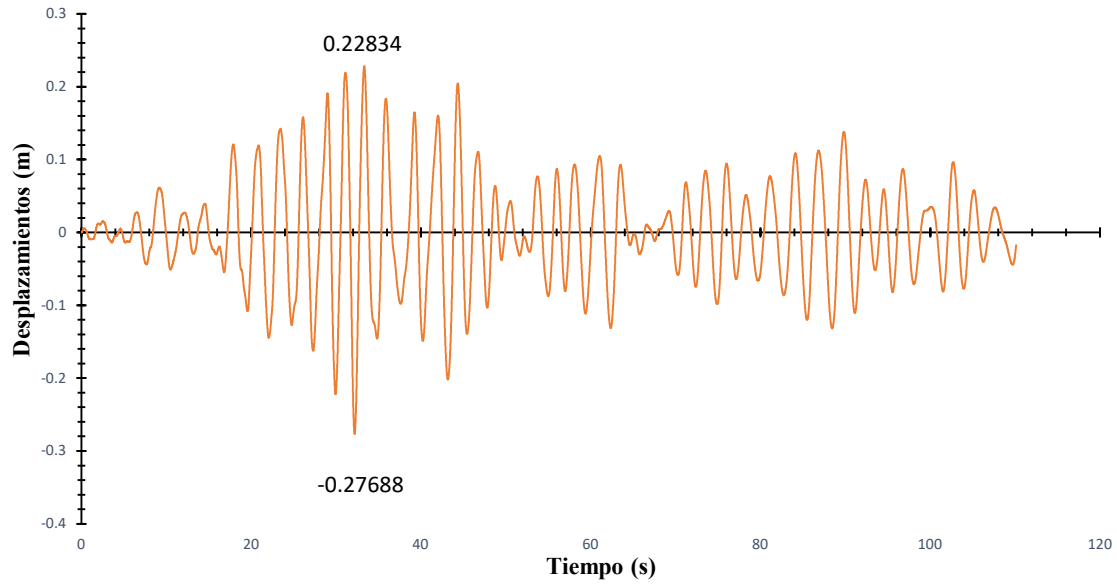


Figura 5.4. Historia de desplazamientos del nodo 3 para la combinación 1, dirección en X

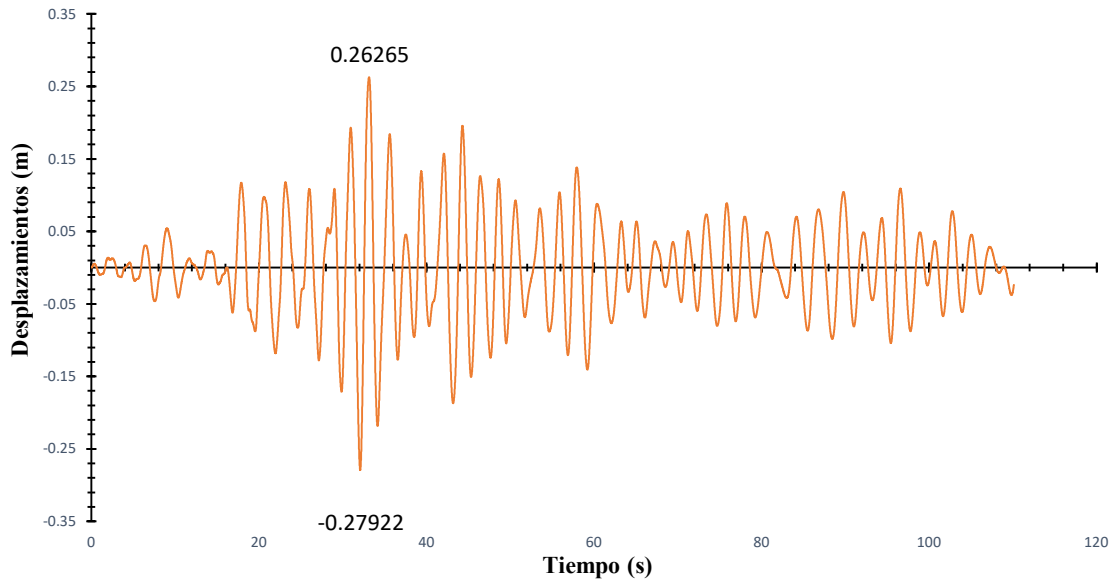


Figura 5.5. Historia de desplazamientos del nodo 3 para la combinación 2, dirección en Y

5.2 COMPORTAMIENTO DE PILAS

En este apartado, se estudió el comportamiento de tres pilas: pila C, de esquina, pila F, centro del lado de 11 m; y pila H, centro de lado de 9.5 m (figura 5.6-A). En este caso, se analizaron cinco nodos en cada profundidad (figura 5.6-B), estos siempre tienen las mismas coordenadas en X y en Y.

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

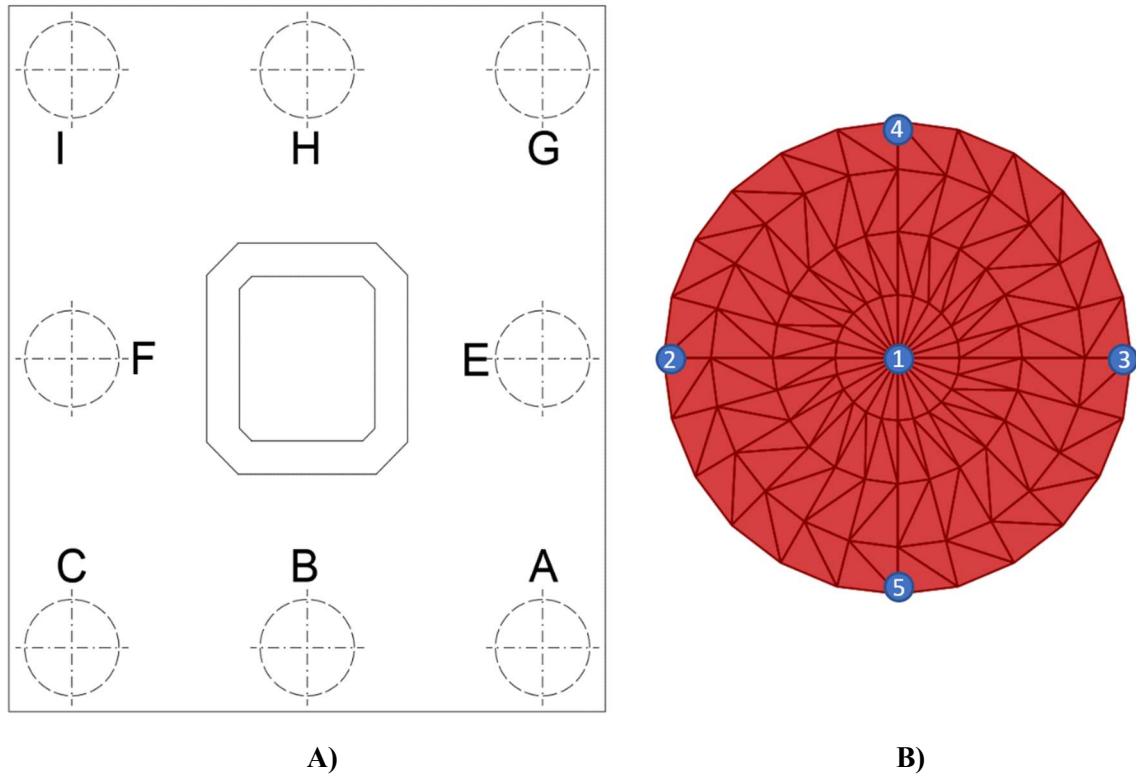


Figura 5.6. Pilas y nodos seleccionados para el análisis

Al aplicarse el espectro de diseño sísmico $Q=1$, donde los desplazamientos mostrados son los absolutos, máximos y mínimos, por consiguiente, se tiene el comportamiento en dos direcciones en las componentes. De tal forma, se graficaron a 9.1 m de profundidad o 6.2 m, por debajo de la zapata, donde se supone la existencia de la zona rígida.

Es importante mencionar que después de las gráficas de desplazamientos, se encuentran los diagramas de envolvente máxima, que muestran los esfuerzos en las pilas bajo las combinaciones sísmicas y se relacionan los esfuerzos con la deformación de una pila.

5.2.1 Pila C

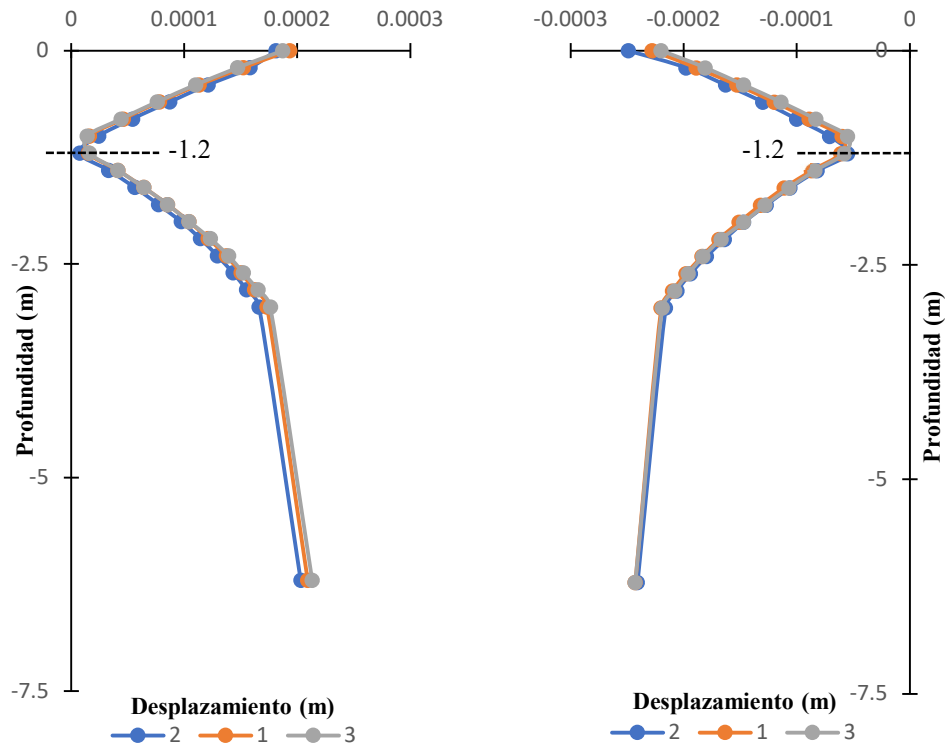
En las figuras 5.7 y 5.8, se muestran los desplazamientos de la combinación $X+0.3Y$ de los cinco nodos. Se observa que, a -4.1 m de profundidad, o -1.2 m de la unión; se encuentra un punto de inflexión.

Las figuras 5.10 y 5.11, se muestran los desplazamientos de la combinación $0.3X+Y$ de los cinco nodos. En este caso, el punto inflexión se encuentra a -4.9 m de profundidad o a -2 m de la unión.

Las figuras 5.9 y 5.12, muestran la envolvente máxima siendo para la combinación $X+0.3Y$ y $0.3X+Y$, respectivamente. Los esfuerzos se reducen en una profundidad cercana a la de los puntos de inflexión.

Con estos resultados se afirma la existencia de la zona rígida en esta pila, la que tiene una longitud mínima de 1.2 m. A esta longitud a la que se encuentra el punto de inflexión de los desplazamientos.

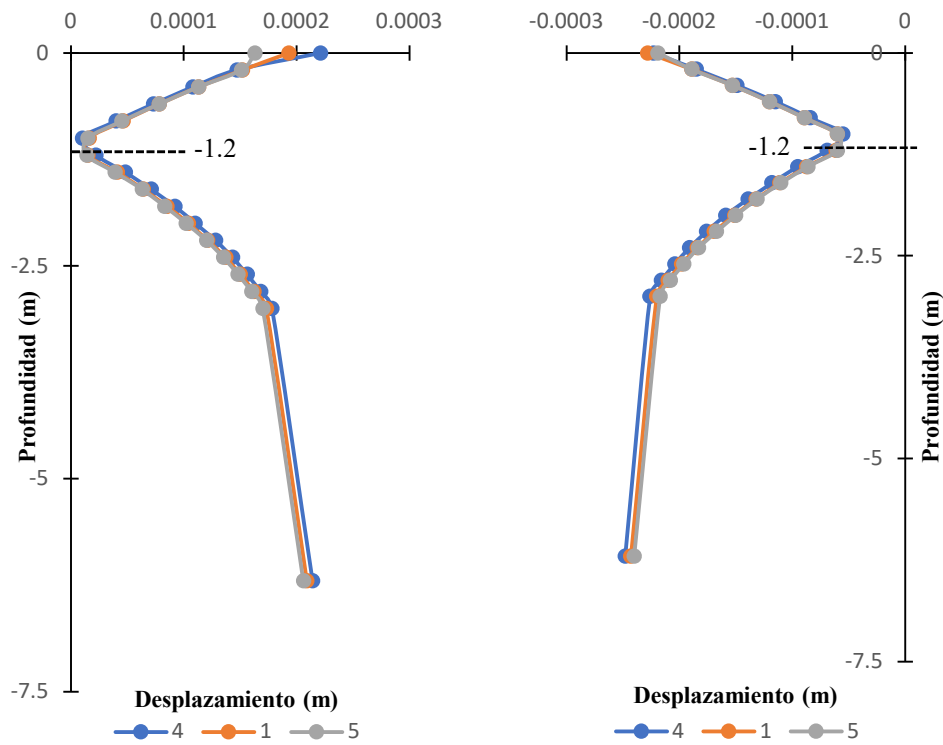
5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



A) desplazamientos máximos

B) desplazamientos mínimos

Figura 5.7. Desplazamientos de los nodos 1, 2 y 3 en la componente X, con $X+0.3Y$



A) desplazamientos máximos

B) desplazamientos mínimos

Figura 5.8. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente X, con $X+0.3Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

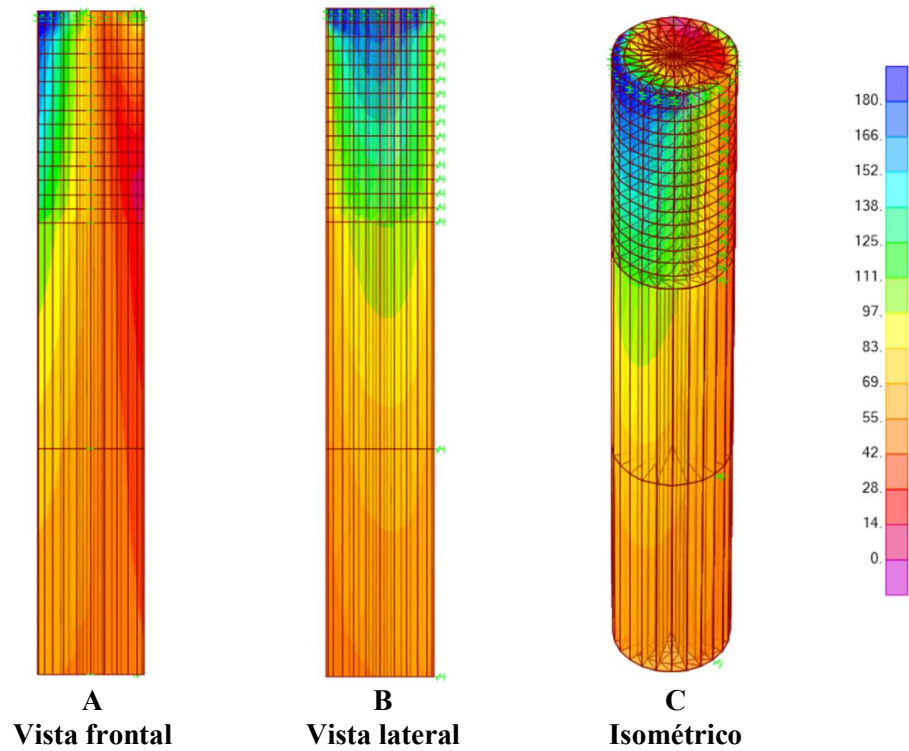
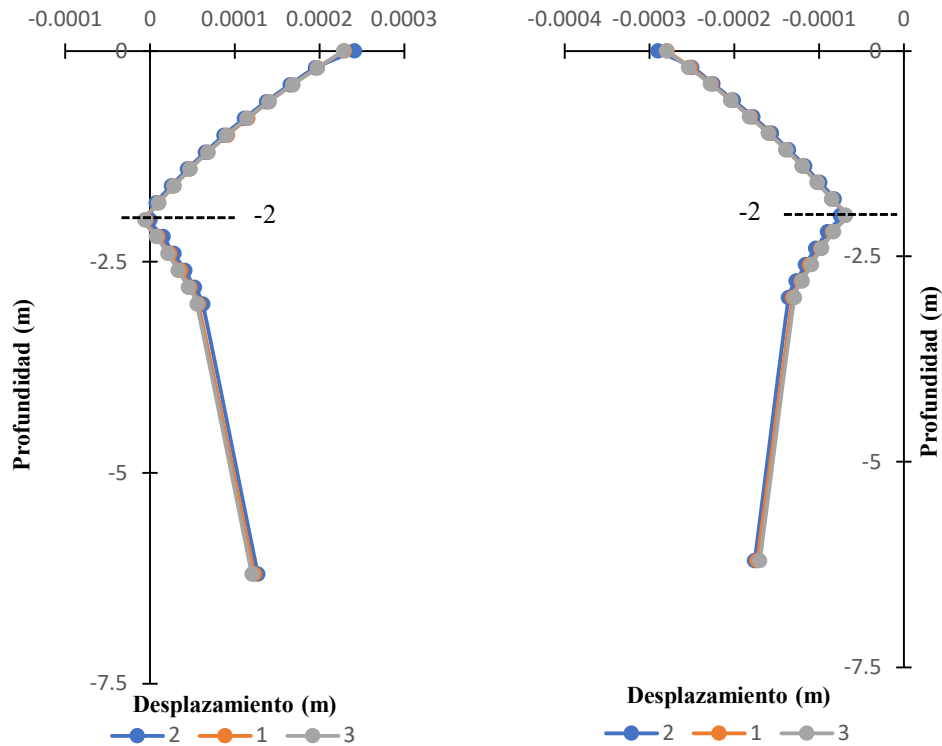


Figura 5.9. Envolvente máxima de esfuerzos en la pila C para $X+0.3Y$

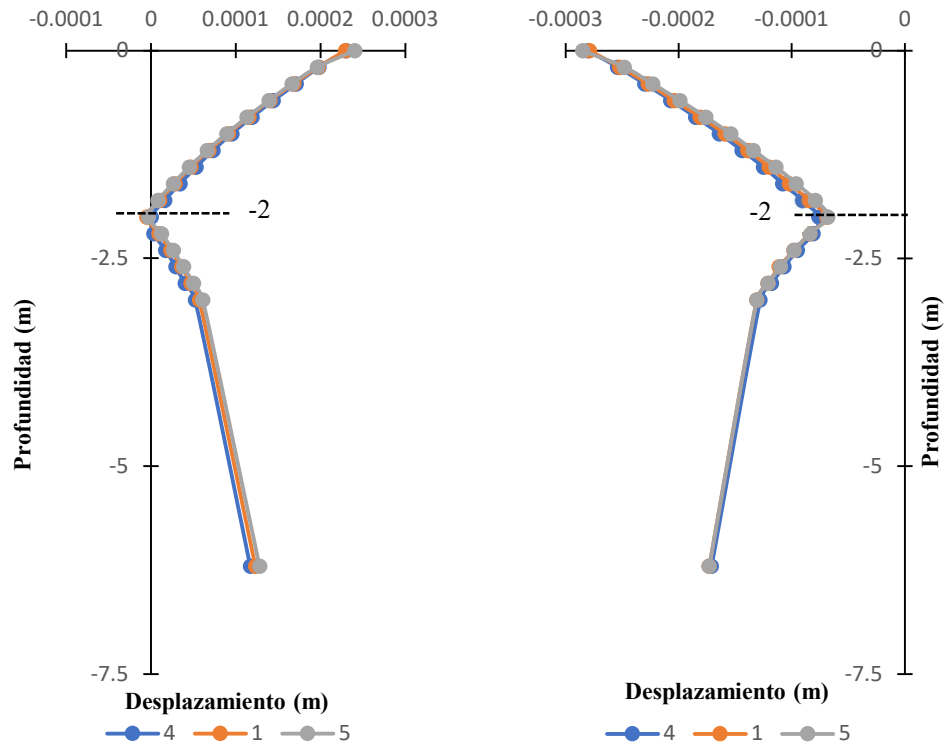


A) desplazamientos máximos

B) desplazamientos mínimos

Figura 5.10. Desplazamientos de los nodos 1, 2 y 3 en la componente Y, con $0.3X+Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



A) desplazamientos máximos B) desplazamientos mínimos
 Figura 5.11. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente Y, con $0.3X+Y$

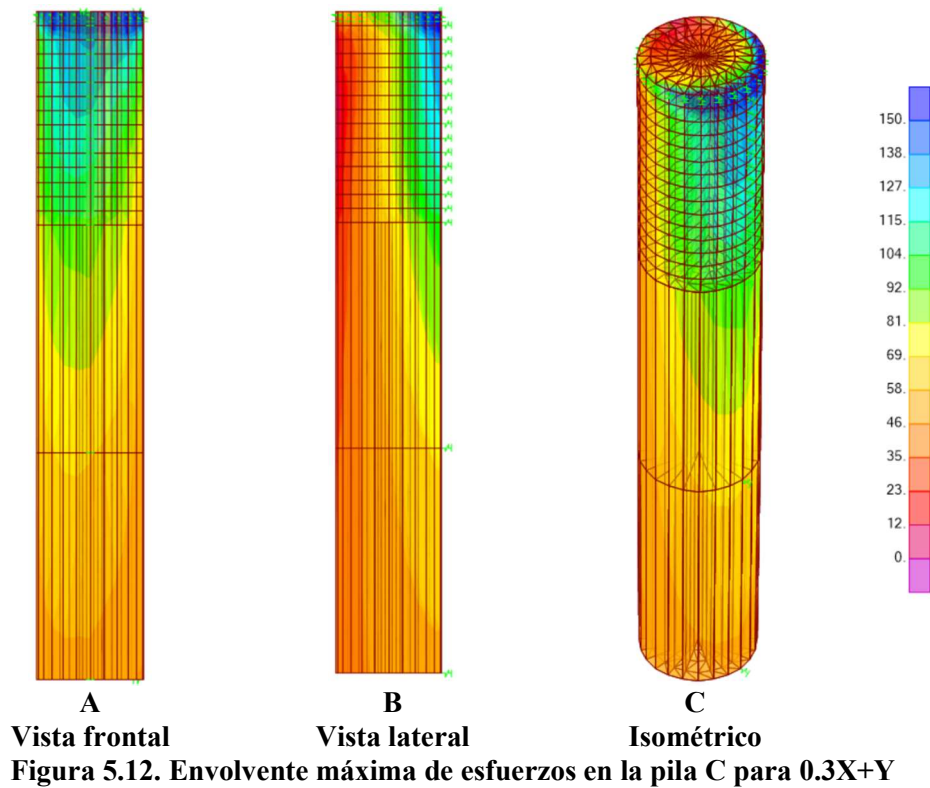


Figura 5.12. Envoltura máxima de esfuerzos en la pila C para $0.3X+Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

5.2.2 Pila F

Las figuras 5.13 y 5.14, muestran los desplazamientos de la combinación $X+0.3Y$ de los cinco nodos, resultando que, a la profundidad de -4.1 m o -1.2 m de la unión, se encuentra un punto de inflexión.

En las figuras 5.16 y 5.17, se muestran los desplazamientos de la combinación $0.3X+Y$ de los cinco nodos, en donde, el punto inflexión, se encuentra a -3.9 m de profundidad o a -1 m de la unión.

Las figuras 5.15 y 5.18, muestran la envolvente máxima siendo para la combinación $X+0.3Y$ y $0.3X+Y$ respectivamente. Los esfuerzos se reducen en una profundidad cercana a la de los puntos de inflexión.

Con estos resultados se afirma la existencia de la zona rígida en esta pila, la que tiene una longitud mínima de 1.2 m, longitud a la que se encuentra el punto de inflexión de los desplazamientos.

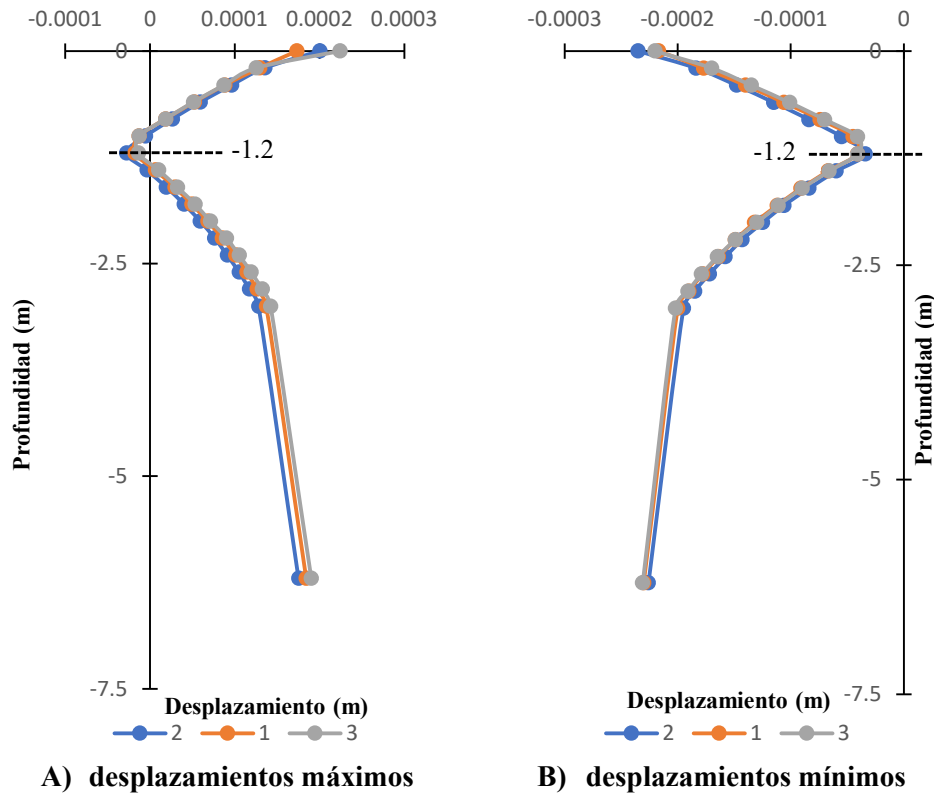


Figura 5.13. Desplazamientos de los nodos 1, 2 y 3 en la componente X, con $X+0.3Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

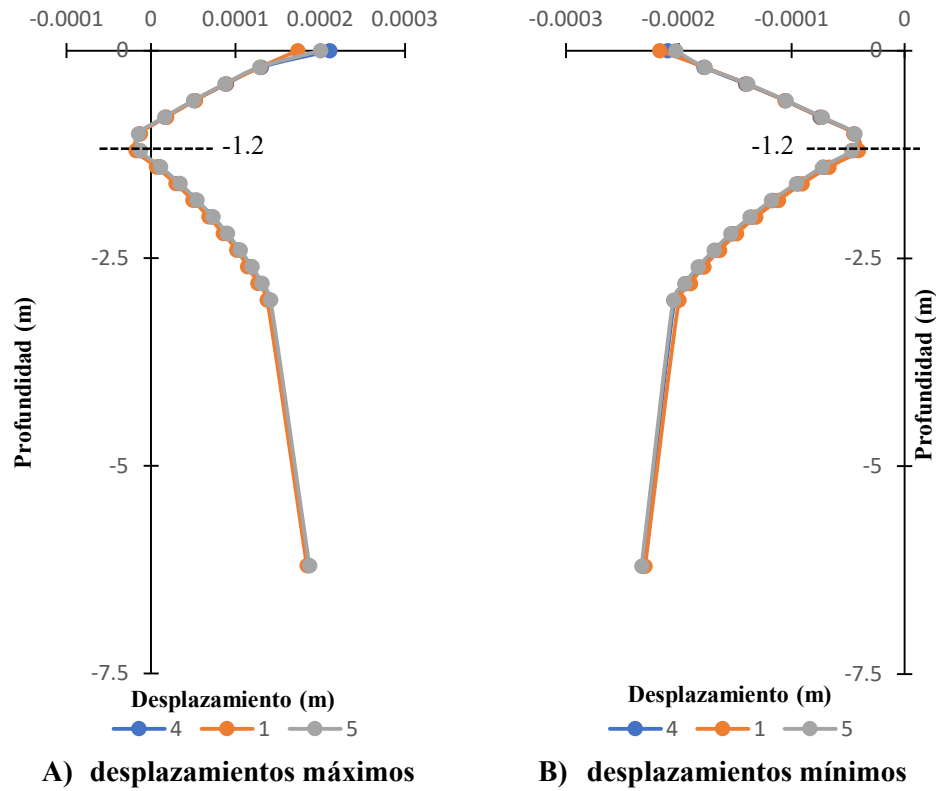


Figura 5.14. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente X, con $X+0.3Y$

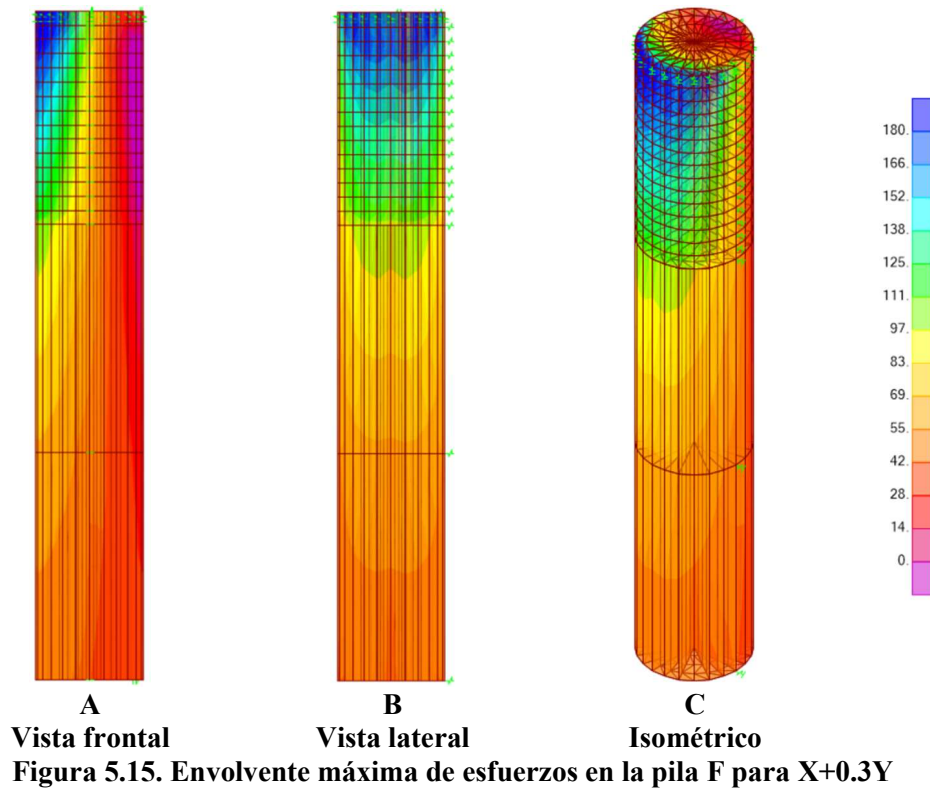
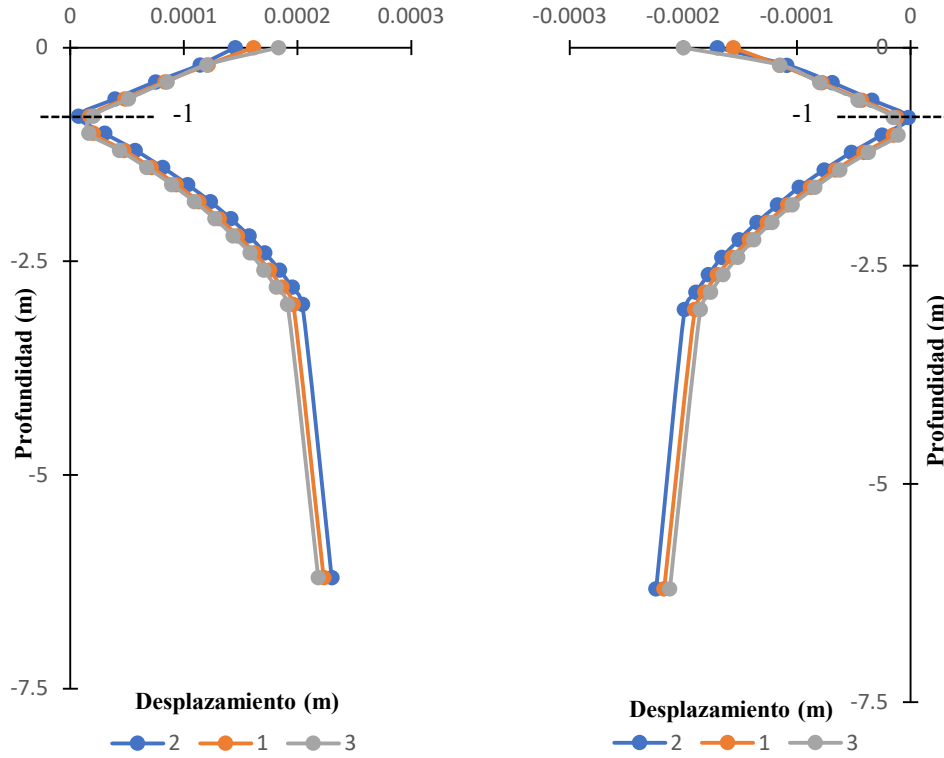
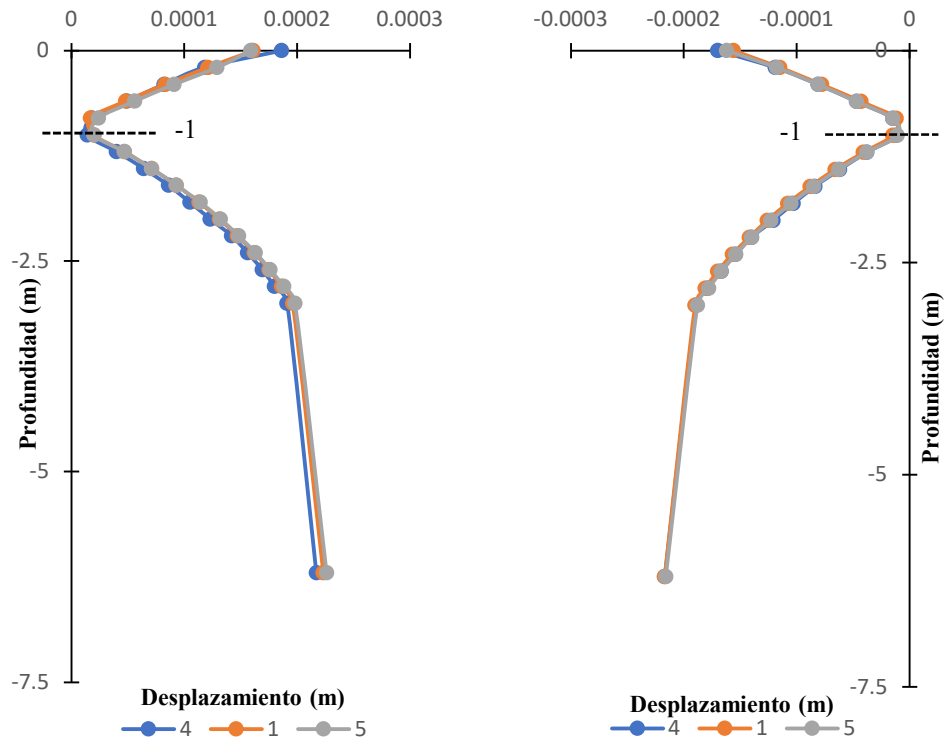


Figura 5.15. Envolvente máxima de esfuerzos en la pila F para $X+0.3Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



A) desplazamientos máximos **B) desplazamientos mínimos**
Figura 5.16. Desplazamientos de los nodos 1, 2 y 3 en la componente Y, con $0.3X+Y$



A) desplazamientos máximos **B) desplazamientos mínimos**
Figura 5.17. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente Y, con $0.3X+Y$

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

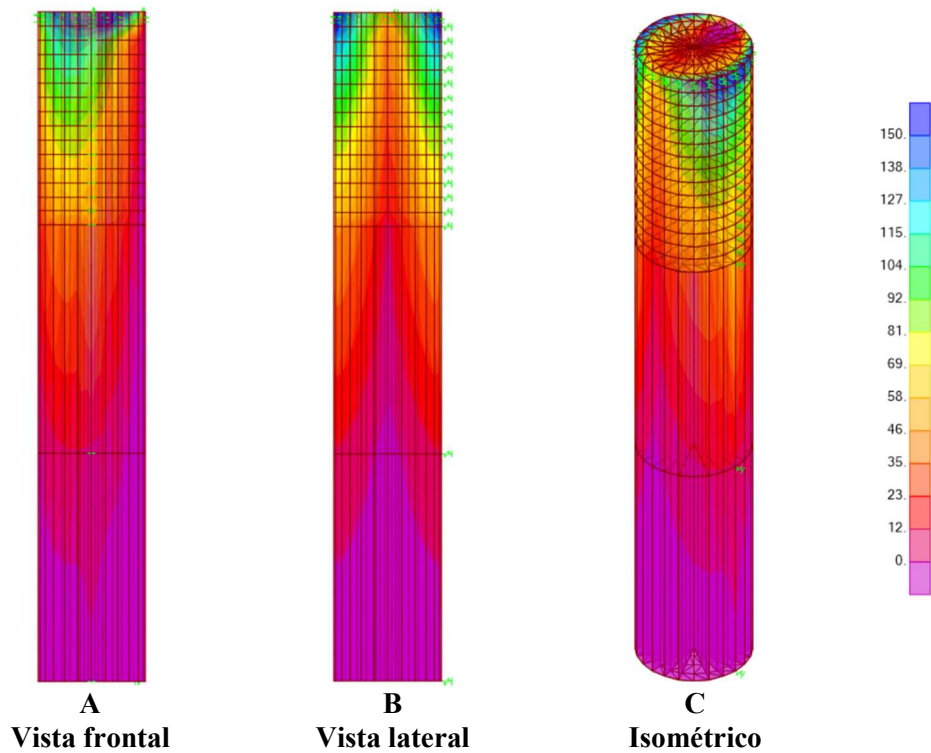


Figura 5.18. Envolvente máxima de esfuerzos en la pila F para 0.3X+Y

5.2.3 Pila H

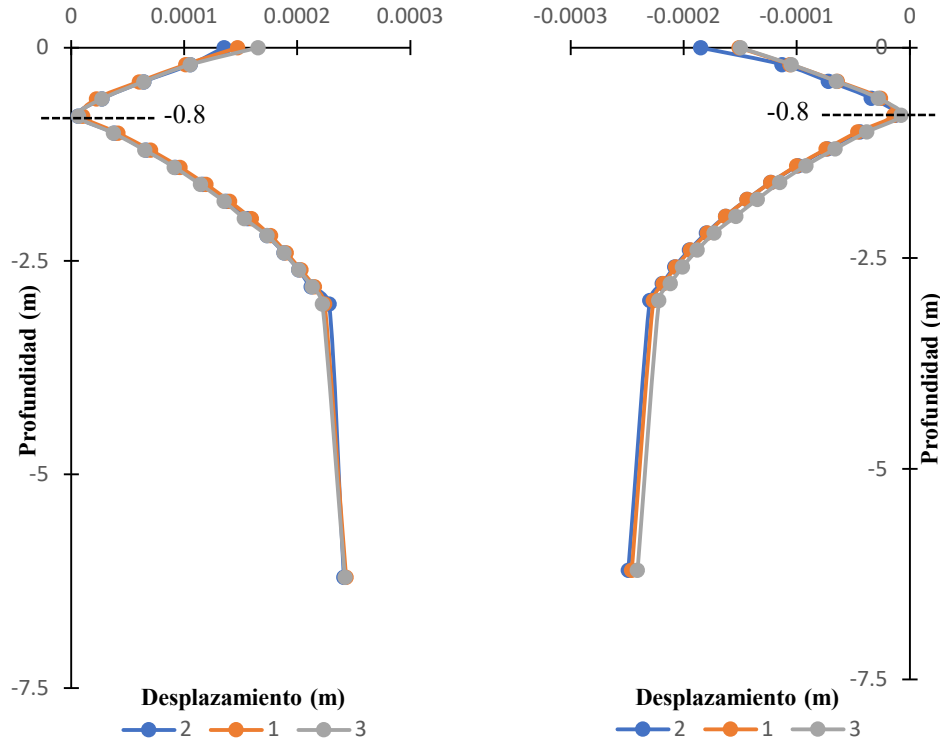
Las figuras 5.19 y 5.20, muestran los desplazamientos de la combinación $X+0.3Y$ de los cinco nodos, observándose que a -3.7 m de profundidad o -0.8 m de la unión, se encuentra un punto de inflexión.

Las figuras 5.22 y 5.23, muestran los desplazamientos de la combinación $0.3X+Y$ de los cinco nodos, el punto inflexión se encuentra a -5.3 m de profundidad o a -2.4 m de la unión.

Las figuras 5.21 y 5.24, muestran la envolvente máxima para la combinación $X+0.3Y$ y $0.3X+Y$ respectivamente. Los esfuerzos se reducen en una profundidad cercana a la de los puntos de inflexión.

Con estos resultados se afirma la existencia de la zona rígida en esta pila, la que tiene una longitud mínima de 0.8 m, longitud a la que se encuentra el punto de inflexión de los desplazamientos.

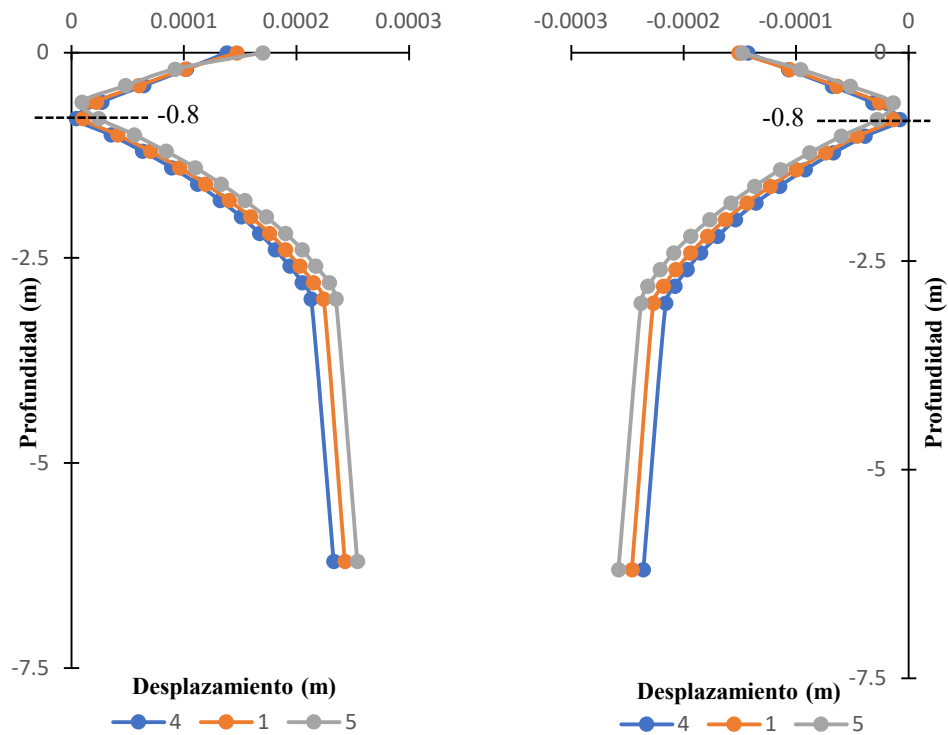
5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



A) desplazamientos máximos

B) desplazamientos mínimos

Figura 5.19. Desplazamientos de los nodos 1, 2 y 3 en la componente X, con X+0.3Y

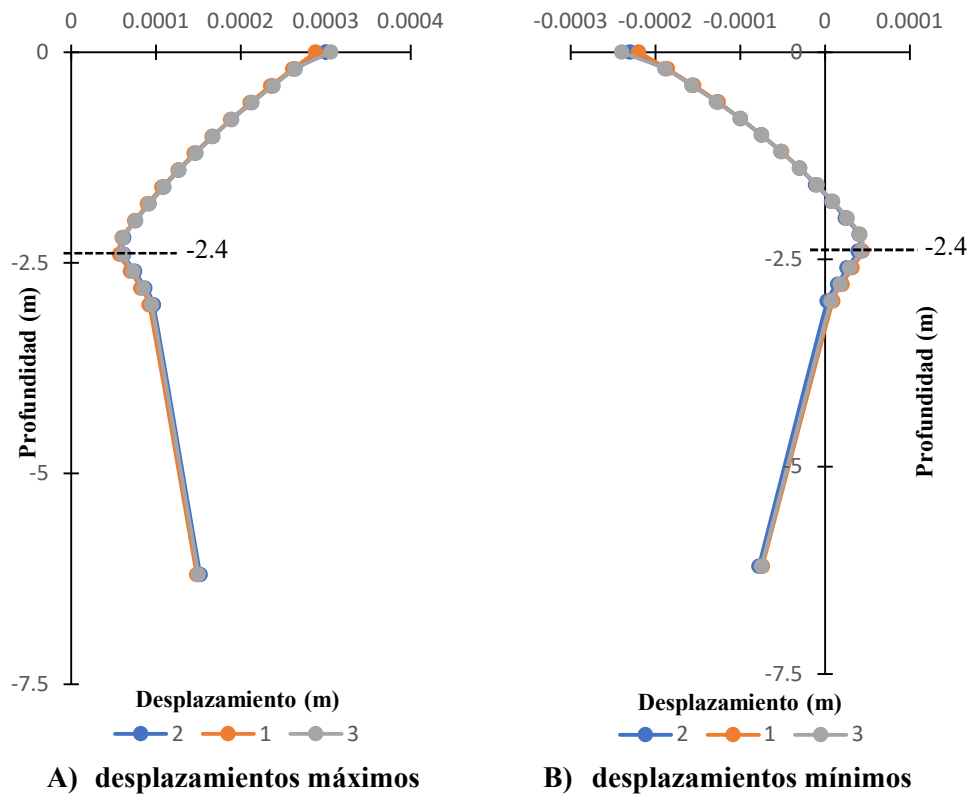
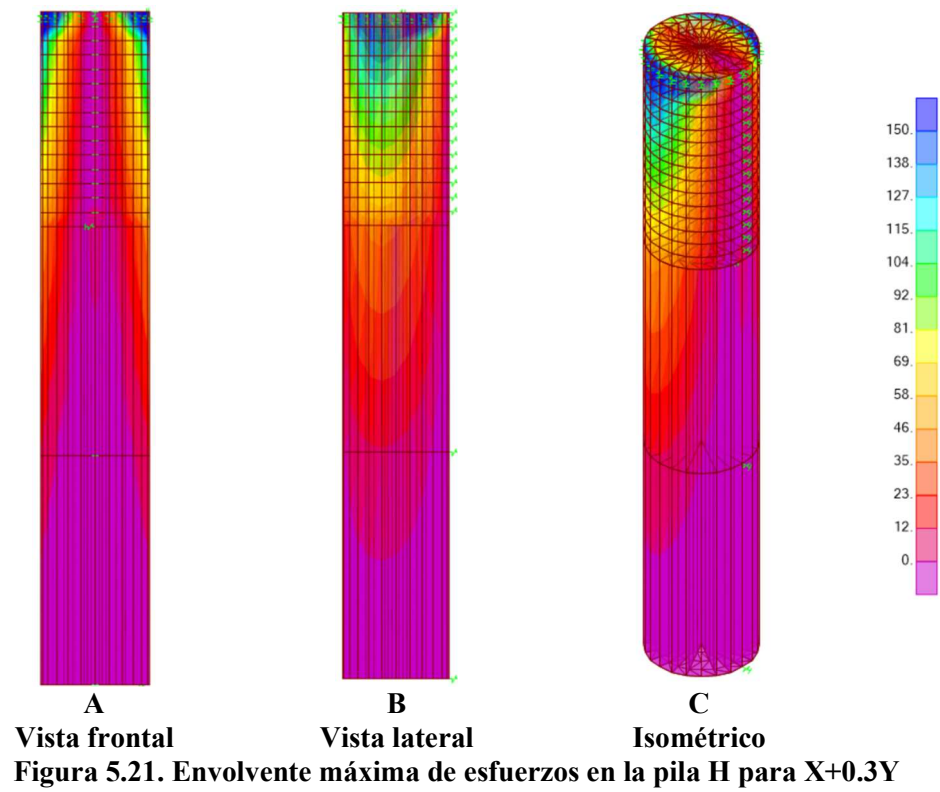


A) desplazamientos máximos

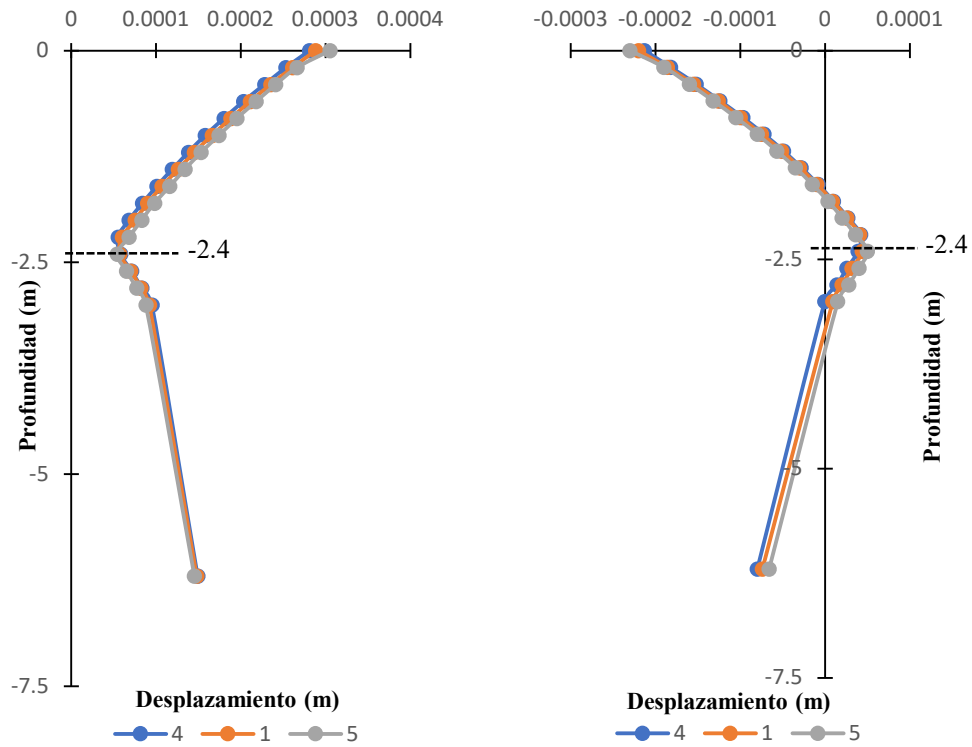
B) desplazamientos mínimos

Figura 5.20. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente X, con X+0.3Y

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO



A) desplazamientos máximos B) desplazamientos mínimos
 Figura 5.23. Desplazamientos de los nodos 1, 4 y 5 en la componente Y, con $0.3X+Y$

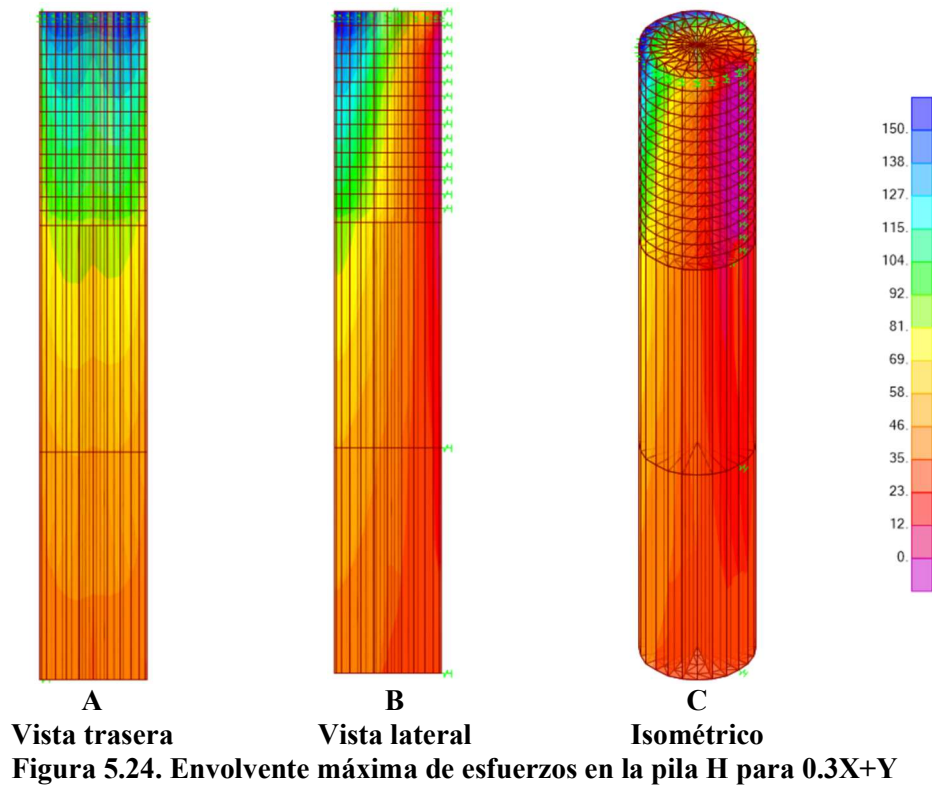


Figura 5.24. Envolvente máxima de esfuerzos en la pila H para $0.3X+Y$

5.2.4 Articulación plástica alejada

Las NTCC-04, en el apartado 7.5, refieren a las uniones entre una columna y una viga. Estas mencionan la articulación plástica alejada de la columna, la que no puede superar 1.5 del peralte efectivo de la viga.

Esta cuestión se adaptó al caso de estudio, debido a las especificaciones mencionadas, y se consideró el diámetro de las pilas como el peralte de la viga, ya que son los elementos secundarios de la unión. Como resultado, se obtuvo la distancia máxima donde se presentan las deformaciones, que no debe superar los 2.25 m por debajo de la zapata, longitud efectiva de la pila o los -5.15 m de profundidad.

En el caso de la pila H se excede el límite marcado, pero sólo en la combinación $0.3X+Y$ en la componente Y.

5.2.5 Cálculo de momentos en pilas

Asimismo, se calcularon los momentos flexionantes en la pila F (figura 5.6-A), bajo la demanda sísmica en el eje Y (vertical). Para ello se integraron los esfuerzos presentados en la sección transversal de la pila, desde la unión pila-zapata o a una profundidad de -2.9 m hasta la cabeza de la pila.

En la figura 5.25, se observan los diagramas de esfuerzos de la pila a una profundidad de -3.1 m o a 0.2 m de longitud efectiva de pila, de compresión (A) y tensión (B). Los valores máximos son -175, -20 (centro de la pila) y 135 t/m² para compresión, carga muerta y tensión, respectivamente.

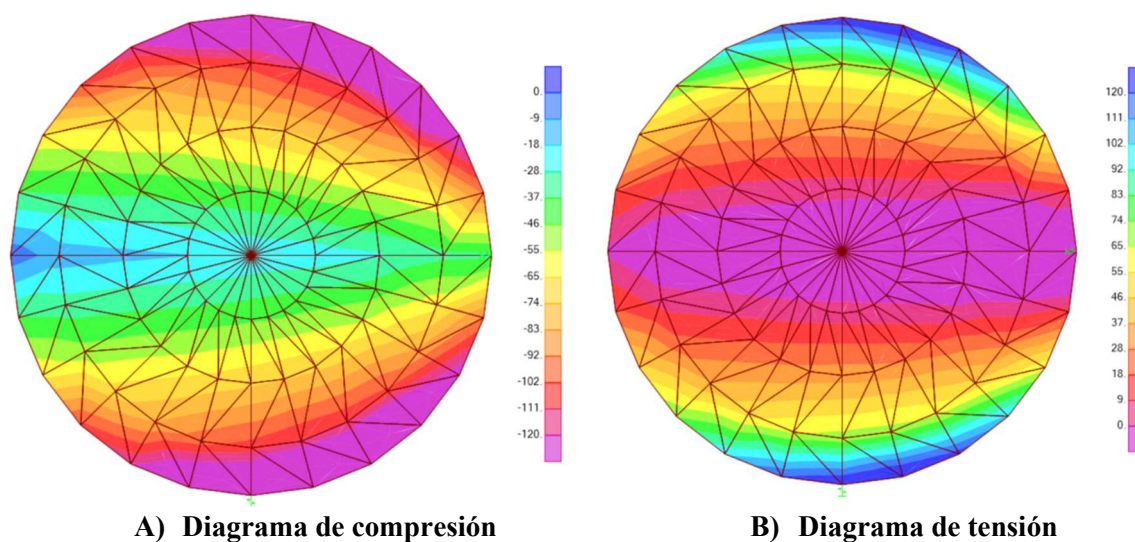


Figura 5.25. Diagramas de esfuerzos de la pila

La tabla 5.2, muestra el momento resultante a diversas profundidades de la pila F. En ella se observa que en las profundidades -4.1 y -4.3 existe una reducción de momento en comparación con los cambios que hay entre las profundidades superiores. De la misma forma, en la figura 5.26, se graficaron los valores del momento respecto a su profundidad.

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

Tabla 5.2. Valores de momento en la pila F en varias profundidades

Profundidad (m) Total	Longitud de pila	Compresión	Carga muerta	Tensión	Esfuerzos sin carga muerta		Momento
		(t/m ²)	(t/m ²)	(t/m ²)	(t/m ²)	(t/m ²)	(t*m)
-2.9	0	-100	-15	70	-85	85	28.16
-3.1	-0.2	-175	-20	135	-155	155	51.36
-3.3	-0.4	-135	-20	95	-115	115	38.10
-3.5	-0.6	-129	-20	86	-109	106	35.12
-3.7	-0.8	-122	-20	79	-102	99	32.80
-3.9	-1	-119	-20	79	-99	99	32.80
-4.1	-1.2	-115	-21	73	-94	94	31.15
-4.3	-1.4	-108	-24	60	-84	84	27.83
-4.5	-1.6	-105	-25	54	-80	79	26.18
-4.7	-1.8	-103	-26	50	-77	76	25.18
-4.9	-2	-100	-26	49	-74	75	24.85
-5.1	-2.2	-97	-27	45	-70	72	23.86
-5.3	-2.4	-93	-27	39	-66	66	21.87
-5.5	-2.6	-91	-28	33	-63	61	20.21
-5.7	-2.8	-89	-29	31	-60	60	19.88
-5.9	-3	-79	-31	18	-48	49	16.24
-9.1	-6.2	-58	-36	-14	-22	22	7.29
-12.3	-9.4	-51	-44	-37	-7	7	2.32
-15.5	-12.6	-59	-53	-47	-6	6	1.99
-18.7	-15.8	-67	-61	-55	-6	6	1.99
-21.9	-19	-74	-70	-66	-4	4	1.33
-25.1	-22.2	-81	-78	-75	-3	3	0.99
-28.3	-25.4	-84	-82	-80	-2	2	0.66
-31.5	-28.6	-61	-60	-59	-1	1	0.33
-34.7	-31.8	-51	-50	-49	-1	1	0.33
-37.9	-35	-48	-48	-48	0	0	0 0

En la figura 5.26, se puede observar el comportamiento de los momentos, los valores se reducen conforme se aleja de la unión pila-zapata, hasta hacerse cero en la cabeza de la pila. Los momentos mayores se encuentran en el área adyacente a la unión pila-zapata, en la zona rígida.

5. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL MODELO MATEMÁTICO

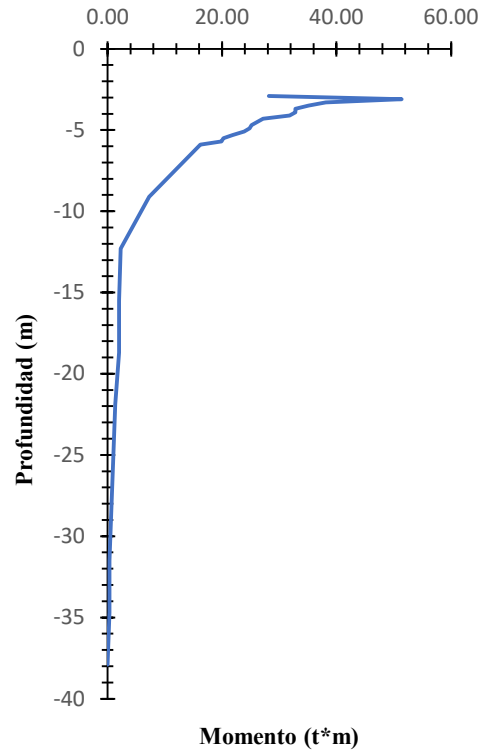


Figura 5.26. Comportamiento de los momentos respecto la profundidad

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se analizó la unión pila-zapata de la cimentación de un apoyo mediante un modelo de elementos finitos con sólidos, calibrado con métodos estáticos y dinámicos en el programa de análisis estructural SAP2000. Los resultados arrojaron, en primer lugar, los desplazamientos de los elementos adyacentes a las uniones pila-zapata con lo que se determinó la existencia de una zona rígida en la longitud efectiva de las pilas.

En ese sentido, los resultados obtenidos indican que la zona adyacente a la unión pila-zapata tuvo un desplazamiento lineal que cambia de dirección en un punto de inflexión, afirmando la existencia de una zona rígida; la que es de longitud variada, y que depende de la ubicación de la pila y de la combinación de efectos bidireccionales a la que sea expuesta.

Por consiguiente, los diagramas de esfuerzos tienen relación con la zona rígida, que termina en la zona donde los esfuerzos se reducen, implicando que la rigidez de la pila en la zona rígida es mayor a la que tiene en el resto de su longitud. En el caso de las pilas de centro, pila F y H, se muestra el cambio de signo de los esfuerzos en cortas distancias según sea el caso de la combinación en la que se evalúan.

Respecto a los valores de momentos en las profundidades -2.9 a -3.1 hay un incremento, es donde empieza la longitud efectiva de las pilas y a -4.1 a -4.3, cercanas a final de la zona rígida en la pila F. Por lo tanto, se puede decir que el valor del momento está relacionado con la existencia de la zona rígida. Estos valores están dentro de los parámetros de la conexión plástica alejada, ya que se encuentran entre 1 y 1.5 diámetros de la pila, respecto a la longitud de la pila.

En conclusión, con base en los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, se puede afirmar la existencia de una zona rígida que se presenta en todas las pilas, lo que debe considerarse al hacer el cálculo y diseño estructural para la distribución del acero de refuerzo en el armado y para la distancia de los estribos. De esta forma, podría obtenerse un diseño confiable, con el que podría evitarse algún tipo de falla en las pilas.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ACI-1985, (1985), Committee 325, Report: "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACZ Struct. J., vol. 82, no. 3, pp. 266-283.

Bazán E. y Meli R, (2018), "Diseño sísmico de edificios", Limusa, México.

Celigüeta J.T., (2011). "Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural". UNICOPIA C.B. España.

CSI, (2014), Coordinación CSI LATINOAMERICA & Morrison Ingenieros "Valores del factor de zona rígida que se asigna en "end length offset" en los nudos". República Dominicana.

CRSI, (1988), CRSI Engineering Practice Committee, "Reinforced Concrete Design Includes Approval of Details", Concl: Znt., vol. 10, no. 1, pp. 21-22.

Deméneghi A., (2000). "Método del elemento finito. Análisis lineal". Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Elicabe A., Simonetti I., y González G., (2014), "Estructuras III Estructuras sismorresistentes". Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño Industrial, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Juárez E., y Rico A., (2004). "Mecánica de Suelos, tomo dos. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos", Segunda edición, Limusa. México.

Meli R., (2018), "Diseño estructural", Segunda edición, Limusa, México.

Mora R.E., (2012), "Estudio del comportamiento de marcos de concreto de puentes urbanos sometidos a distintas intensidades sísmicas, incursionando en diferentes estados límite". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, México.

Nilson A., (1999), "Diseño de estructuras de concreto", 12a edición, McGraw-Hill, Colombia.

Ortiz A., Ruiz O., y Ortiz J.A., (2013), "Modelado de procesos de manufactura". Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Ottazzi G, (2014), "Apuntes del curso: análisis estructural I". Facultad de Ciencias e Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

Parada J.A., Ramírez A.E., y Villalta S.L., (2011), "Diseño de pilotes colados in situ mediante un análisis manual y haciendo uso de software especializado, su aplicación y procesos constructivos". Facultad multidisciplinaria oriental departamento de Ingeniería y Arquitectura. Universidad del Salvador, Argentina.

Park R., Paulay E., (1988), "Estructuras de concreto reforzado". Primera edición, cuarta reimpresión. Limusa, México.

Ramírez A., (2011), "Comportamiento de conexiones semirrígidas en estructuras de acero ubicadas en la Ciudad de México". Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Wight J. y McGregor J., (2009), "Reinforced concrete: mechanics and design". Sexta edición, Pearson, Nueva Jersey, Estados Unidos.

Zienkiewicz O. C., y Taylor R.L., (1994), "El Método de los Elementos Finitos (Vol. 1)", (C. I. Ingeniería, Trad.), McGraw-Hill/ Interamericana de España, S. A., Barcelona, España.