



**Asistencia técnica para la ejecución de la obra CAM Sabaneta y estudio de la nueva guía
práctica de interacción suelo-estructura FEMA P-2091**

Deisy Yulieth Vallejo Huertas

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Civil

Asesores

John Faber Dávila Illesca, Magíster (MSc)

Farith De Jesús Otalvaro Castro, Especialista (Esp)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	(Vallejo Huertas, 2021)
Referencia	Vallejo Huertas, D. (2021). <i>Asistencia técnica para la ejecución de la obra CAM Sabaneta y estudio de la nueva guía práctica de interacción suelo-estructura FEMA P-2091</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Claudia Helena Muñoz Hoyos.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	10
Introducción	11
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos.....	12
Alcance.....	12
Descripción del proyecto.....	13
Marco teórico	17
Asistencia técnica.....	17
Acta parcial de pago.....	18
Detalles constructivos	18
Cotización en las empresas	19
Interacción suelo-estructura	19
Amortiguamiento	20
Cortante en la base Vs.....	20
Espectro.....	20
Espectro de diseño.....	20
Fuerzas sísmicas	20
Histéresis	20
Masa modal efectiva M^*	20
Método de la fuerza horizontal equivalente (FHE).....	21
Perfil del suelo.....	21
Período de vibración, T	21
Período de vibración fundamental.....	21

Pórtico Arriostrado	21
Pórtico con diagonales concéntricas.....	21
Resistencia.....	21
Sismo.....	22
Sistema de resistencia sísmica.....	22
Métodos para modelar una edificación mediante la interacción suelo-estructura.....	22
Movimiento de campo libre	23
Interacción cinemática.....	23
Interacción inercial.....	24
Consideraciones de la interacción suelo estructura en la nsr-10.....	24
Metodología	26
Procedimiento para consignación de memorias de cálculo.....	26
Procedimiento dibujo técnico de detalles constructivos	27
Procedimiento para realizar una cotización.....	27
Resultados de la ejecución de actividades para la asistencia técnica en obra	28
Memorias de calculo	28
Detalles constructivos	29
Cotizaciones	30
Descripción de la guía práctica para el análisis de efecto de interacción suelo-estructura FEMA P-2091-20.....	30
Situaciones donde la ISE es importante.	34
Áreas grandes de cimentación en un edificio reducen las fuerzas del diseño.	34
La incorporación de bases empotradas reduce las fuerzas de diseño.	35
Las relaciones altas de rigidez de la estructura alargan el período y cambian las fuerzas de diseño.	36
La oscilación en la cimentación genera impactos en el comportamiento de la superestructura.	38

Prueba práctica de la ISE	40
Calculo de la velocidad media efectiva de la onda de corte.	41
Determinar el período fundamental de la estructura.	43
Efecto de una losa de cimentación	43
Ecuación principal.	44
Calculo de la longitud efectiva de la cimentación.	45
Análisis de criterios al aplicar el promedio de la losa de cimentación.	45
Efectos de empotramiento	47
Cimentación y flexibilidad del suelo.....	53
Propiedades del suelo para el cálculo de la flexibilidad.	54
Resortes verticales y rotacionales.	54
Resortes horizontales.	56
Análisis de límites.....	58
Alargamiento del período.....	58
Amortiguamiento en la cimentación	60
Conclusiones	62
Bibliografía.....	64
Anexos.....	65

Lista de tablas

Tabla 1 Cargas a nivel de cubierta.	90
Tabla 2 Cargas en el segundo nivel.	90
Tabla 3 Resumen de la distribución del peso sísmico.	91
Tabla 4 Distribución vertical de fuerzas sísmicas.	93
Tabla 5 Áreas centrales de la riostra transversal.	94
Tabla 6 Áreas centrales de la riostra longitudinal.	94
Tabla 7 Momentos resistentes.	98
Tabla 8 Presiones del suelo.	98
Tabla 9 Momentos resistentes.	99
Tabla 10 Presiones del suelo.	99
Tabla 11 Resistencia lateral total: dirección transversal con un desplazamiento de 0,015 in....	104
Tabla 12 Resistencia lateral total: dirección longitudinal con un desplazamiento de 0,035 in..	105
Tabla 13 Valores de rigidez de los resortes.	106
Tabla 14 Períodos fundamentales para modelos de base fija y flexible.	107
Tabla 15 Tabulación de la respuesta sísmica reducida.	114
Tabla 16 Áreas centrales de la riostra transversal.	116
Tabla 17 Áreas centrales de la riostra longitudinal.	116
Tabla 18 Valores actualizados de rigidez de los resortes.	117
Tabla 19 Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible. ...	118
Tabla 20 Tabulación de la respuesta sísmica reducida.	118
Tabla 21 Tabulación de la respuesta sísmica reducida con y sin promedio de la losa de cimentación.	121
Tabla 22 Áreas centrales de la riostra transversal.	123
Tabla 23 Áreas centrales de la riostra longitudinal.	123

Tabla 24 Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible...124

Tabla 25 Tabulación de la respuesta sísmica reducida.....124

Tabla 26 Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible...125

Tabla 27 Tabulación de la respuesta sísmica reducida.....126

Lista de figuras

Figura 1 Localización general del proyecto CAM Sabaneta.	14
Figura 2 Visualización general del proyecto, fachada occidental.	14
Figura 3 Proyección visual de unidades constructivas.	15
Figura 4 Unidad constructiva denominada Alcaldía.	16
Figura 5 Unidad constructiva denominada Acceso.	17
Figura 6 Tipos de análisis para modelar un edificio bajo la interacción suelo-estructura.	23
Figura 7 Movimiento de campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial.	24
Figura 8 Edificio de dos pisos con pórtico reforzado en acero.	32
Figura 9 Edificio de doce pisos de concreto reforzado.	33
Figura 10 Edificio de la izquierda con un área de cimentación mayor tendrá fuerzas de diseño más bajas que el edificio a la derecha con un área de cimentación más pequeña.	35
Figura 11 El edificio de la izquierda con una base más profunda normalmente tendrá una mayor reducción en las fuerzas de diseño que el edificio de la derecha.	36
Figura 12 Estructura donde la flexibilidad del suelo tendrá un impacto significativo en el desplazamiento lateral y el período fundamental de la estructura.	37
Figura 13 Impactos significativos del alargamiento del período y amortiguamiento de la base en la respuesta espectral. La línea negra continua es la respuesta espectral de base fija; la línea negra discontinua es la reducción debida a la adición del amortiguamiento de la cimentación en relación del amortiguamiento total.	38
Figura 14 Impacto significativo de la flexibilidad del suelo en un sistema de arriostramiento.	39
Figura 15 Impacto significativo de la flexibilidad del suelo en un sistema de muro de corte de hormigón armado (ATC, 1996). (Una base rígida/fuerte no siempre es una condición favorable; Tampoco una base flexible/débil siempre representa algo muy conservador).	40
Figura 16 Ejemplos de configuraciones de bases de edificios, que muestran diferentes grados de interconectividad.	46
Figura 17 Profundidad de empotramiento para un edificio sobre vigas de rasante y zapatas corridas.	49

Figura 18 Profundidad de empotramiento para un edificio con sótano sobre zapatas de tira perimetral y zapatas de extensión interior.	50
Figura 19 Máxima profundidad de empotramiento.	50
Figura 20 Profundidad de empotramiento para un sótano parcial más pequeño.	51
Figura 21 Profundidad de empotramiento para un sótano parcial más grande.	52
Figura 22 Profundidad de empotramiento en un sitio inclinado.	53
Figura 23 Métodos para modelar la cimentación mediante resortes verticales y rotacionales.	55
Figura 24 Curva de movilización de presión pasiva.	57
Figura 25 Ejemplo de espectros de aceleración y desplazamiento.	59
Figura 26 Ejemplo de cimentación y superestructura donde no se permite el amortiguamiento de la cimentación porque las zapatas no están conectadas lo suficientemente cerca.	61
Figura 27 Visual en planta del conjunto residencial VA Loma Linda Healthcare.	82
Figura 28 Visual geográfica de la zona.	83
Figura 29 Perfil de suelo generalizado para el sitio de Loma Linda.	84
Figura 30 Espectro de respuesta de aceleración de diseño.	86
Figura 31 Vista general del edificio.	87
Figura 32 Planta típica del edificio (planta de techo similar).	87
Figura 33 Planta de cimentación.	88
Figura 34 Diagrama de cuerpo libre de un pórtico transversal típico que muestra las demandas de vuelco reducidas en un 25% y las cargas de gravedad factorizadas máximas.	97
Figura 35 Curva de movilización de presión pasiva.	103
Figura 36 Forma desplazada de primer modo de un pórtico típico con flexibilidad de cimentación incluida.	107
Figura 37 Reducciones por el promedio de la losa de cimentación en relación con el período de la estructura para tres valores de tamaño efectivo de cimentación.	121

Resumen

Construcciones Civiles Y Pavimentos S.A.S. (CONCYPA) es una empresa Antioqueña dedicada a la construcción de obras civiles en general y mantenimiento de vías. CONCYPA es la entidad encargada de la CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA ETAPA DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL "CAM" Y OBRAS COMPLEMENTARIAS EN EL MUNICIPIO DE SABANETA. Proyecto, en el cual se brindó asistencia técnica durante el desarrollo de la pasantía, mediante el seguimiento en los diferentes procesos constructivos llevados a cabo en la ejecución de la obra, la verificación de la buena práctica de construcción, la planificación y evaluación de las actividades, el cálculo de cantidades de obra, el registro de memorias de cálculo para revisión y aprobación de actas parciales de pago, el diseño de detalles constructivos, la solicitud y registro de cotizaciones, entre otras.

En adición y como complemento, se estudió un aspecto de gran interés que guarda relación con el diseño estructural y hace referencia al tema de interacción suelo-estructura. Bajo este enfoque se analizó los métodos para modelar una estructura, las situaciones que condicionan la importancia de un análisis de ISE, la influencia de la ISE con base en la relación de rigidez suelo-estructura, los efectos que proporcionan, una losa de cimentación, la flexibilidad del suelo, el empotramiento de la cimentación y el amortiguamiento de la cimentación. Finalmente se estudió un ejemplo de aplicación de un edificio de acero de dos niveles, modelado mediante el análisis de ISE, este incorporo el efecto del amortiguamiento de la cimentación, así como la incidencia debida a la presencia de una losa de cimentación, lo cual permitió generar al final del diseño la obtención de secciones transversales en las riostras de menor dimensión y cimentaciones más estrechas y de menor profundidad.

Palabras clave: asistencia técnica, acta parcial de pago, interacción suelo-estructura.

Introducción

Planear el crecimiento de forma organizada y priorizar los espacios públicos se ha convertido en un objetivo fundamental para todos los entes de administración municipal a nivel nacional. Para cumplir este propósito, la alcaldía de Sabaneta, proyectó la construcción de un centro administrativo municipal (CAM), que agrupa a todas las secretarías que actualmente se encuentran en diferentes sedes (Semana, 2019) El nuevo proyecto integra el pensamiento medioambiental y social, he incorpora aspectos como el diseño bioclimático y la promoción del espacio público. El primero de estos aspectos se ejemplifica con el uso de fachadas verdes y la ubicación de un patio central que facilita la ventilación natural de la estructura minimizando el uso de equipos de aire acondicionado. El segundo aspecto, relacionado con el buen uso del espacio público, se proyecta con el desarrollo de una gran plazoleta que habilite la reunión y el disfrute de los ciudadanos del municipio y sus visitantes. (Alcaldía de Sabaneta, 2018)

Este informe presenta la descripción de las actividades realizadas durante el desarrollo de la pasantía en un tiempo de seis meses en la empresa Construcciones Civiles y Pavimentos S.A.S. Estas incluyen la asistencia técnica en las labores de ingeniería de la construcción para el desarrollo del proyecto CAM de Sabaneta y el estudio de la reciente guía práctica FEMA P-2091 como un documento técnico de interés en el diseño y la construcción de este tipo de edificaciones.

Objetivos

Objetivo general

Brindar asistencia técnica y apoyo en los diferentes procesos constructivos llevados a cabo en el centro administrativo municipal, logrando a partir de ello, poner en práctica los conocimientos adquiridos en el tema de construcciones civiles. En adición, se busca estudiar un aspecto de gran interés que guarda relación con el diseño estructural y hace referencia al tema del análisis ISE.

Objetivos específicos

- Revisar y controlar las actividades constructivas con el fin de ejecutar la obra de acuerdo a las especificaciones técnicas, cumpliendo lo planteado en los planos, en el cuadro de cantidades, en los presupuestos entregados por el cliente y el cronograma de obra.
- Describir las técnicas propuestas en la guía FEMA P-2091 para el análisis de la Interacción suelo - estructura
- Ejemplificar un análisis de ISE mediante una estructura de acero de dos niveles, para establecer las consideraciones actuales sobre la influencia de los efectos de la interacción suelo-estructura en las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, las derivas y la cortante sísmica en la base.

Alcance

Apoyar técnicamente la ejecución del proyecto de construcción del centro administrativo municipal de Sabaneta en las actividades concernientes al edificio y urbanismo del proyecto; Para el primero de estos aspectos las actividades se distribuyen en los siguientes ítems específicos de construcción: estucos y pinturas, cielos falsos, pisos y zócalos, carpintería metálica, instalaciones sanitarias, instalaciones eléctricas, impermeabilizaciones en pisos y cubiertas y demás actividades complementarias a cada ítem. Para el segundo aspecto relacionado con el urbanismo las actividades de construcción se distribuyen en los siguientes ítems: excavaciones, llenos y demoliciones, concretos vaciados, concretos prefabricados, instalación de pisos, estructura metálica para pasamanos y domos, iluminación, componente arbóreo, instalaciones hidráulicas, mampostería y demás actividades complementarias a cada ítem. Para desarrollar estas actividades la programación de obra establece una duración de 144 días.

Para complementar el desarrollo de la pasantía se estudió la nueva guía de interacción suelo-estructura FEMA P-2091, con el fin de describir de forma general las características principales y la metodología del análisis de interacción suelo-estructura a implementar en el diseño estructural de edificaciones e ilustrarlo con un ejemplo práctico.

Descripción del proyecto

El Centro Administrativo Municipal de Sabaneta contempla la construcción de tres unidades constructivas, las cuales son Alcaldía, Concejo y Acceso. El desarrollo del proyecto se planeó en dos fases. La primera de ellas, comprende la construcción de un edificio para la Alcaldía incluido una plazoleta y un edificio para Acceso; la segunda fase considera la construcción de un edificio para el Concejo. El proyecto de construcción está localizado en el barrio Sabaneta Real, las vías principales de acceso son por el costado oriental la carrera 45 y por el costado occidental la carrera 46, el lote de intervención se encuentra contiguo a la biblioteca pública municipal Juan Carlos Gaviria Montoya Montoya. En la *Figura 1* se muestra la localización del proyecto CAM SABANETA y en las figuras *Figura 2* y *Figura 3* se muestra una proyección ilustrativa del proyecto.

Figura 1

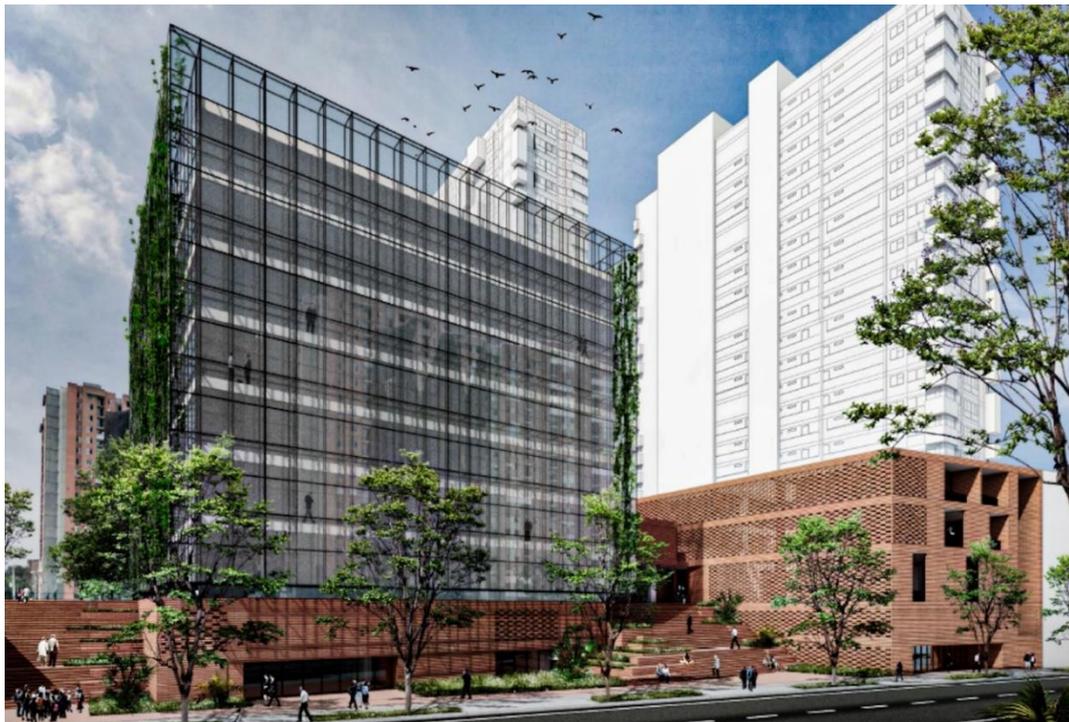
Localización general del proyecto CAM Sabaneta.



Nota. Fuente Cartilla explicativa del proyecto.

Figura 2

Visualización general del proyecto, fachada occidental.



Nota. Fuente Cartilla explicativa del proyecto.

Figura 3

Proyección visual de unidades constructivas.



Nota. Fuente Cartilla explicativa del proyecto.

En cuanto al diseño estructural, el edificio del CAM se diseñó bajo el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, atendiendo al grupo de uso III, estructura de atención a la comunidad y con capacidad de disipación moderada de energía DMO. En este proyecto se empleó un sistema estructural aporticado, para resistir todas las cargas verticales, fuerzas horizontales y momentos. El suelo de soporte que recibe las cargas de la estructura tiene una capacidad de 1350 kPa. Para la transferencia de las cargas de la estructura al suelo de apoyo, el tipo de cimentación es el de pilas pre excavadas a 12.00m de profundidad.

En correspondencia al proyecto, la construcción de la Alcaldía consta de una edificación de 7 niveles y 2 sótanos; Arquitectónicamente, cuenta con una fachada verde, lo cual disminuye la necesidad del uso de equipos de aires acondicionados. En su centro tiene un gran patio que permite que el viento que ingresa por este espacio mantenga fresco el edificio y adicionalmente permite la posibilidad de lograr la iluminación natural para las oficinas.

Por su parte, el Acceso, es un espacio constructivo que comprende un hall urbano, constituido como un espacio de encuentro lúdico para permitir la articulación entre las actividades de la Alcaldía y el Concejo.

La primera fase constructiva inició en el año 2019 y tiene una proyección de entrega para el año 2021. Cabe mencionar que, al momento de iniciar el proceso de pasantía en el centro administrativo municipal de Sabaneta, el avance del proyecto de construcción era del 70%, con un 30% restante correspondiente a las actividades de acabados, urbanismo, cerramiento, acondicionamiento y demás detalles finales de la estructura como tal. En las Figuras **Figura 4** y **Figura 5** se puede observar una ilustración del avance del proyecto al día 01 de marzo de 2021. (Alcaldía de Sabaneta, 2018)

Figura 4

Unidad constructiva denominada Alcaldía.

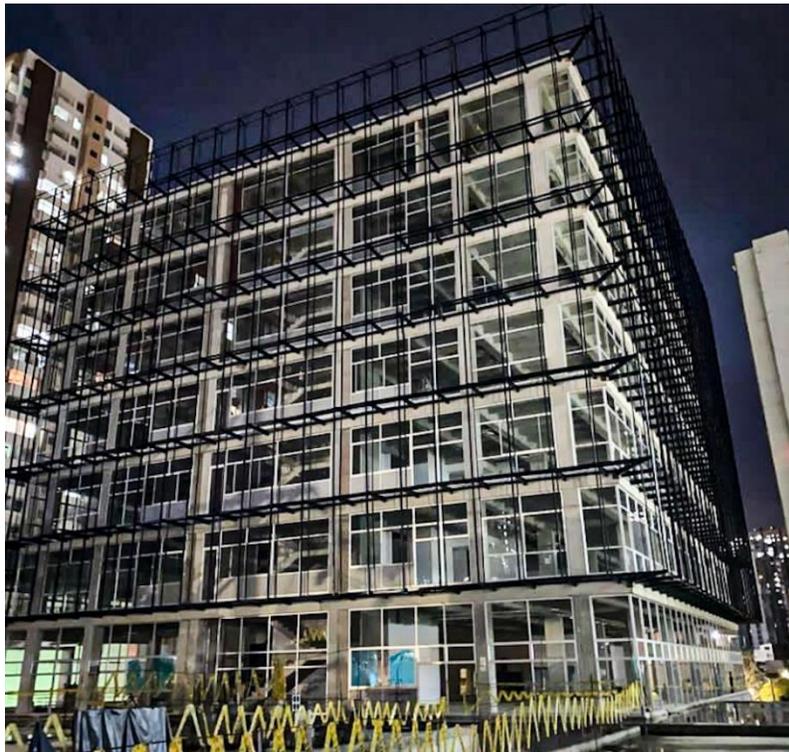
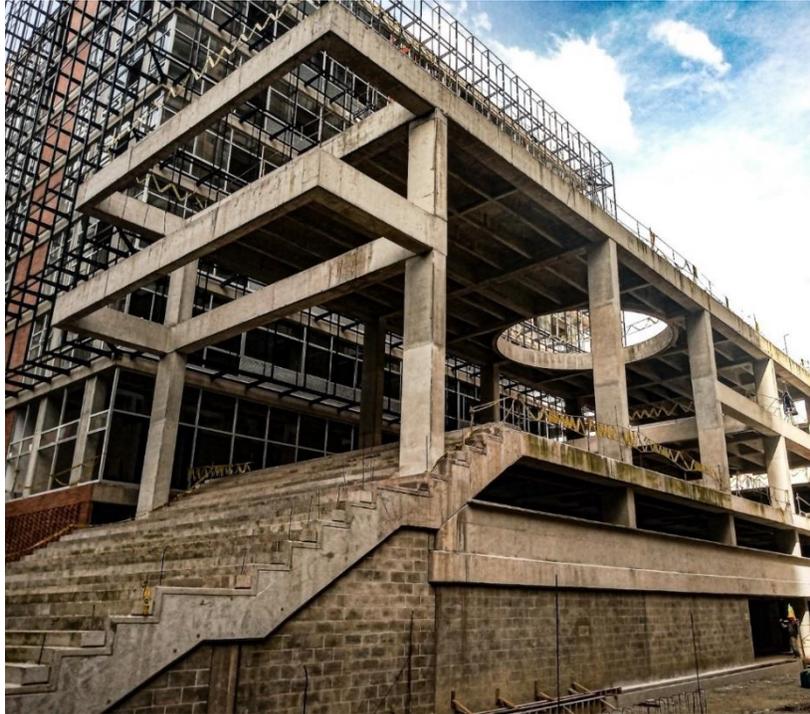


Figura 5

Unidad constructiva denominada Acceso.

**Marco teórico**

Para la contextualización de los distintos aspectos tratados en este informe, se presenta en esta sección una descripción detallada de algunos conceptos técnicos relacionados con las actividades realizadas durante la práctica profesional. Estos conceptos se relacionan tanto con las tareas de asistencia técnica en obra como con los principios tratados en la guía práctica en estudio.

Asistencia técnica

La asistencia técnica en la construcción es una actividad utilizada para garantizar la calidad y controlar los posibles riesgos en las actividades de obra civil. La asistencia técnica comprende la ejecución de tareas para la búsqueda del cumplimiento de la normativa aplicable, el seguimiento de los las actividades durante la ejecución de la obra, la verificación de la buena práctica en los procesos constructivos y la evaluación de las actividades.(PROVILACOR, s. f.)

Acta parcial de pago

El acta parcial de pago, es el documento que tiene la facultad de certificar al contratista el cumplimiento de cada uno de los resultados pactados en el contrato y así recibir su respectivo pago de manera periódica. La información relacionada en el Acta Parcial de Pago incluye una memoria de cálculo de cantidades de obra con su respectivo registro fotográfico, esta, debe ser revisada y aprobada por el interventor del contrato, dado que es la persona encargada de garantizar la efectividad en el cumplimiento de las actividades en el tiempo establecido. (*circular-49-instructivo-diligenciamiento-acta-parcial-de-pago.pdf*, s. f.)

El cálculo de cantidades de obra para cada actividad constructiva requiere de una metodología que permita registrar la información de una manera ordenada, ágil, y que adicionalmente, ofrezca la posibilidad de controlar, revisar y editar las cantidades cada que sea necesario, puesto que según el avance de determinada actividad constructiva será la cantidad presentada en el acta, es decir no siempre se presenta la cantidad total de dicha actividad.

Para realizar una memoria de cálculo son indispensables los planos, las especificaciones técnicas y el listado de actividades constructivas que componen el proyecto de edificación.

Independiente del sistema empleado para el cálculo de las cantidades de obra, es eficiente preparar con antelación formatos adicionales para el cálculo de actividades según el tipo de material o ítem a realizar. De forma general estos formatos pueden incluir la siguiente información: Descripción de la actividad, Tipo de elemento, Unidad de medida, Ubicación, Dimensión, Forma, y Cantidad. (WORDPRESS, 2010)

Detalles constructivos

Un detalle constructivo es una representación gráfica pormenorizada de un punto concreto de construcción, la finalidad de un detalle constructivo es visualizar de forma correcta y detallada el despiece de varios elementos. (FICHEROTECNIA, 2020)

Durante la ejecución de la obra es necesario realizar detalles constructivos, puesto que los planos macro, de la edificación normalmente no incluyen elementos externos necesarios para una

buena funcionalidad de la edificación, detalles menores como andenes, cárcamos, jardineras, pedestales, entre otros, de ahí que para determinar claramente el diseño final y las cantidades de obra es preciso realizar un detalle constructivo, el cual debe ser aprobado por interventoría y por el cliente, una vez el diseño se haya revisado y aprobado se puede llevar a cabo la actividad constructiva.

Cotización en las empresas

Una cotización es un documento que brinda información detallada de un bien o servicio para el proceso de compra o negociación. Para obtener una cotización el cliente es el encargado de realizar una solicitud formal a cierta empresa, suministrándole la información necesaria para que dicha empresa realice la cotización. De forma general, el cliente suministra los siguientes datos: Identificación de la empresa Nombre y NIT, (en algunos casos es necesario el RUT), nombre del proyecto de construcción y ubicación para definir con antelación costos por transporte de material o servicio, especificaciones técnicas y en caso de existir, se envían planos para su respectiva cotización.

Normalmente esta solicitud de cotización se envía a varias empresas, pues lo que se busca es comparar especificaciones y precios para elegir el cotizante que más se ajuste con el presupuesto y las especificaciones dadas. Cabe mencionar que la empresa solicitante está en el derecho de decidir aceptar, modificar o rechazar una cotización y no tiene ninguna obligación de pagar por solicitar una cotización. (Meza, 2018)

Interacción suelo-estructura

La interacción suelo-estructura es el efecto que tienen en la respuesta estática y dinámica de la estructura las propiedades de rigidez del suelo que da apoyo a la edificación, en conjunto con las propiedades de rigidez de la cimentación y de la estructura. (NSR-10, 2012)

La ISE puede señalar una diferencia sustancial tanto en el comportamiento de edificios durante un movimiento sísmico, como en las fuerzas de diseño utilizadas en el modelo, dado que, un análisis ISE puede reducir las demandas sísmicas que se utilizan para el diseño. Sin embargo, hay casos inusuales con espectros de respuesta específicos del sitio donde las demandas pueden aumentar porque el alargamiento del período puede conllevar a subir el espectro de respuesta con

niveles crecientes de aceleración espectral. Generalmente el análisis de ISE es iterativo, por lo que puede requerir varias iteraciones de análisis, para converger en la solución final. (FEMA, 2020)

Amortiguamiento

Perdida de energía en un movimiento ondulatorio.

Cortante en la base V_s

Es la suma algebraica, tomada en la base, de todas las fuerzas sísmicas horizontales del edificio.

Espectro

Es la colección de valores máximos, ya sea de aceleración, velocidad o desplazamiento, que tienen los sistemas de un grado de libertad durante un sismo.

Espectro de diseño

Es el espectro correspondiente a los movimientos sísmicos de diseño.

Fuerzas sísmicas

Son los efectos inerciales causados por la aceleración del sismo, expresados como fuerzas para ser utilizadas en el análisis y diseño de la estructura.

Histéresis

Fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. En general hace referencia al comportamiento de los materiales estructurales cuando se ven sometidos a deformaciones o esfuerzos que están fuera del rango lineal, o elástico, de comportamiento. Una gran parte de la energía que es capaz de disipar el material.

Masa modal efectiva M^*

La masa modal efectiva, M^* es la masa sísmica del edificio, multiplicada por el primer factor de participación de masa modal.

Método de la fuerza horizontal equivalente (FHE)

Es el método de análisis sísmico en el cual los efectos de los movimientos sísmicos de diseño se expresan por medio de unas fuerzas horizontales estáticas equivalentes.

Perfil del suelo

Son los diferentes estratos de suelo existentes debajo del sitio de la edificación.

Período de vibración, T

Es el tiempo que transcurre dentro de un movimiento armónico ondulatorio, o vibratorio, para que éste se repita.

Período de vibración fundamental

Es el mayor período de vibración de la estructura en la dirección horizontal de interés.

Pórtico Arriostrado

Pórtico compuesto por vigas, columnas y diagonales excéntricas, o concéntricas, que se utiliza primordialmente para resistir fuerzas horizontales. Sus elementos trabajan principalmente deformándose axialmente, como en una cercha. Sus nudos pueden, o no, ser capaces de transmitir momentos flectores, dependiendo del material estructural que se emplee.

Pórtico con diagonales concéntricas

Es un pórtico con diagonales en el cual éstas llegan a los nudos conformados por las conexiones entre vigas y columnas.

Resistencia

Es la capacidad útil de una estructura, o de sus miembros, para resistir cargas, dentro de los límites de deformación establecidos en este Reglamento.

Sismo

Vibraciones de la corteza terrestre inducidas por el paso de ondas sísmicas provenientes de un lugar o zona donde han ocurrido movimientos súbitos originados por efectos tectónicos o de origen antrópico.

Sistema de resistencia sísmica.

Es aquella parte de la estructura que según el diseño aporta la resistencia requerida para soportar los movimientos sísmicos de diseño.(NSR-10, 2012)

Métodos para modelar una edificación mediante la interacción suelo-estructura

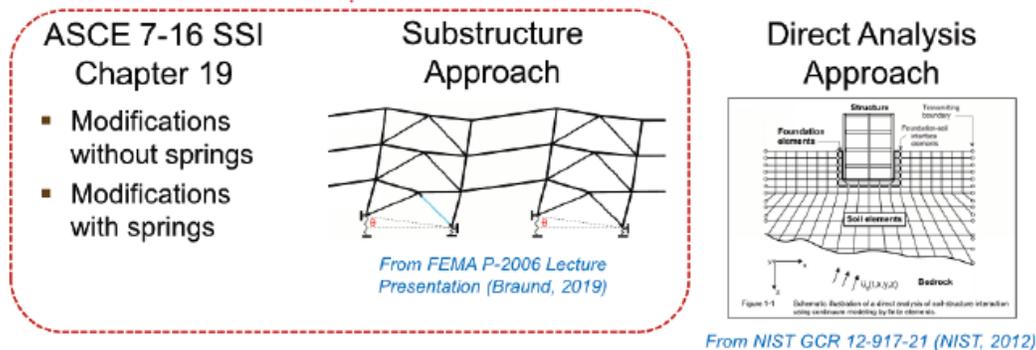
Hay dos modelos comunes para modelar la relación entre una estructura, su cimentación y el suelo que la soporta, esto incluye la flexibilidad y el amortiguamiento del suelo.

Un método es llamado **enfoque estructural**, donde el suelo es representado por resortes, los resortes son típicamente orientados de forma vertical para capturar la rotación de la cimentación que es a menudo el contribuyente dominante de los efectos de ISE. Los resortes horizontales se utilizan para capturar la capacidad de la cimentación de desplazarse horizontalmente en relación con el campo libre y los amortiguadores se utilizan para capturar el amortiguamiento de la cimentación. Sin embargo, es común que se fije la cimentación contra la traslación horizontal.

Un segundo método es llamado **enfoque de análisis directo**, es donde el suelo y la estructura se modelan utilizando elementos finitos. El modelado del suelo se extiende suficientemente alrededor y debajo del edificio para tener en cuenta las propiedades del sitio. Las ondas sísmicas se imparten en el límite del suelo, estas excitan los elementos del suelo que a su vez excitan la estructura y al mismo tiempo la estructura, con su peso inercial y otras propiedades afectan el comportamiento del suelo. En la práctica actual, el método directo se suele aplicar únicamente a grandes proyectos críticos, como centrales nucleares o grandes proyectos de infraestructura, como grandes puentes, túneles, estaciones de metro, tanques y estructuras marinas, y requiere conocimientos especializados. Para dar mayor claridad en la **Figura 6** se presenta cada uno de los enfoques descritos.

Figura 6

Tipos de análisis para modelar un edificio bajo la interacción suelo-estructura.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, 2020).

Movimiento de campo libre

El movimiento en la superficie del suelo en ausencia de una estructura y su cimentación se llama **movimiento de campo libre**, es típicamente más grande que el **movimiento de entrada de la cimentación** que excita efectivamente la estructura y su cimentación. A continuación, se muestra el movimiento de campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial.

Interacción cinemática.

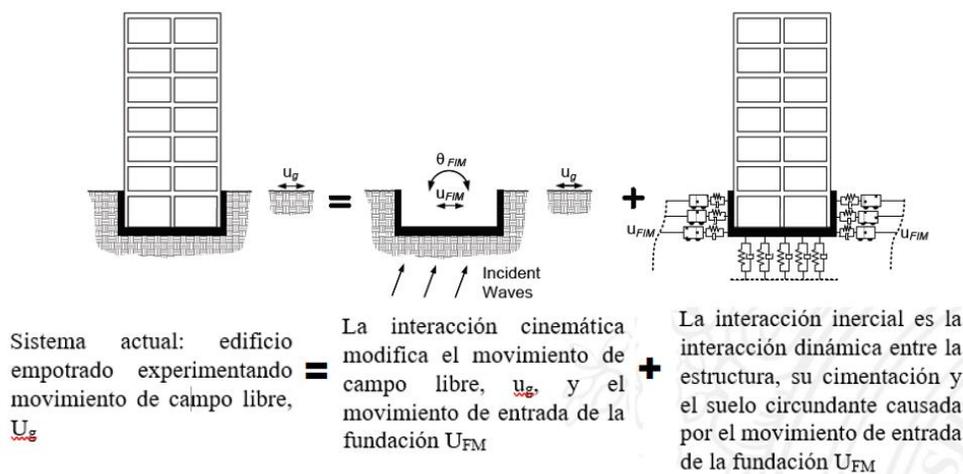
La **interacción cinemática** modifica el movimiento de campo libre del suelo a un movimiento de entrada de la cimentación como resultado de la variabilidad espacial en los movimientos de campo libre del suelo. Esos movimientos espacialmente variables se promedian dentro de la envolvente del edificio y sobre la profundidad de la cimentación. Los dos efectos cinemáticos de la ISE tienen mayor influencia por (1) **la presencia de una losa de cimentación** poco profunda donde los movimientos son causados principalmente por la incoherencia de ondas sobre el área de la cimentación y secuencialmente por las ondas sísmicas entrantes en incidencia y (2) **efectos de empotramiento**, en estructuras con cimentaciones empotradas donde se genera una reducción en los movimientos a nivel de la cimentación como resultado de la reducción del movimiento del suelo a profundidad por debajo de la superficie libre. (FEMA, 2020)

Interacción inercial.

La interacción inercial es la interacción dinámica entre la estructura, su cimentación y el suelo circundante causada por el movimiento de entrada de la cimentación, e incluye: (1) alargamiento del período de la estructura debido a la flexibilidad de la cimentación y (2) amortiguamiento por radiación, causada por la generación y propagación de ondas a una distancia lejana de la cimentación.

Figura 7

Movimiento de campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, 2020).

Consideraciones de la interacción suelo estructura en la nsr-10

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente en el numeral A.3.4.22 (método de del análisis dinámico elástico) establece que estructuras, regulares o irregulares, localizadas en sitios que tengan un perfil de suelo D, E o F y tengan un periodo mayor de $2T_c$ deben incluir los efectos de interacción suelo-estructura; es decir, la norma exige un análisis ISE en estructuras cuyo periodo característico se encuentre en la rama descendente del espectro de diseño (estructuras flexibles o de gran altura).

La NSR-10 en el capítulo 7 describe el tema de interacción suelo-estructura; en este, pone en consideración que el hecho de no incluir la rigidez de la cimentación y las características dinámicas del suelo subyacente en el análisis sísmico de la edificación puede conducir a variaciones

apreciables entre la respuesta sísmica estimada y la respuesta real de la estructura. Además de esto, presenta de forma general el alcance mínimo de una exploración geotécnica, la interpretación y las recomendaciones que debe contener un estudio geotécnico. Así mismo, recomienda tener especial cuidado con los niveles de deformación en relación a las propiedades del suelo, los cuales deben ser compatibles con los niveles de deformación que le imponen los movimientos sísmicos y determina que los procedimientos de laboratorio deben cuantificar, directa o indirectamente, las características del material bajo condiciones dinámicas y a los niveles de deformación esperados durante los movimientos sísmicos

Por otra parte, menciona, que los modelos matemáticos pueden ser estáticos o dinámicos. Estos deben describir las características de rigidez de la estructura, la cimentación y el suelo, a niveles compatibles con las deformaciones esperadas. En el modelo deben introducirse condiciones de apoyo elástico de los muros, columnas y elementos del sistema de resistencia sísmica al nivel de la cimentación, consistentes con las rigideces supuestas para obtener la respuesta de la estructura teniendo en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura. Las derivas esperadas en este caso generalmente son de mayor magnitud que las que se obtendrían al suponer la estructura empotrada en su base.

Con respecto al cortante en la base, la norma presenta dos casos, el primero de ellos aplica cuando se presente un aumento en el cortante sísmico en la base, así que, el diseño debe realizarse para el cortante obtenido utilizando la interacción suelo-estructura; el segundo caso aplica cuando debido a un aumento en el periodo estructural equivalente y/o en el amortiguamiento efectivo se presente una disminución del cortante sísmico de diseño en la base, por lo tanto, el valor del cortante sísmico de diseño en la base no puede ser menor que el que se obtendría utilizando el método de la fuerza horizontal equivalente del Capítulo A.4, empleando un período de vibración igual a $C_u T_a$ según A.4.2.1 y los espectros del Capítulo A.2.

Debido a la incertidumbre que presenta la determinación de los parámetros del suelo utilizados en el análisis de interacción suelo-estructura, deben considerarse los valores máximos y mínimos esperados de tales parámetros y utilizarse aquellos que produzcan los efectos más

desfavorables, tanto en la determinación de los cortantes sísmicos, como para el cálculo de las derivas de piso y las fuerzas de diseño de los elementos de la estructura y la cimentación.

Metodología

La metodología para el logro de los objetivos propuestos se plantea con el desarrollo y ejecución de dos conjuntos principales de actividades. El primero de ellos consiste en las tareas de acompañamiento técnico para la construcción del proyecto CAM de Sabaneta. Estas tareas incluyen la asistencia periódica a la obra, en los días lunes a sábado, cumpliendo el horario definido en el proyecto; el apoyo al residente y director de obra mediante la ejecución de detalles constructivos y trazados de diseño para la revisión de interventoría, usando para ello software de dibujo técnico; la realización de cotizaciones, y la elaboración de cuadros comparativos para definir el cumplimiento de los requerimientos y del presupuesto especificado para el proyecto, el cálculo de cantidades instaladas, cantidades por instalar, cantidades de obra, la realización de despieces para solicitar suministro de materiales para la construcción, la actualización de la programación de obra; por último para este primer grupo de actividades también se considera la supervisión continua de obra y de los frentes de trabajo durante el día para llevar control de las actividades constructivas y dar cumplimiento al cronograma. El segundo conjunto de actividades hace referencia al tema de estudio sobre la nueva guía de interacción suelo-estructura (ISE). Para esto se realizó una revisión de literatura y se estudió en detalle el documento FEMAP-2091 de diciembre de 2020, con el fin de dar a conocer los efectos y la influencia que implica incorporar en un diseño la interacción suelo-estructura.

A continuación, se especifica con detalle la metodología utilizada en tres de las actividades de obra realizadas.

Procedimiento para consignación de memorias de cálculo

- a) Se define una actividad constructiva y sus especificaciones técnicas.
- b) Se lista los materiales necesarios para dicha actividad y se define la unidad de medida de cada material.

- c) Según la unidad de medida, en un software de cálculo como Excel, se realiza un formato base para registrar los datos. Generalmente el formato debe contener la siguiente información: descripción de la actividad, localización, dimensiones, largo, ancho, alto, un subtotal que comprende longitud área y volumen y total, en el caso de un formato para acero debe contener la siguiente información: descripción de la actividad, localización, figura, diámetro de la barra, peso en kg/m y total en kg.
- d) Con la ayuda de una cinta métrica se toman y registran medidas en campo
- e) Se realiza un trazado en un software de dibujo técnico registrando todas las medidas de forma clara y ordenada con el fin de estimar las cantidades necesarias para la memoria de cálculo. Comúnmente se tienen áreas que no son simétricas, por lo tanto, el registro de información en CAD es vital porque esta herramienta permite directamente registrar las cantidades a la memoria de cálculo con una mayor agilidad.
- f) Se registra la información en el formato preparado con anterioridad, de forma clara y organizada con el fin de revisar o modificar la información cada que sea necesario.

Procedimiento dibujo técnico de detalles constructivos

- a) Se establece con claridad la funcionalidad, las condiciones constructivas, los materiales y las especificaciones técnicas del determinado elemento estructural en análisis.
- b) Según las cargas, el uso y la ubicación en obra se define las dimensiones y la configuración de acero del elemento de construcción.
- c) Se realiza el trazado del detalle constructivo en AutoCAD y se deja constancia de las observaciones pertinentes

Procedimiento para realizar una cotización

Para realizar la compra de materiales, productos o contratar un servicio se sigue este procedimiento:

- a) Se contacta a las empresas de interés por medio de email o teléfono.
- b) Se realiza la solicitud formal de cotización, con la siguiente información: Nombre y NIT de la empresa, nombre y ubicación del proyecto, descripción del producto o servicio a cotizar, especificaciones, planos o cantidades y se proporciona un medio de contacto.

- c) Se elabora un formato denominado cuadro comparativo de cotizaciones en un software de cálculo como Excel. Generalmente la información que debe incluir este cuadro es: Fecha, descripción de la actividad, nombre, unidad cantidad y en las columnas siguientes se registra la información correspondiente de cada una de las empresas cotizantes, en la parte inferior del documento se registra lo siguiente: forma de pago, plazo de fabricación, suministro o instalación, garantía, validez de la oferta, e información de contacto de la empresa cotizante.
- d) Una vez recibido todas las cotizaciones, se registra la información de forma ordenada y resumida en el cuadro comparativo
- e) El cuadro comparativo y sus respectivas cotizaciones se envían al director de obra para su evaluación, se evalúa especificaciones, costo total, forma de pago y se elige la empresa que mejor se ajuste-
- f) Se contacta al proveedor y se solicita factura, contrato y pólizas, estas últimas dependen del cronograma de la actividad, es decir de la duración que el proveedor proponga para llevar a cabo el servicio solicitado, finalmente se continua con el pago. Cabe mencionar que comúnmente los contratos de grandes sumas de dinero manejan anticipo y el porcentaje restante se paga durante la ejecución de dicha actividad con cortes quincenales o mensuales, dependiendo de cada entidad comercial.

Dado que las empresas cotizantes presentan diferentes formatos de cotización, para realizar una comparación es necesario registrar la información en un cuadro comparativo. siguiendo con el objetivo, es preciso tener en cuenta, las unidades de medida y las cantidades, puesto que si estas condiciones de medida no son iguales no es posible realizar una comparación adecuada.

Resultados de la ejecución de actividades para la asistencia técnica en obra

Memorias de calculo

Las memorias de cálculo de cantidades de obra se efectúan para cada una de las actividades pactadas en el contrato, estas deber ser revisadas y aprobadas por el interventor según el acta correspondiente. A continuación, se presenta un ejemplo donde se describe una actividad ejecutada

en la obra CAM Sabaneta, bajo el siguiente ítem: Construcción de jardineras tipo voladizo para cobertura de junta de construcción, en concreto de 21 MPa con acabado a la vista, según diseño.

Los ítems de pago para la construcción de las jardineras tipo voladizo son:

- Anclaje y epóxico
- Acero
- Concreto

En el *Anexo 1* se presenta la memoria de anclaje y epóxico en el formato establecido, con especificaciones y cantidades correspondientes, la descripción que rige este ítem es: suministro e instalación de anclajes de 1/2" y 3/8". Incluye mano de obra.

En el *Anexo 2* se presenta la memoria del acero de refuerzo en el formato establecido, con especificaciones y cantidades correspondientes, la descripción que rige este ítem es: Suministro, transporte e instalación de acero de refuerzo corrugado figurado $Fy = 420 \text{ Mpa} - 60000 \text{ psi}$. Incluye transporte con descarga, transporte interno, alambre de amarre, certificados y todos los demás elementos necesarios para su correcta instalación, según diseño y recomendaciones estructurales.

En el *Anexo 3* se presenta la memoria del concreto estructural en el formato establecido, con especificaciones y cantidades correspondientes, la descripción que rige este ítem es: Construcción en concreto de 21 MPa con acabado a la vista, según diseño, incluye todos los elementos necesarios para su correcta ejecución.

Detalles constructivos

Los detalles constructivos, se realizan para hacer despieces, calcular cantidades de obra, dar una mayor claridad al maestro de obra, o en caso de añadir elementos de construcción que no requieren un análisis detallado de cargas. Para ejemplificar lo descrito, se presenta uno de los detalles constructivos realizados en el proyecto bajo el siguiente ítem: construcción de jardineras tipo voladizo, En *Anexo 4* y en el *Anexo 5* se muetsran los detalles constructivos de la geometria final y la configuracion de acero respectivamnete.

Cotizaciones

Con el fin de dar cumplimiento al presupuesto y a las especificaciones del proyecto es necesario solicitar cotizaciones a diferentes empresas y registrar la información de forma ordenada y resumida en un formato que facilite la comparación al momento de realizar un contrato. En el *Anexo 6* se presenta el formato y el registro de un cuadro comparativo de cotizaciones de una de las actividades desarrolladas en el proyecto CAM, correspondiente al sistema de riego en fachada verde.

En el *Anexo 7* se muestra un registro fotográfico de las actividades constructivas en las cuales se llevó a cabo un seguimiento técnico de control y evaluación durante el desarrollo de la pasantía en la obra CAM Sabaneta.

Descripción de la guía práctica para el análisis de efecto de interacción suelo-estructura FEMA P-2091-20

Este documento ha sido publicado por la agencia federal para el manejo de emergencias de los estados unidos (FEMA) en diciembre de 2020 para describir una metodología practica que permita obtener los efectos originados por la interacción suelo-estructura (ISE) y para presentar las disposiciones normativas en forma concisa y fácil de entender, de tal manera que se pueda contribuir a la práctica profesional del diseño estructural sismorresistente.

Por lo regular, el diseño estructural de las edificaciones usa la concepción de bases empotradas, a un medio infinitamente rígido y muy pocas veces se tiene en cuenta que realmente el suelo es flexible y que este puede cambiar sus propiedades a medida que se esfuerza cíclicamente. Para estimar la respuesta sísmica de manera más cercana a la realidad, es preciso tener en cuenta la rigidez de la cimentación y la flexibilidad del suelo subyacente. Esto es precisamente parte fundamental del enfoque de las tareas de análisis que se considera al efectuar un análisis sísmico que incluya los efectos de ISE.

Generalmente los cuerpos solidos tienen tres propiedades dinámicas características, masa, rigidez y capacidad de disipar energía a través del tiempo. Cuando estos adquieren movimiento por una excitación externa disipan energía durante todo el proceso de respuesta. Un tipo de excitación externa que afecta comúnmente a las estructuras consiste en un movimiento sísmico. La influencia

y el impacto de este tipo de movimientos está íntimamente relacionado con la interacción entre la disposición y rigidez de la cimentación, las características dinámicas del sistema estructural y las características dinámicas del suelo subyacente. (NSR-10, 2012)

Todos estos son aspectos interrelacionados y así se identifican en la guía práctica de diseño FEMA P-2091-20. A continuación, se presenta un resumen del contenido de este documento.

Capítulo 1. Introducción: Contiene la terminología de la ISE, cubre el propósito, alcance, lector objetivo y resume algunos puntos clave de la implementación de la ISE.

Capítulo 2. Situaciones donde la ISE es importante: Proporciona una discusión de situaciones comunes, donde la ISE puede influir de forma considerable en las fuerzas usadas para el diseño estructural y en la forma como responde la estructura durante un sismo.

Capítulo 3. Test “regla de oro” sentido inercial de la ISE: Describe una prueba simple que puede ser usada al inicio de un proyecto, cuando se dispone de información limitada, esta prueba permite determinar si el uso de la ISE en la modelación y diseño, genera una diferencia en los resultados.

Capítulo 4. Efecto de la losa de cimentación: Este capítulo aborda como la interconexión de la cimentación puede ayudar a reducir las demandas en la estructura.

Capítulo 5. Efectos de empotramiento: Discute como la cimentación embebida, puede reducir la demanda en la estructura.

Capítulo 6. Cimentación y flexibilidad del suelo: Describe diferentes métodos que usan resortes verticales y horizontales para representar la flexibilidad del suelo.

Capítulo 7. Aumento del periodo: Describe aspectos sobre la flexibilidad del suelo, lo cual conduce a un aumento del periodo en la respuesta estructural ante el impacto resultante de las demandas sísmicas.

Capítulo 8. Amortiguamiento de la cimentación: Da a conocer cómo y cuándo aplicar los conceptos de amortiguamiento a los distintos tipos de cimentación según las propiedades del suelo y las características de la onda sísmica, como son, la velocidad con la que viaja, la capacidad para transmitirse hacia la superficie y hacia los elementos estructurales que componen un edificio.

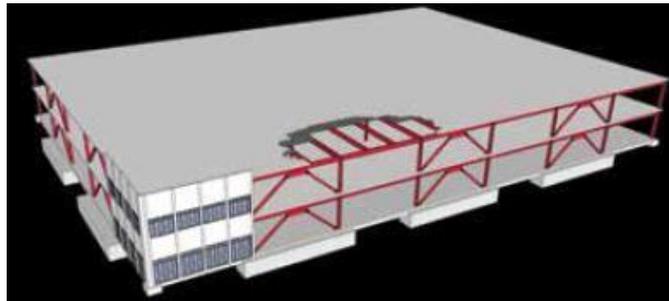
Capítulo 9. Detalles para modelar un sótano: Discute diferentes enfoques analíticos, precisos pero sencillos para modelar sótanos.

Capítulo 10. Conclusiones y recomendaciones: Resume herramientas y puntos clave de la guía de diseño y proporciona recomendaciones sobre las revisiones necesarias de las disposiciones de la norma y estudios adicionales de que deben realizarse.

Apéndice A. Ejemplo práctico. Edificio de dos pisos: Proporciona un ejemplo detallado de la aplicación de las diferentes técnicas de la ISE para un edificio de acero de dos pisos con pórticos arriostrados, resistente al pandeo, como se muestra en la *Figura 8*

Figura 8

Edificio de dos pisos con pórtico reforzado en acero.



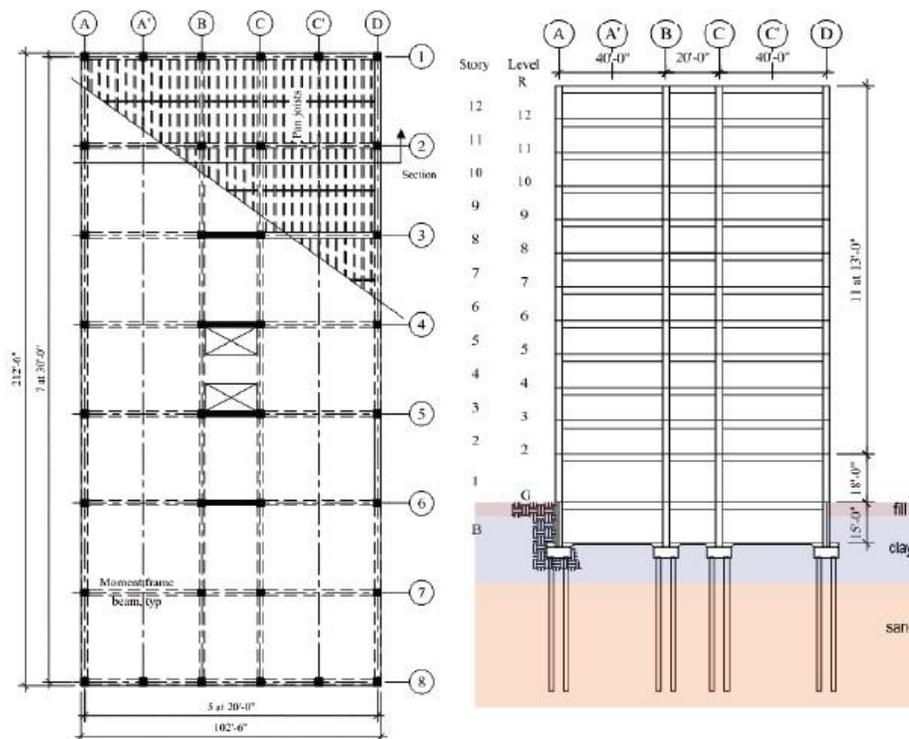
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La estructura se apoya sobre zapatas corridas y el diseño sigue el método de fuerza horizontal equivalente. Incluir la ISE en el diseño estructural implica usar resortes en el suelo, para determinar cambios en el modo de respuesta, y reducir la demanda sísmica, por medio de la flexibilidad de la cimentación, la flexibilidad del suelo y la capacidad de amortiguamiento.

Apéndice B. Ejemplo práctico. Edificio de 12 pisos: Proporciona detalladamente ejemplos de diferentes aplicaciones técnicas de la ISE para un edificio de 12 pisos de concreto que tiene pórticos resistentes a momentos en una dirección y un sistema dual (pórticos resistentes a momentos y muros a cortante), en la otra dirección. En la **Figura 9** se muestra una sección en planta y en perfil de la estructura en cuestión.

Figura 9

Edificio de doce pisos de concreto reforzado.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

A continuación, se presenta los conceptos resumidos más importantes y de mayor aplicación del tema ISE según lo descrito por la guía práctica en estudio. En el **Anexo 8** se reproduce un ejemplo completo de aplicación de la metodología de análisis ISE para el caso de una

estructura metálica arriostrada de dos niveles, con cimentación superficial, tal como se describe en el documento original.

Situaciones donde la ISE es importante.

En algunas situaciones la interacción suelo-estructura puede generar una diferencia sustancial en el comportamiento de los edificios y en las fuerzas utilizadas en su diseño.

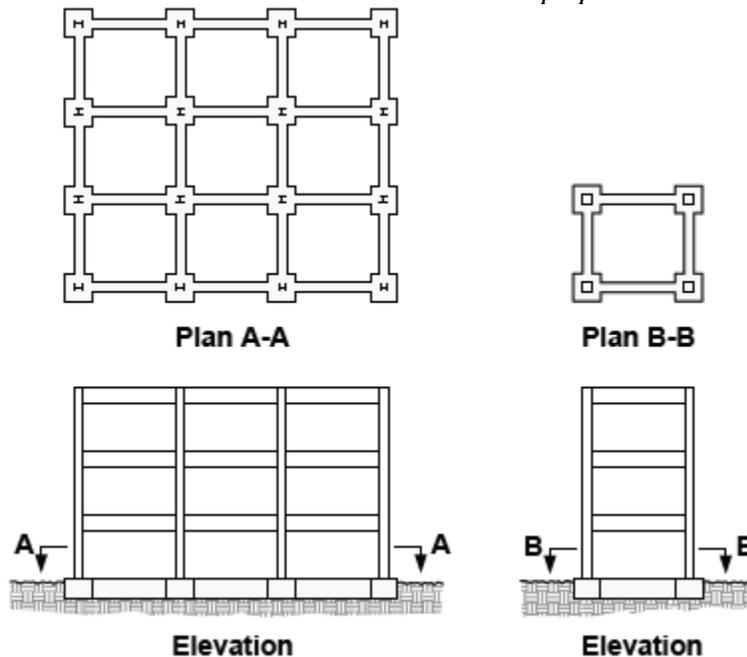
Áreas grandes de cimentación en un edificio reducen las fuerzas del diseño.

Estudios han demostrado que la magnitud de la cimentación del edificio se correlaciona con las demandas espectrales, principalmente en el rango del período más corto. Cuanto mayor sea el área en planta de la cimentación del edificio, mayor será la reducción en la respuesta espectral en periodos cortos, esto se debe a los efectos de interacción cinemática que proporciona una losa de cimentación.

La **Figura 10** muestra un ejemplo de un edificio A y un edificio B, el primero de ellos tiene el área en planta de cimentación más grande que el edificio B, por lo tanto, la reducción en las fuerzas de diseño será mayor en el edificio A que en el B, debido a que la interconexión de zapatas y vigas de amarre ocupan toda el área de la edificación, esto, contribuye a disminuir los esfuerzos producidos por efectos dinámicos en el suelo y a minimizar los asentamientos diferenciales.

Figura 10

Edificio de la izquierda con un área de cimentación mayor tendrá fuerzas de diseño más bajas que el edificio a la derecha con un área de cimentación más pequeña.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

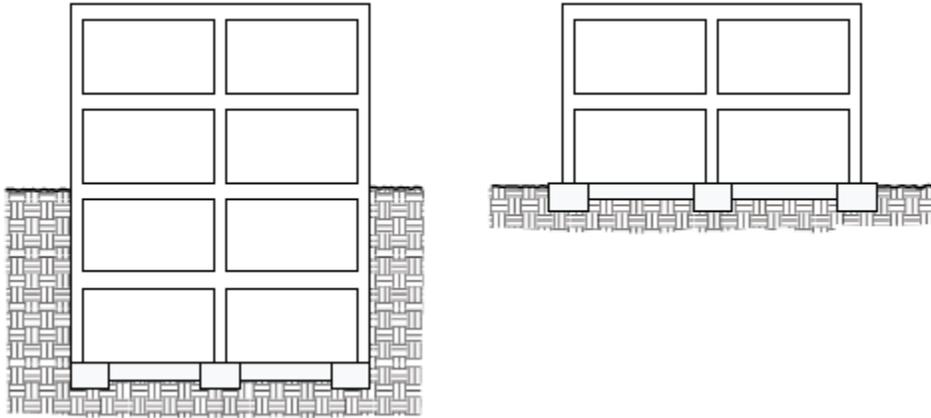
La incorporación de bases empotradas reduce las fuerzas de diseño.

Se ha demostrado que el empotramiento de la base está correlacionado con las demandas espectrales, principalmente en el rango de período más corto. Por lo general, cuanto mayor sea la profundidad de empotramiento, mayor es la reducción en la respuesta espectral de un período corto. Esto se debe a la reducción de las amplitudes de movimiento del suelo en profundidad, que es una característica típica de la respuesta de sitio.

La **Figura 11** muestra un ejemplo de un edificio con un sótano donde se espera que la reducción de la demanda sea mayor que en un edificio sin sótano donde no hay reducción.

Figura 11

El edificio de la izquierda con una base más profunda normalmente tendrá una mayor reducción en las fuerzas de diseño que el edificio de la derecha.



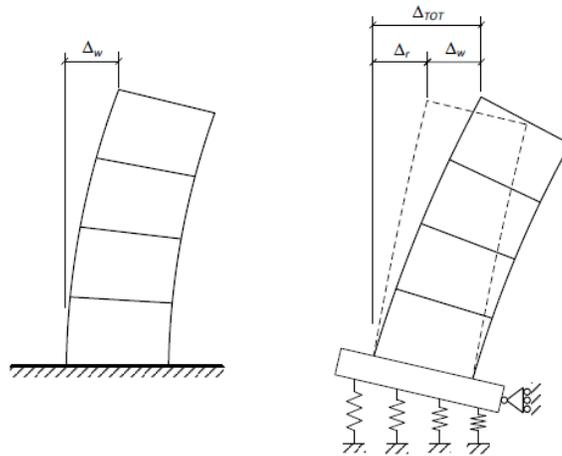
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Las relaciones altas de rigidez de la estructura alargan el período y cambian las fuerzas de diseño.

Cuando la estructura es relativamente rígida en comparación con el suelo, existe la posibilidad de que la traslación y rotación de la cimentación sea significativa en relación con el movimiento del campo libre, causando un aumento en el período fundamental de la estructura. El aumento en el período puede afectar las aceleraciones espectrales utilizadas en el diseño. Este efecto ocurre comúnmente en edificios con un diafragma rígido resistente a fuerzas laterales, con muros de corte de hormigón armado y pórticos de acero que se apoyan sobre elementos de cimentación localizados en suelos flexibles

Figura 12

Estructura donde la flexibilidad del suelo tendrá un impacto significativo en el desplazamiento lateral y el período fundamental de la estructura.



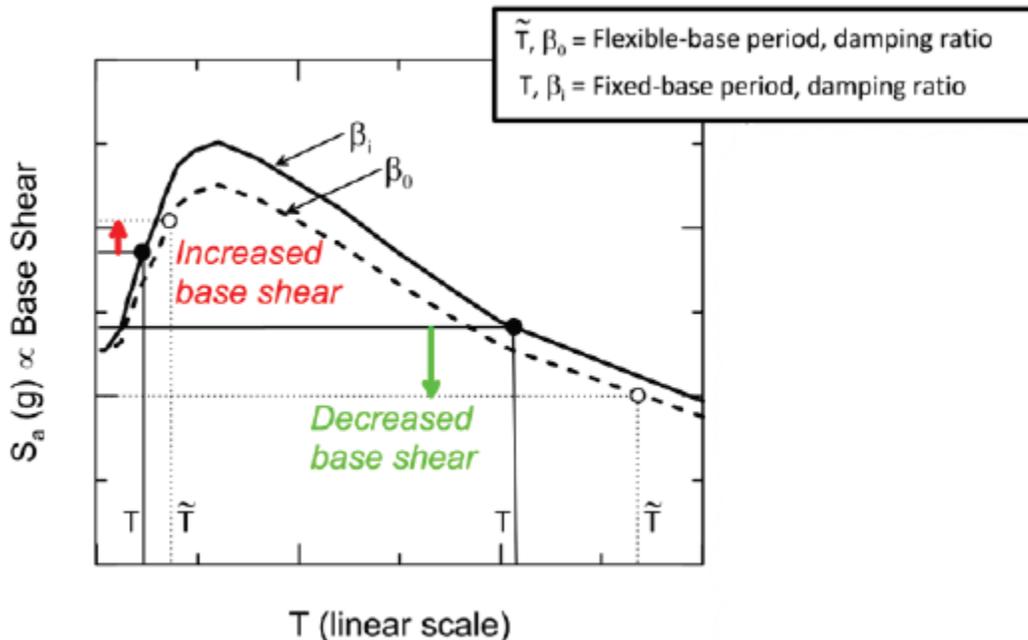
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 12** muestra un ejemplo de un muro de corte en voladizo y un sistema de cimentación que incluye la flexibilidad del suelo, lo cual, causará un aumento en el periodo fundamental de la estructura. El desplazamiento del techo del muro de corte se muestra a la izquierda como Δ_w . En la figura de la derecha se muestra la flexibilidad del suelo por un conjunto de resortes verticales. Se espera que durante un desplazamiento lateral de la superestructura se produzca un desplazamiento en los resortes verticales y una rotación en la cimentación. La deriva de rotación de la cimentación se muestra en la figura de la derecha como Δ_r . Por lo tanto, el aumento del desplazamiento se correlaciona con el aumento del período fundamental de la estructura.

La **Figura 13** muestra el impacto potencial de cambiar el período en un análisis del espectro de respuesta. El período con el modelo de base fija se denota como T , el período con el modelo de base flexible se denota como \tilde{T} . Se muestran dos casos; en el caso de período corto, la estructura es muy rígida y el aumento de T a \tilde{T} , da como resultado un aumento en el espectro de respuesta y un aumento en la aceleración espectral. En el caso del período largo, la estructura es más flexible y el aumento del período da como resultado una reducción de la aceleración espectral. La **Figura 13** también muestra cómo la adición de amortiguamiento de la cimentación en relación con el amortiguamiento general reduce la aceleración espectral en la mayoría de los períodos.

Figura 13

Impactos significativos del alargamiento del período y amortiguamiento de la base en la respuesta espectral. La línea negra continua es la respuesta espectral de base fija; la línea negra discontinua es la reducción debida a la adición del amortiguamiento de la cimentación en relación del amortiguamiento total.



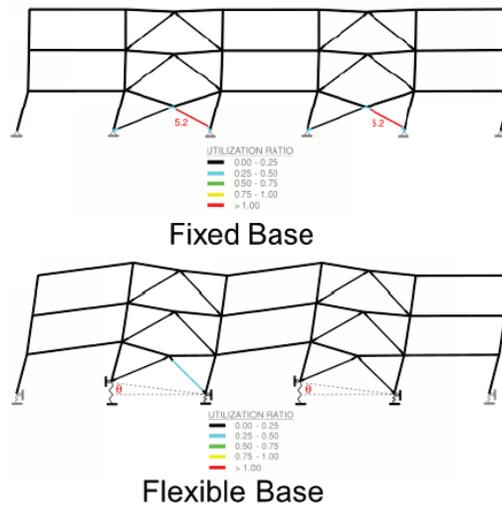
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La oscilación en la cimentación genera impactos en el comportamiento de la superestructura.

Las estructuras con sistemas de resistencia a fuerzas laterales pueden comportarse de manera muy diferente cuando se introduce la flexibilidad del suelo. La **Figura 14** muestra un ejemplo de análisis estático no lineal (pushover). En el modelo de base fija que se muestra en la parte superior, se puede visualizar el pandeo que se produce en las riostras y la sobrecarga en las riostras del nivel más bajo. En el modelo de base flexible que se muestra en la parte inferior, donde los resortes verticales están ubicados debajo de cada columna, se puede visualizar el pandeo en los pórticos arriostrados donde el sistema tiene la capacidad suficiente para resistir las demandas. Se debe tener presente que, en el modelo de base flexible, los extremos de las vigas que unen los pórticos tienen rotaciones más altas que en el modelo de base fija.

Figura 14

Impacto significativo de la flexibilidad del suelo en un sistema de arriostramiento.

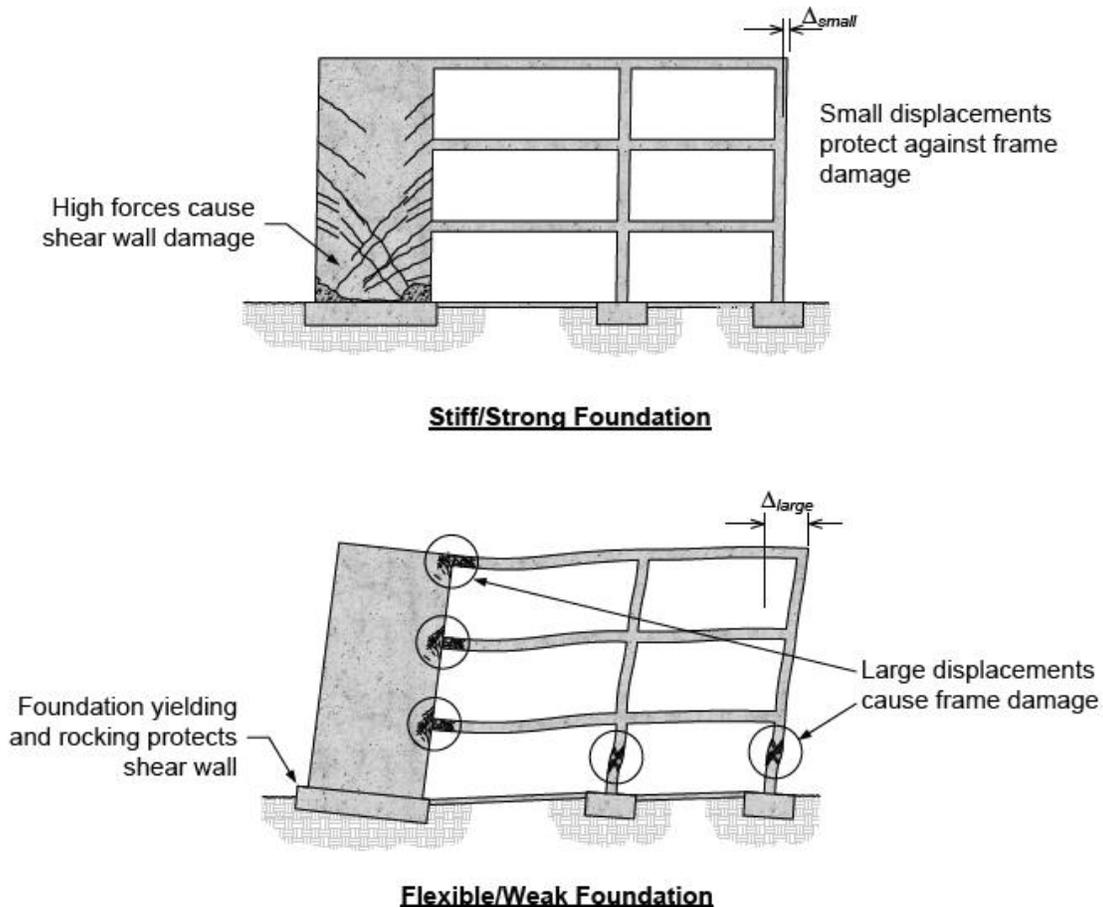


Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 15** muestra un muro a cortante en voladizo de hormigón armado acoplado a un sistema aporticado armado con vigas y columnas. La figura superior muestra que un sistema de cimentación rígido y fuerte (representado como una condición de base fija) puede reducir el desplazamiento de la superestructura y proteger el pórtico adyacente de daños, pero el daño se concentra en la base del muro de corte. La figura inferior tiene un sistema de cimentación más flexible, que conduce al pandeo del muro de corte, lo cual aumenta el desplazamiento y el daño en el pórtico adyacente, pero potencialmente reduce el daño al muro de corte. Con este ejemplo queda demostrado que la rigidez de los cimientos y la resistencia afectan a varios elementos estructurales de manera diferente.

Figura 15

Impacto significativo de la flexibilidad del suelo en un sistema de muro de corte de hormigón armado (ATC, 1996). (Una base rígida/fuerte no siempre es una condición favorable; Tampoco una base flexible/débil siempre representa algo muy conservador).



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Prueba práctica de la ISE

Se ha desarrollado una prueba práctica para determinar si los efectos inerciales de interacción suelo-estructura inercial (ISE) son significativos. Esta prueba combina tres parámetros que son (altura del edificio, período fundamental de la estructura y velocidad de la onda de corte) en un término llamado **relación de rigidez suelo-estructura**

La relación suelo-estructura se define como $h'/V_s T$. La ecuación para el test se define en la siguiente desigualdad

Sí $(h'/V_s T) > 0.1$ entonces es probable que los efectos inerciales de la ISE sean significativos

- h' : altura efectiva de la estructura, medida desde la base de la cimentación hasta el centro de masa del modo fundamental (en ft). Esta se puede aproximar a $2/3h_n$
- V_s : velocidad de onda cortante efectiva promedio (ft/s)
- T Periodo del modo fundamental de la estructura asumiendo una base fija (s)

Calculo de la velocidad media efectiva de la onda de corte.

La clasificación del sitio se determina a partir de la velocidad media de la onda de corte, v_{s0} , sobre los 100 pies superiores (o 30 m). La velocidad de onda de corte efectiva promedio, v_s , es un valor reducido que explica las tensiones más grandes que ocurren durante un sismo. Para la prueba de la regla empírica, la profundidad de importancia no es la misma que la utilizada para la clasificación del suelo. El cálculo de la velocidad de onda de corte sobre la profundidad efectiva para la rotación de la cimentación se determina como sigue.

Paso 1: Determinar la profundidad de la zapata e.

La profundidad de empotramiento de la zapata, e , es la profundidad desde el nivel del suelo hasta el fondo de la zapata.

Paso 2: Determinar la profundidad efectiva del perfil, z_p .

La profundidad efectiva del perfil según la ecuación 2-18c del NIST (2012a) es el parámetro z_p , determinado a partir del ancho y largo de la zapata de la siguiente manera.

$$v_{s0} = (B^3 L)^{0.25}$$

Donde:

- B = ancho medio de la base total (ft). B se mide paralelamente a la dirección de carga

- L = ancho medio de la base total (ft). L se mide perpendicular a la dirección de carga

Paso 3: Determinar la profundidad efectiva para la rotación de la cimentación, $e + z_p$.

La profundidad de interés para el cálculo de la velocidad de onda cortante efectiva promedio es la profundidad efectiva para la rotación de la cimentación, que es la suma de la profundidad de empotramiento de la cimentación y la profundidad efectiva del perfil $e + z_p$.

Paso 4: Determinar el promedio de la velocidad de onda cortante de baja deformación v_{s0} sobre la profundidad efectiva para la rotación de la cimentación.

El cálculo de la velocidad de la onda de corte de baja deformación es la medida para la clasificación del sitio. Por lo general, se informan o se grafican en capas. El promedio se determina usando la misma fórmula que ASCE/SEI 7-16 Ecuación 20.4-1.

$$v_{s0} = \sum d_i / \sum (d_i / v_{si})$$

Donde:

- d_i = espesor de cualquier capa entre la superficie y la profundidad efectiva para la rotación de la cimentación
- v_{si} = velocidad de la onda de corte en ft/s

Paso 5: Determinar la relación efectiva de velocidad de onda de corte, v_s/v_{s0} .

Las velocidades de onda de corte de baja deformación se convierten en velocidades de onda de corte efectivas utilizando la relación de velocidad de onda de corte efectiva en ASCE/SEI 7-16 Tabla 19.3-1. Esta varía según la clasificación del sitio y la aceleración espectral de diseño de un período corto, SDS.

Paso 6. Determinar la velocidad media efectiva de la onda de corte. v_s

Se determina la velocidad media efectiva de la onda de corte desde la superficie del suelo hasta la profundidad $e + z_p$ y se calcula de la siguiente manera:

$$v_s = [v_s/v_{s0}] (v_s)$$

Donde:

- v_s = velocidad media efectiva de la onda de corte (ft/s) para las condiciones del suelo en el sitio
- v_{s0} = velocidad media de la onda de corte de baja deformación (ft/s).

Determinar el período fundamental de la estructura.

El período fundamental de la estructura puede obtenerse a partir de un modelo computacional o utilizando el período fundamental aproximado de la ecuación 12.8-7 de ASCE/SEI 7-16.

$$T = T_a = C_t h_n^x$$

Donde:

- h_n = altura de la estructura tal como se define en ASCE/SEI 7-16 Sección 11.2 más la profundidad de la zapata
- C_t = coeficiente de ASCE/SEI 7-16 Tabla 12.8-2, depende del sistema estructural
- x = coeficiente de ASCE/SEI 7-16 Tabla 12.8-2, depende del sistema estructural

Efecto de una losa de cimentación

Los movimientos sísmicos de entrada para edificios con grandes áreas de cimentación se reducen debido a la incoherencia de los movimientos del suelo que ocurren sobre el área de la base. Los movimientos incoherentes son aquellos que varían entre sí de alguna manera. Estas variaciones pueden deberse simplemente al tiempo de llegada de las ondas sísmicas a través de la base del edificio o a variaciones locales en las propiedades del suelo que modifican las ondas a medida que viajan a través del sitio. El resultado de esta incoherencia causa que varias partes del edificio experimenten movimientos variables sobre el suelo de soporte. Cuando ocurre el sismo el suelo bajo una esquina de un edificio, se mueve en una dirección particular y el suelo en la esquina opuesta puede estar moviéndose en otra dirección. Debido a que estos movimientos se compensan parcialmente entre sí, resulta en un movimiento neto más pequeño. Este efecto es más pronunciado

en períodos cortos, ya que los movimientos de períodos más largos son más coherentes. Como resultado, los edificios rígidos con grandes áreas de base y cimientos rígidamente conectados experimentarán reducciones en los movimientos del suelo, los cuales son transmitidos a sus superestructuras.

El promedio de la losa de cimentación es un efecto de interacción cinemática, que dependen sólo de la geometría del edificio, de la cimentación y de la frecuencia y variabilidad espacial del campo de ondas sísmicas. Estos efectos son distintos del amortiguamiento de los cimientos y los efectos de alargamiento del período, que también dependen de las propiedades locales del suelo y de las características dinámicas del sistema sísmico y sus cimientos.

Ecuación principal.

El punto de partida para calcular el efecto de la losa de cimentación es determinar el tamaño de base equivalente b_e , según la ecuación 19.4-4 de ASCE/SEI 7-16, este parámetro es $b_e = \text{raíz del área de la base}$, que no debe tomarse como más de 260 ft

El siguiente paso es calcular b_0 según la ecuación 19.4-3 de ASCE/SEI 7-16 como sigue:

$$b_0 = 0.00071(b_e/T)$$

Donde:

- b_e en ft y T en segundos.

$$\text{Ó } b_0 = 0.0023(b_e/T)$$

Donde:

- b_e en metros y T en segundos.

Esta cantidad es función del periodo de vibración de la estructura T , este no debe ser menor que 0.2 s. Una vez determinado b_0 se determina B_{sa} , como sigue:

$$B_{bsa} = 1 + b_0^2 + b_0^4 + \frac{b_0^6}{2} + \frac{b_0^8}{4} + \frac{b_0^{10}}{12} \text{ para } b_0 \leq 1$$

$$B_{bsa} = \exp(2b_0^2) \left[\frac{1}{\sqrt{\pi b_0}} \left(1 - \frac{1}{16b_0^2} \right) \right] \text{ para } b_0 > 1$$

Al considerar el límite superior en el tamaño efectivo de la base (260 ft) y el límite inferior en el período (0.2 s), el valor de b_0 nunca excederá 1.0.

El factor de modificación para el promedio de losa de cimentación, RRS_{bsa} se calcula de acuerdo con la ecuación 19.4-1 de ASCE/SEI 7-16 como sigue:

$$RRS_{bsa} = 0.25 + 0.75 \left\{ \frac{1}{b_0^2} [1 - (\exp(-2b_0^2))] B_{sa} \right\}$$

Se debe tener en cuenta que la reducción teórica (dentro de los elementos en diagonal) se multiplica por 0,75 y se añade a un factor no reducido de 0,25.

Calculo de la longitud efectiva de la cimentación.

El parámetro clave necesario para aplicar los efectos debidos a la presencia de la losa de cimentación es el tamaño efectivo, b_e . ASCE/SEI 7-16 no proporciona ninguna orientación sobre este parámetro más que definirlo como la raíz cuadrada del área de la base de la estructura. El tamaño efectivo de los cimientos es entonces simplemente el ancho equivalente del área de la base del edificio.

El área de la base debe considerarse como las dimensiones de la extensión de los cimientos del edificio, o puede tomarse de manera conservadora como las dimensiones generales de la cuadrícula de las columnas.

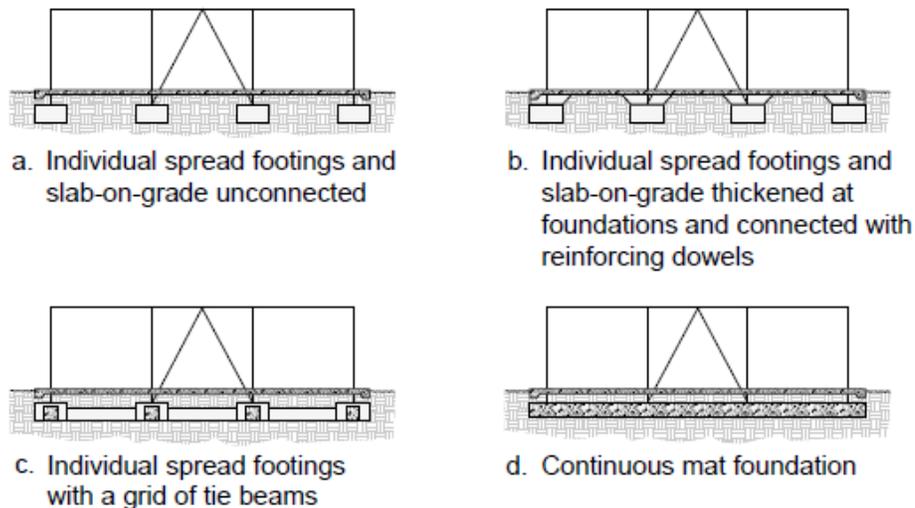
Análisis de criterios al aplicar el promedio de la losa de cimentación.

ASCE/SEI 7-16 La sección 19.4.1 permite emplear el promedio de losa de cimentación sólo cuando los cimientos de la estructura están interconectados. Esta condición se puede cumplir con una cimentación continua, o con zapatas aisladas que están interconectadas por losas o vigas de cimentación que proporcionan suficiente rigidez para no ser clasificadas como un diafragma

flexible. La base del edificio debe ser lo suficientemente rígida como para permitir que la base se mueva como una unidad, lo que permite la filtración de movimientos de alta frecuencia.

Figura 16

Ejemplos de configuraciones de bases de edificios, que muestran diferentes grados de interconectividad.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 16** muestra cuatro condiciones de cimentación diferentes, que ilustran varios grados de interconectividad

Condición a, con una losa de cimentación que no está conectada positivamente a las zapatas, generalmente no desarrollará interconectividad suficiente para que la base del edificio se mueva como una unidad. En este caso no se debe considerar el promedio de losa de cimentación.

Condición b, cuando la losa aumenta su espesor y se conecta a las zapatas por medio de dovelas de refuerzo, esta condición probablemente produce suficiente interconectividad, siempre que el espesor de la losa proporcione suficiente rigidez axial y cortante. El promedio de losa base se puede considerar para este caso si la losa tiene el espesor suficiente.

Condición c, tiene una losa construida de manera similar a la condición a, pero incluye una cuadrícula de vigas de amarre. Esta condición probablemente produce suficiente interconectividad,

pero sólo si hay vigas de amarre que proporcionen la transferencia de cizallamiento entre las líneas paralelas de las zapatas. El espesor promedio de la losa de cimentación se puede considerar para este caso siempre y cuando se incluya vigas de amarre unidas en diagonal.

Condición d, con una losa de cimentación continua, se ha demostrado que se proporciona suficiente interconectividad, pero se debe verificar su rigidez en el plano. La losa debe ser lo suficientemente rígida para no caracterizarse como un diafragma flexible de acuerdo con ASCE/SEI 7-16 Sección 12.3.1.3. Si se cumple esta condición, entonces se puede considerar el promedio de la losa de cimentación.

NOTA: ASCE/SEI 7-16 Sección 19.1.1: La ISE no requiere aplicarse en proyectos localizados en sitios con clasificación del suelo de tipo A o B.

ASCE/SEI 7-16 Sección 19.4.1: Las ecuaciones de la ISE sólo son aplicables para sitios con v_s medidos sobre la profundidad dentro del rango de 650 a 1.650 ft/s.

Efectos de empotramiento

Los efectos de empotramiento solo se pueden considerar para algunas clases de suelo y no se aplican a las Clases de sitio A o B.

El empotramiento de la cimentación modifica el movimiento del campo libre, reduce el movimiento de entrada de la cimentación y las demandas resultantes en la estructura. Esto se caracteriza por una reducción en las ordenadas del espectro de respuesta; cuanto más profunda se encuentre la base, mayor será la reducción de los valores del espectro de respuesta.

Para tener en cuenta los efectos de empotramiento no se requiere modelar la flexibilidad del suelo, los parámetros necesarios son la profundidad de empotramiento de la base, e , y la velocidad media de onda de corte de baja deformación sobre la profundidad de empotramiento, v_{s0} , y los parámetros utilizados para reducir v_{s0} para los efectos de la no linealidad (clase de sitio y SDS). Si el movimiento de campo libre se determina a nivel de la cimentación embebida, entonces no se puede reducir este movimiento considerando efectos de empotramiento.

La ecuación 19.4-5 ASCE/SEI 7-16 determina el cambio por los efectos de empotramiento RRS_e

$$RRS_e = 0.25 + 0.75x \cos(2\pi e / T v_s)$$

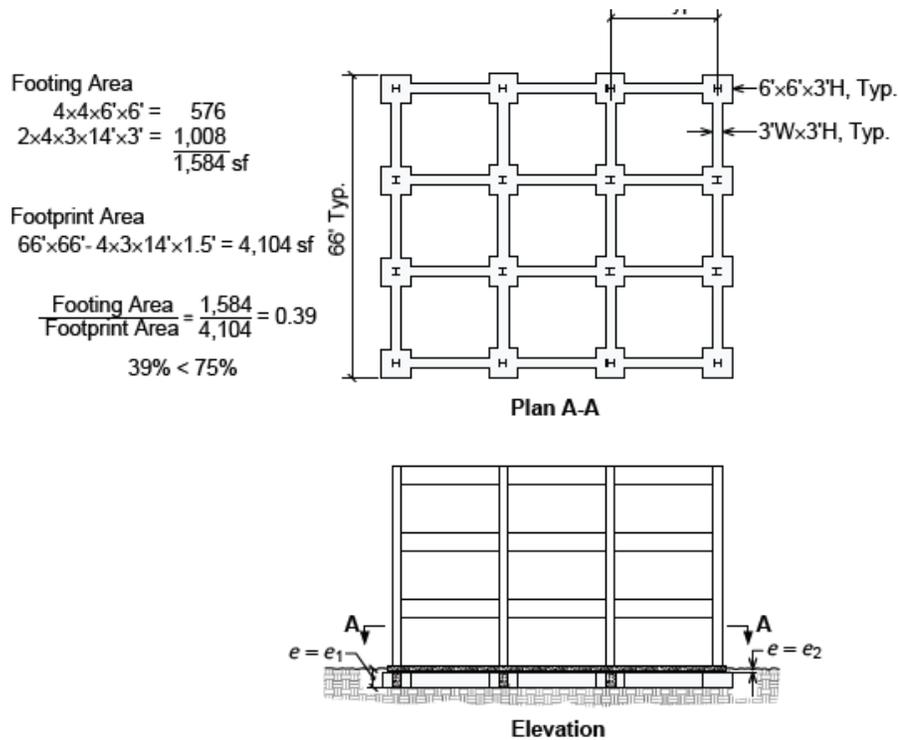
Donde:

- e = profundidad de la cimentación no superior a 20 ft. Un mínimo del 75% del área de la base debe estar presente en la profundidad del empotramiento. La profundidad para estructuras ubicadas en sitios inclinados debe ser el lado menos profundo.
- v_s = velocidad media efectiva de la onda de corte, tomada como el valor medio de la velocidad sobre la profundidad de empotramiento usando v_{s0} y la tabla 19.3-1 o un estudio específico del lugar. No debe ser inferior a 650 ft/s.
- v_{s0} = velocidad media de la onda de corte de baja deformación sobre la profundidad empotrada de la cimentación.
- T = período de la estructura del espectro de respuesta, no debe ser inferior a 0,20 s.

La **Figura 17** muestra un edificio con un conjunto ortogonal de vigas de cimentación con zapatas aisladas en las intersecciones que soportan un pórtico de acero resistente a momentos. El área de la zapata es sólo el 32% del área total de la cimentación, por lo tanto, está por debajo del umbral del 75% en ASCE/SEI 7-16 Sección 19.4.1. La profundidad e , es la profundidad de la losa de cimentación, $e2$, es insignificante.

Figura 17

Profundidad de empotramiento para un edificio sobre vigas de rasante y zapatas corridas.

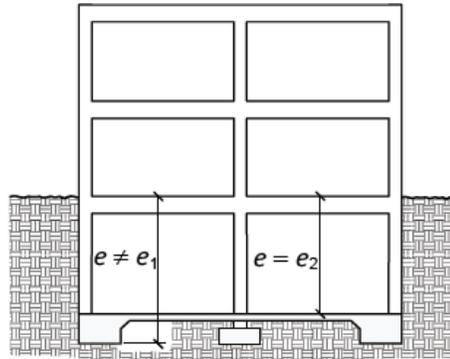


Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 18** muestra un edificio con un sótano de una planta, la estructura de la cimentación la componen una zapata corrida perimetral y una zapata aislada en el interior. La profundidad de empotramiento, $e = e2$, desde el nivel de piso hasta la parte superior de la losa del sótano. Además, el área en la base de las zapatas es mucho menor que el umbral del 75% como lo establece ASCE/SEI 7-16 Sección 19.4.1.

Figura 18

Profundidad de empotramiento para un edificio con sótano sobre zapatas de tira perimetral y zapatas de extensión interior.

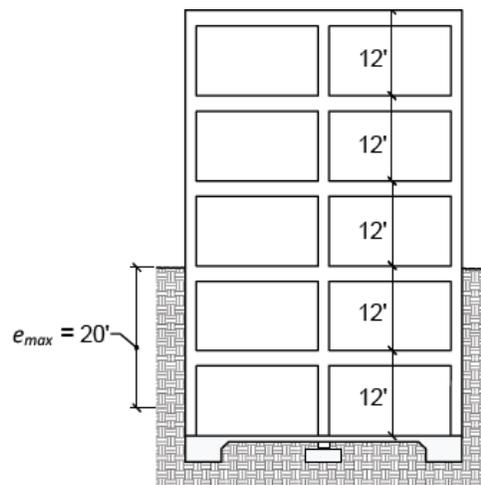


Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 19** muestra un edificio con un sótano de dos niveles donde la profundidad total de empotramiento es 24 ft, desde el nivel del suelo hasta la parte superior de la losa del sótano más bajo, sin embargo, ASCE/SEI 7-16 Sección 19.4.1 establece que el límite de empotramiento máximo es 20 ft. Por lo tanto, la profundidad de empotramiento, e , tiene un límite de 20ft.

Figura 19

Máxima profundidad de empotramiento.



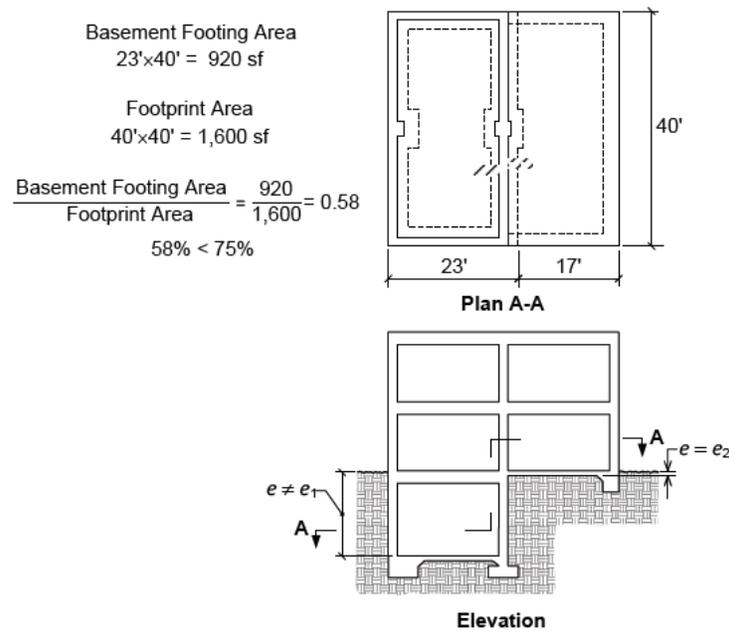
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 20** muestra una situación con un sótano parcial. El área del sótano es menor al 75% del área de la cimentación total del edificio, por lo que la profundidad de empotramiento se

limita a la profundidad de la losa a nivel, que es insignificante. Por otro lado, la **Figura 21**, muestra una situación en la que el sótano parcial es lo suficientemente grande como para exceder el umbral del 75%, y la profundidad de empotramiento es desde el nivel del suelo hasta la parte superior de la losa del sótano.

Figura 20

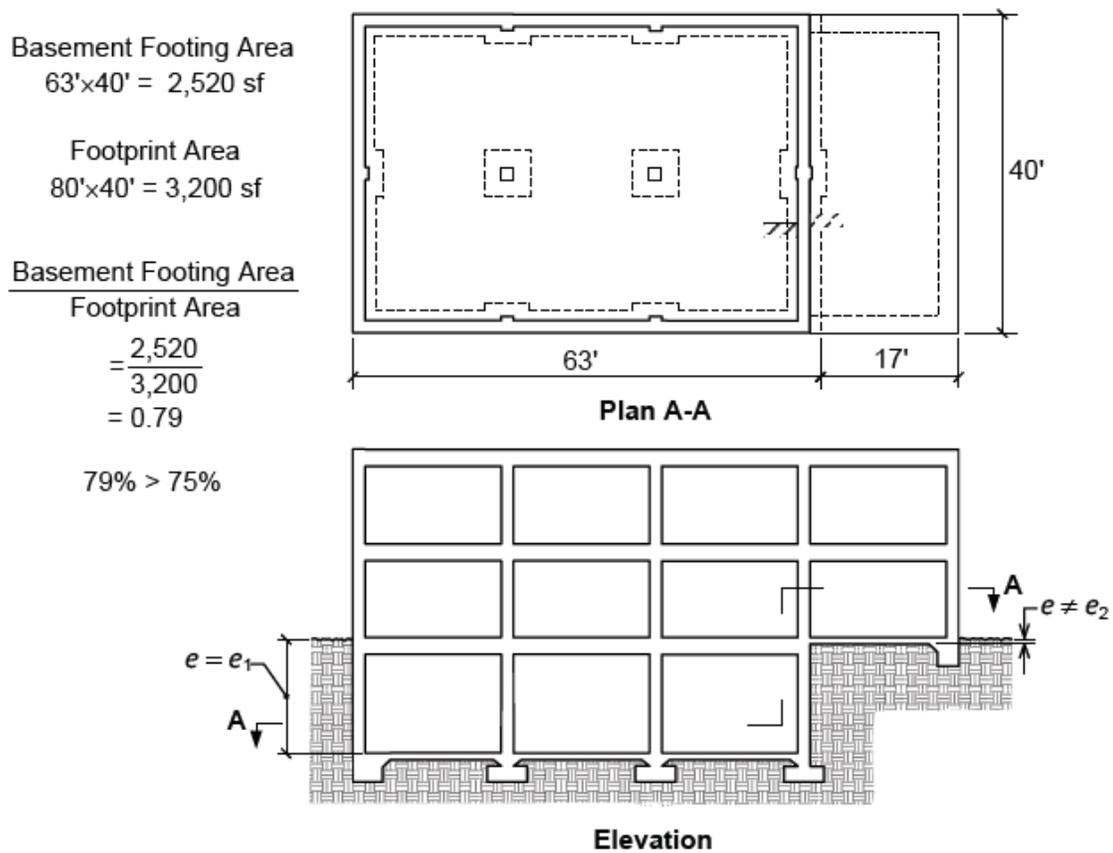
Profundidad de empotramiento para un sótano parcial más pequeño.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Figura 21

Profundidad de empotramiento para un sótano parcial más grande.

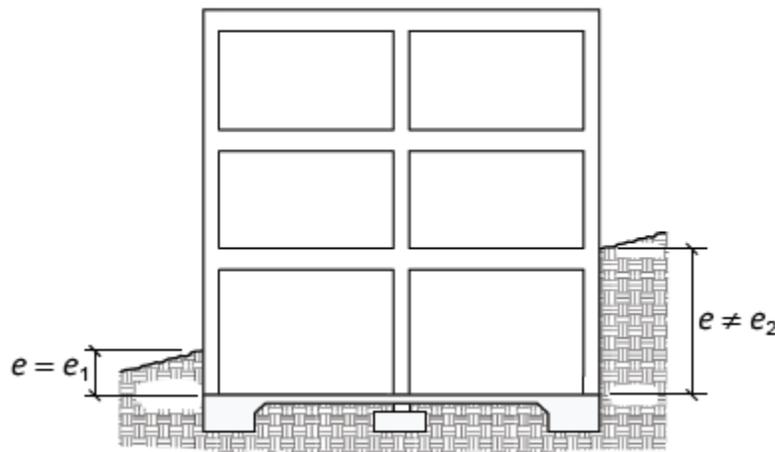


Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Figura 22** muestra un edificio con un sótano completo sobre un terreno inclinado. Según ASCE/SEI 7-16 Sección 19.4.1, la profundidad de empotramiento se toma en el punto más superficial de empotramiento, donde $e = e_1$

Figura 22

Profundidad de empotramiento en un sitio inclinado.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Cimentación y flexibilidad del suelo

El diseño convencional del edificio se realiza con mayor frecuencia basándose en la suposición de que el edificio se fija al suelo en su base y el suelo es rígido. Estos supuestos no son estrictamente ciertos, pero a menudo se consideran aceptables y conservadores. La flexibilidad del sistema de cimentación, que incluye tanto los componentes estructurales de la cimentación como el suelo de apoyo, puede tener un efecto significativo en las propiedades dinámicas del edificio y su respuesta general. Al incorporar la interacción suelo-estructura (ISE) en el diseño de un edificio, ASCE/SEI 7-16 Sección 19.1.1 (ASCE, 2017a) requiere que el modelo analítico de la estructura incorpore flexibilidad vertical, horizontal y rotacional en la cimentación y el suelo.

La flexibilidad del suelo en el modelo analítico de un edificio generalmente se explica mediante el modelado de la conexión de elementos estructurales a soportes fijos mediante resortes. Estos pueden ser resortes puntuales que modelan cada grado de libertad en la base mediante un solo resorte, o pueden ser resortes distribuidos que representan el soporte del suelo como un medio continuo discretizado, conocido como Winkler Foundation Model.

Propiedades del suelo para el cálculo de la flexibilidad.

Además de la geometría de la cimentación, se requieren propiedades del suelo para calcular la flexibilidad del suelo. Estas propiedades incluyen la medida de la velocidad de onda de corte inicial, v_{s0} , el módulo de corte efectivo del suelo, G , y la relación de Poisson para el suelo, ν .

La velocidad de la onda de corte, v_{s0} , se determina en función del valor promedio medido en un intervalo de profundidad efectivo.

El módulo de corte del suelo inicial, G_0 , se calcula de acuerdo con la ecuación.

$$G_0 = \frac{\gamma v_{s0}^2}{g}$$

Donde:

- γ = peso unitario del suelo
- g = aceleración de la gravedad.

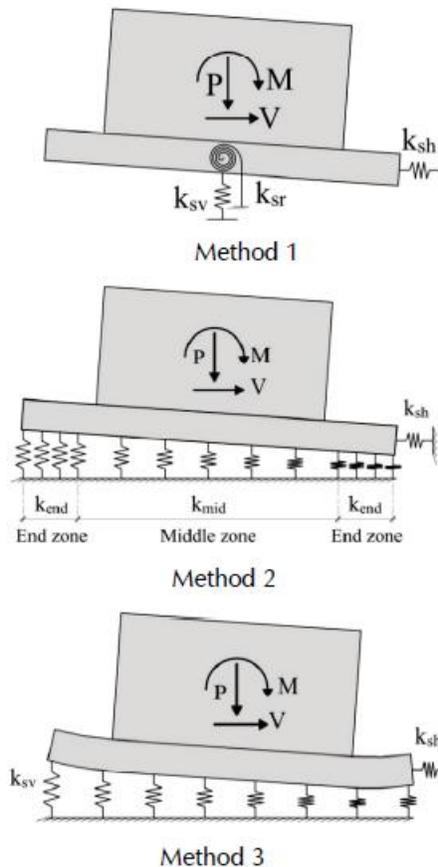
Resortes verticales y rotacionales.

Los resortes verticales y rotacionales modelan la rigidez vertical de los cimientos que afectan la rotación de un pórtico o muro alrededor de su base, modificando de forma considerable el período fundamental y la forma de desplazamiento del edificio.

En la **Figura 23** se muestra de forma gráfica tres métodos que permiten modelar la cimentación mediante resortes verticales y rotacionales presentados en ASCE/SEI 41 de FEMA (2018).

Figura 23

Métodos para modelar la cimentación mediante resortes verticales y rotacionales.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Método 1 - Cimentación rígida y suelo flexible:

Este método define resortes puntuales, modelando cada grado de libertad en la base con un resorte desacoplado. Este método es recomendable para cimentaciones consideradas rígidas en relación con el suelo.

Método 2 - Cimentación flexible y suelo flexible no lineal

Este método define los resortes distribuidos que representan el soporte del suelo como un medio continuo discretizado, con un valor variable de rigidez para los resortes distribuidos a lo largo de la base. Este enfoque es recomendable para procedimientos no lineales donde el acoplamiento explícito de rigidez axial y rotacional se modela con resortes no lineales

Método 3 - Cimentación flexible y suelo flexible lineal

Este método define los resortes distribuidos que representan el soporte del suelo como un medio continuo discretizado, con un valor uniforme para los resortes a lo largo de la zapata. Este método se ajusta mejor cuando la flexibilidad de los elementos estructurales de la base se modela explícitamente.

Resortes horizontales.

Generalmente, la flexibilidad horizontal afecta en menor grado el comportamiento de la estructura que la flexibilidad vertical y rotacional. No obstante, se deben considerar todas las fuentes de flexibilidad, como lo establece ASCE/SEI 7-16, por lo tanto, es necesario que el modelo analítico de una estructura incorpore la flexibilidad horizontal del suelo, así como la flexibilidad vertical y rotacional.

Se debe tener en cuenta que, la rigidez vertical y rotacional solo incluye los cimientos que soportan elementos individuales resistentes a cargas sísmicas y la rigidez horizontal incluye la resistencia de todos los elementos que componen la cimentación, resistentes a cargas sísmicas y por gravedad.

En cuanto a los resortes horizontales existen 3 métodos de cálculo que se describen en gran detalle en la guía FEMA P-2091, se presentan de forma resumida así:

Método 1: Modelo Solido Elástico

Presenta la ecuación de Pais y Kausel (1988) para cimentaciones superficiales con rigidez horizontal (eje x). Este eje x es paralelo a L, la mitad de la longitud más larga de una cimentación.

$$K_{x,sur} = \frac{GB}{2 - \nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$$

Método 2: Resistencia debida a la presión pasiva

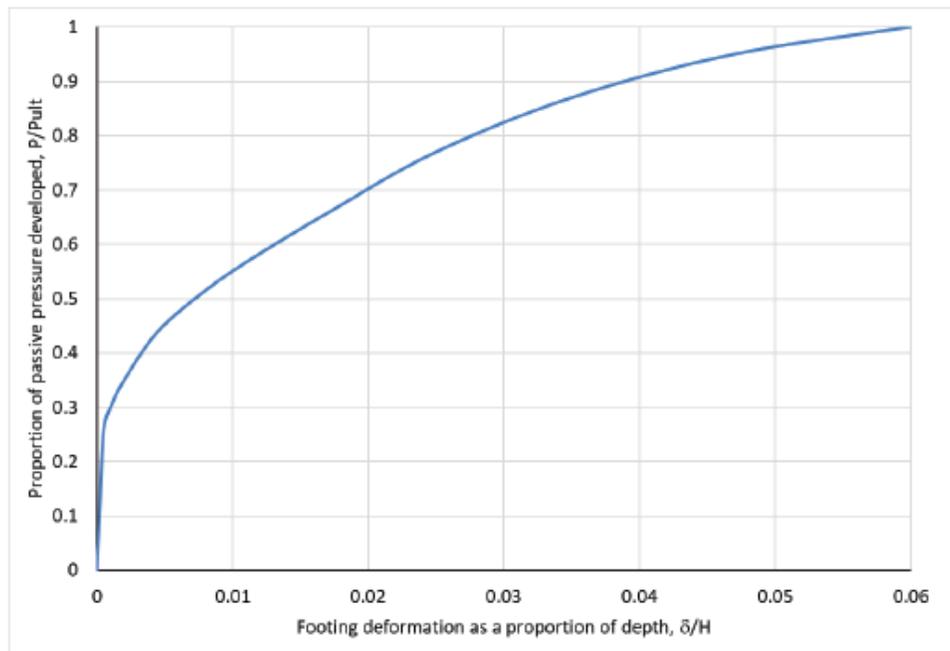
ASCE/SEI 41-17 proporciona una curva de movilización para la presión pasiva, que se reproduce en la **Figura 24**. Esta figura presenta la relación entre la presión pasiva movilizada y la

presión última (P/P_{ult}) en función de la relación entre la deformación lateral y la profundidad de la zapata (δ/H). Esta relación de movilización puede aproximarse mediante la siguiente ecuación, que se ha ajustado a la curva de la **Figura 24**.

$$\frac{P}{P_{ult}} = 0.15 + 2.88 \left(\frac{\delta}{H} \right)^{0.43}$$

Figura 24

Curva de movilización de presión pasiva.



Nota. Fuente <https://www.asce.org> (ASCE/SEI 41-17, Figura 8-6, 2017).

Método 3: Resistencia debida a la fricción o cohesión:

A diferencia de las resistencias discutidas anteriormente, la resistencia debida a la fricción entre la estructura y el suelo depende del peso de la estructura y la base de soporte. La resistencia a la fricción en la base de la cimentación depende del ángulo de fricción interna del suelo y puede tomarse en un rango de 0,67 a 1 veces la tangente del ángulo de fricción interna (Bowles, 2001).

Cuando los suelos de cimentación son cohesivos, la resistencia puede desarrollarse por la cohesión entre la cimentación de hormigón y el suelo y puede tomarse como 0,5 a 0,75 veces el valor de cohesión interna del suelo (Bowles, 2001).

Análisis de límites.

Las secciones 12.13.3 y 19.1.1 de ASCE/SEI 7-16 requieren el uso de análisis de delimitación al considerar la flexibilidad de los cimientos. La Sección 12.13.3 de ASCE/SEI 7-16 requiere la consideración de un aumento y disminución del 50% en la rigidez del suelo calculada para su uso en análisis dinámicos. Sección 19.1.1 de ASCE/SEI 7-16 hace referencia a estos límites cuando se realizan interacciones suelo-estructura.

El requisito de análisis de límites refleja el reconocimiento de la variabilidad espacial y la incertidumbre de las propiedades mecánicas del suelo. Además, mientras que los análisis estructurales lineales pueden incluir la flexibilidad de los cimientos, el comportamiento del suelo es altamente no lineal, lo que introduce una mayor incertidumbre en su comportamiento.

Otra fuente de posible flexibilidad y no linealidad adicional es la posible pérdida de contacto entre la estructura y el suelo debido al balanceo.

Alargamiento del período

La flexibilidad del suelo conduce a un alargamiento del período en la superestructura, cambiando las demandas sísmicas

Para el análisis, se deben preparar dos modelos: uno que considere la estructura fija en su base, y otro donde se representen explícitamente las características carga-deformación del sistema cimentación-suelo (incluyendo variaciones de cota inferior y superior). Se deben calcular los coeficientes de respuesta sísmica C_s y \tilde{C}_s y el período fundamental de base fija, T , y el período fundamental de base flexible \tilde{T} , respectivamente. Finalmente se debe calcular el peso sísmico, que puede tomarse como el peso sísmico efectivo, W , o el peso correspondiente a la masa que participa en el modo fundamental \bar{W}

Los efectos de alargamiento del período sobre la respuesta de aceleración y desplazamiento son una consecuencia de la forma básica de los espectros de aceleración y desplazamiento. La **Figura 25** muestra un espectro de diseño de aceleración suave y el correspondiente espectro de desplazamiento. Las ordenadas de desplazamiento espectral, S_d , se calculan a partir de las

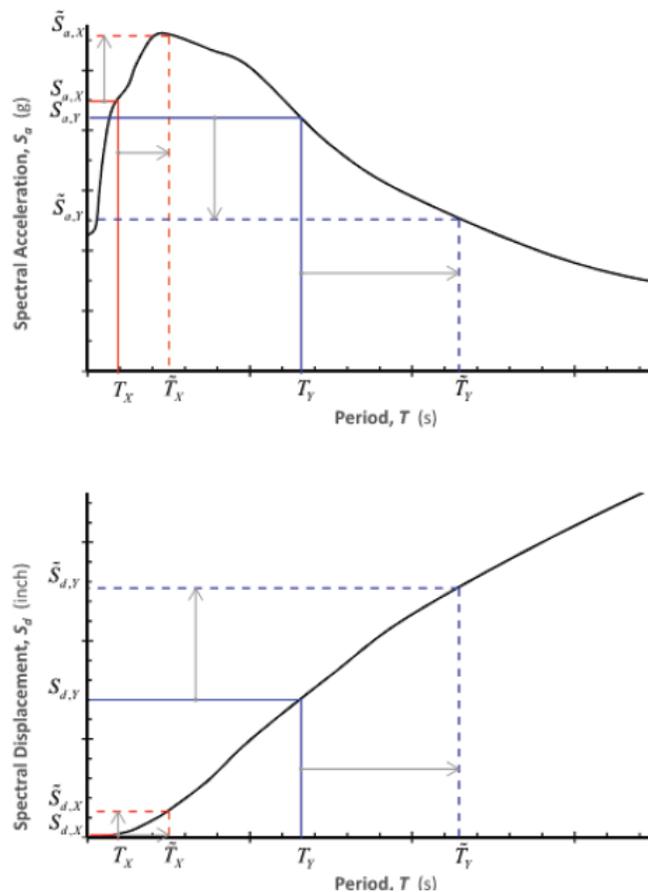
ordenadas de aceleración espectral, S_a , utilizando la siguiente ecuación fundamental de dinámica estructural.

$$S_d = S_a \frac{T^2}{4\pi^2} g$$

Para un período creciente, la aceleración espectral aumenta hasta un valor máximo (aproximadamente 0,5 segundos en este ejemplo) y luego disminuye durante períodos más largos. El desplazamiento espectral generalmente aumenta con el aumento del período. La **Figura 25** muestra los posibles efectos para la Estructura "X" y la Estructura "Y". Para la Estructura X, al aumentar el período aumenta tanto la aceleración espectral como el desplazamiento espectral. Para la Estructura Y, al aumentar el período disminuye la aceleración espectral y aumenta el desplazamiento espectral.

Figura 25

Ejemplo de espectros de aceleración y desplazamiento.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Amortiguamiento en la cimentación

La interacción inercial es la interacción dinámica entre la estructura, su base y el suelo circundante causada por el movimiento de entrada de la base. El alargamiento del período es un efecto de interacción inercial. Da como resultado un aumento en el período de construcción debido a la flexibilidad de la base. El amortiguamiento de la cimentación es un segundo efecto de interacción inercial, hay dos factores que contribuyen con el amortiguamiento en la cimentación, el amortiguamiento del suelo y el amortiguamiento por radiación.

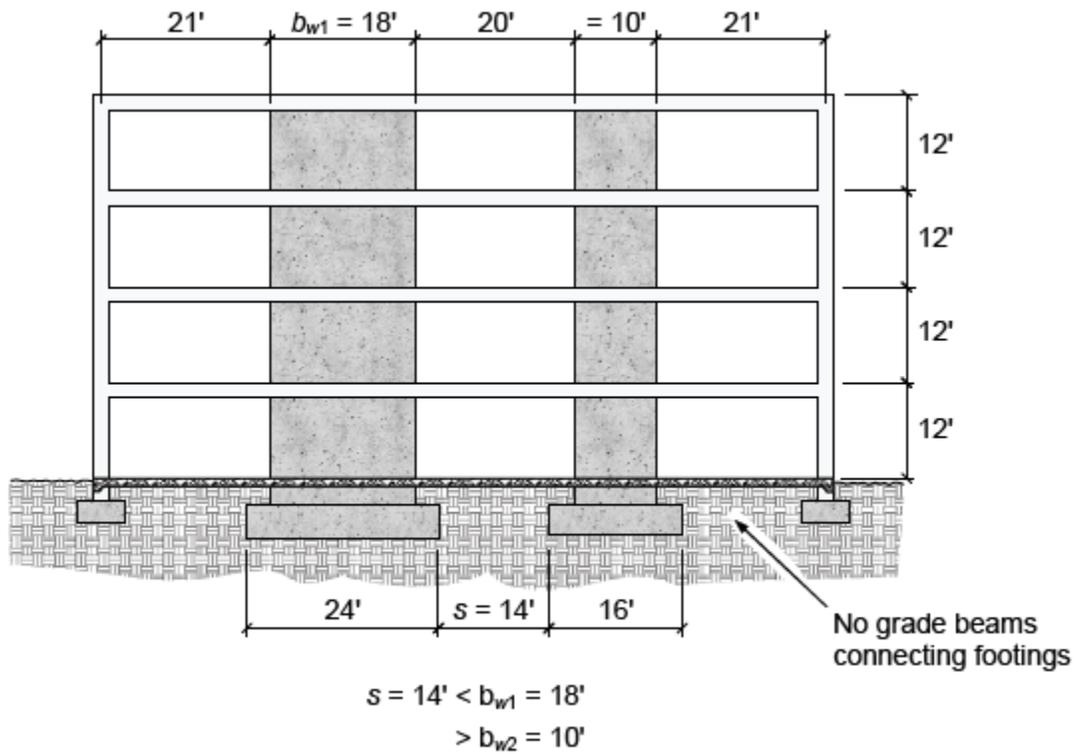
El amortiguamiento del suelo es el amortiguamiento histerético del suelo (material). Es similar al amortiguamiento viscoso inherente en la superestructura, pero es independiente del período de base flexible de la estructura.

El amortiguamiento por radiación es el amortiguamiento en el sistema suelo-estructura causado por la generación y propagación de ondas desde la base, que son causadas por los desplazamientos dinámicos de la base en relación con los desplazamientos en campo libre. El amortiguamiento por radiación es mayor cuando la relación entre rigidez de la estructura y la rigidez del suelo es mayor.

La **Figura 26** ilustra un ejemplo donde no se permite el amortiguamiento por restricciones de espaciamiento. La figura muestra un par de muros de corte desconectados. El espacio entre las dos zapatas del muro de corte es $s = 14$ ft. Aunque esto es mayor que el muro de corte más estrecho con un ancho $b_{w2} = 10$ ft, es menor que el muro de corte más ancho con un ancho $b_{w1} = 18$ ft. Y es el muro más grande quien gobierna según la disposición. La Sección 8.3 de FEMA 440 (FEMA, 2005), señala que tales casos pueden "disminuir efectivamente la energía disipada en el material del suelo y podría sobrestimarse el amortiguación relacionado".

Figura 26

Ejemplo de cimentación y superestructura donde no se permite el amortiguamiento de la cimentación porque las zapatas no están conectadas lo suficientemente cerca.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Conclusiones

El acompañamiento técnico al proyecto de construcción del Centro Administrativo Municipal de Sabaneta, permitió planificar el cronograma de obra, estructurar los métodos de trabajo, gestionar a tiempo los pedidos de material y los contratos con los subcontratistas. Así mismo, la revisión y la visita frecuente a los frentes de trabajo, permitió tomar medidas de control, programar actividades de obra semanales, rectificar algunos detalles a tiempo y evitar reprocesos.

Las actas parciales de obra son documentos que registran las actividades de construcción ejecutadas en un tiempo determinado, se entregan periódicamente según el avance de obra; para su respectiva aprobación por interventoría, estas deben estar conectadas con su correspondiente análisis de precios unitarios y con sus memorias de cálculo de obra, para estas últimas es necesario que se calculen con base a cantidades medidas en obra y se registren en un documento de forma clara y sencilla, de tal forma que sea fácil revisar y/o editar.

Antes de solicitar una cotización es indispensable tener claro las especificaciones técnicas del material o servicio; Una vez, la información es suministrada, esta, se registra en un cuadro comparativo de cotizaciones de forma resumida, con la finalidad de seleccionar la empresa idónea, que cumpla con especificaciones y presupuesto. Para celebrar un contrato es indispensable solicitar a los subcontratistas un cronograma de actividades, con el fin de dar cumplimiento a la programación general del proyecto y no incurrir en retrocesos.

La interacción entre una edificación, su cimentación y el suelo de soporte se modela mediante dos enfoques. El primero de ellos es el enfoque estructural, mediante el cual el suelo es representado por resortes. El segundo de ellos es el enfoque de análisis directo. Con este método la interacción se modela por medio de elementos finitos y generalmente se aplica únicamente para proyectos de gran magnitud y con un alto nivel de complejidad.

La realización de un análisis ISE es conveniente principalmente en estructuras rígidas, con periodos cortos, que sean soportados por suelos flexibles, dado que esta combinación representa la mayor cantidad de deformaciones relativas entre la superestructura, la cimentación y el campo cercano del suelo de fundación.

Incorporar áreas grandes de cimentación, bases empotradas, relaciones altas de rigidez, flexibilidad del suelo y flexibilidad de la cimentación en un análisis estructural que considere los efectos de ISE permite obtener típicamente un aumento en el periodo fundamental y una reducción en las fuerzas de diseño.

Una prueba practica usada para determinar si los efectos inerciales de interacción suelo-estructura (ISE) son significativos, se denomina relación de rigidez suelo-estructura. Esta combina tres parámetros que son altura del edificio, período fundamental de la estructura y velocidad de la onda de corte. Si el parámetro de control es esta prueba es mayor a 0.1 entonces los efectos inerciales de la ISE serán considerados como significativos.

Para el ejemplo del edificio de acero de dos niveles estudiado, el análisis de la ISE permitió generar al final del diseño la obtención de secciones transversales en las riostras de menor dimensión y cimentaciones más estrechas y de menor profundidad. Esto fue posible gracias a que el análisis de la ISE incorporo el efecto del amortiguamiento de la cimentación y la incidencia debida a la presencia de una losa de cimentación.

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente menciona los aspectos generales de la interacción suelo-estructura, describe de forma general los lineamientos de la información geotécnica y del análisis estructural, pone en consideración que el hecho de no incluir un análisis ISE puede conllevar a variaciones significativas en el comportamiento de la estructura, sin embargo, no especifica en detalle cada uno de los limites aplicables, ni define la metodología necesaria para realizar este tipo análisis. Ahora bien, en comparación con la nueva guía práctica de interacción suelo-estructura, esta describe con claridad todos los lineamientos, definiciones y consideraciones que se debe tener en cuenta, al momento de realizar este tipo de análisis, además, presenta los métodos de análisis, recomendaciones y ejemplos de aplicación con una metodología clara que permiten comprender con facilidad el tema de la ISE y deja claro cómo implementar un análisis ISE.

Bibliografía

- Alcaldía de Sabaneta. (2018, diciembre 17). *Sabaneta estrenará Centro Administrativo Municipal / Sala de Prensa / Información de Interés / Municipio de Sabaneta*. https://www.sabaneta.gov.co/noticias/sabaneta-estrenara-centro-administrativo-municipal_2299
- Circular-49-instructivo-diligenciamiento-acta-parcial-de-pago.pdf*. (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2021, de <http://media.utp.edu.co/vicerrectoria-administrativa/archivos/unidad-de-cuentas/circular-49-instructivo-diligenciamiento-acta-parcial-de-pago.pdf>
- FEMA, F. E. M. A. (2020). *A Practical Guide to Soil-Structure Interaction*. P-2091, 218.
- FICHEROTECNIA. (2020, mayo 11). ¿Qué son los detalles constructivos en arquitectura? *El Blog de Ficherotecnia*. <https://ficherotecnia.es/que-son-detalles-constructivos/>
- Garbellini, C., & Laloui, L. (2021). Soil-structure interaction of surface footings. *Computers and Geotechnics*, 134, 104103. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104103>
- Meza, J. (2018, enero 4). ¿Qué es una cotización? | *Blog Glosario contable*. Siigo. <https://www.siigo.com/blog/contador/que-es-una-cotizacion/>
- REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE, n.º Ley 400 de 1997 (2012).
- PROVILACOR. (s. f.). *Asistencia Técnica en Obra | Provilacor*. Recuperado 25 de julio de 2021, de <http://provilacor.com/arquitectura/asistencia-tenica-en-obra/>
- Semana. (2019, abril 24). *Un nuevo Centro Administrativo Municipal para Sabaneta*.
- Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. <https://www.semana.com/uno-para-todos-nuevo-centro-administrativo-municipal-en-sabaneta-antioquia/610826/>
- WORDPRESS. (2010, agosto 24). Cantidades de obra. *ORGANIZACIÓN DE OBRAS*. <https://organizaciondeobras.wordpress.com/cantidades-de-obra/>

Anexos

Anexo 1

Memoria de cálculo de anclaje más epóxico para la construcción de jardineras tipo voladizo

		REGISTRO FOTOGRAFICO Y MEMORIA DE CALCULO								
MEMORIAS AL ACTA DE PAGO PARCIAL DE OBRA N° 15										
OBJETO DEL CONTRATO:		CONSTRUCCION DE LA PRIMERA ETAPA DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL 'CAM' Y OBRAS COMPLEMENTARIAS EN EL MUNICIPIO DE SABANETA.								
CONTRATISTA:		CONSTRUCCIONES CIVILES Y PAVIMENTOS S.A.S		INTERVENTORIA:		SODICON S.A.S				
CONTRATO N°		784 / 2019		CONTRATO N°		784 / 2019				
LOCALIZACION:		CRA 46 N°76 SUR -47								
CAPITULO:		ITEM		O.E 26 Suministro e instalación de anclajes móviles de 1", 3/4", 5/8", 1/2" y 3/8", para diferentes estructuras, incluye mano de obra.						
UNIDAD	CANTIDAD CONTRACTUAL	CANTIDAD MODIFICADA		CANTIDAD EJECUTADA	CANTIDAD ACUMULADA					
UND				761.00	761.00					
										
LOCALIZACION	REF.	CANT. ELEMENTOS	DIMENSIONES			SUBTOTAL			TOTAL	
LARGO	ANCHO	ALTO	AREA	LONGITUD	VOLUMEN					
ANCLAJES ACTIVIDADES DE URBANISMO										
JARDINERAS										
ANCLAJE PARA MURO DE 15	Ejes 6 a 7	2	16.65							222.00
ANCLAJE PARA MURO DE 10	Ejes 6 a 7	1	16.65							111.00
ANCLAJE PARA MURO DE 15	Eje I	2	14.40							192.00
ANCLAJE PARA MURO DE 10	Eje I	1	14.40							96.00
BANCAS FIJAS										
BANCA ANCLADA	Eje I y 6 A 7	10	1.50							70.00
MURO ANCLADO	Eje I y 6 A 7	10	1.50							70.00
						SUBTOTAL			761.00	
						CANTIDAD ANTERIOR				
						TOTAL			761.00	
OBSERVACIONES										
RESIDENTE DE OBRA					RESIDENTE DE INTERVENTORIA					

Anexo 2

Memoria de cálculo de acero de refuerzo para la construcción de jardineras tipo voladizo.

		REGISTRO FOTOGRAFICO Y MEMORIA DE CALCULO							
MEMORIAS AL ACTA DE PAGO PARCIAL DE OBRA N° 15									
OBJETO DEL CONTRATO:		CONSTRUCCION DE LA PRIMERA ETAPA DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL 'CAM' Y OBRAS COMPLEMENTARIAS EN EL MUNICIPIO DE SABANETA.							
CONTRATISTA:		CONSTRUCCIONES CIVILES Y PAVIMENTOS S.A.S			INTERVENTORIA:		SODICON S.A.S		
CONTRATO N°:		7847/2019			CONTRATO N°:				
LOCALIZACION:		CRA 46 N°76 SUR -47							
CAPITULO:		4		ACERO		ITEM		4.1.1	
Suministro, transporte e instalación de acero de refuerzo figurado FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado. Incluye transporte con descarga, transporte interno, alambre de amarre, certificados y todos los demás elementos necesarios para su correcta instalación, según diseño y recomendaciones estructurales.									
UNIDAD		CANTIDAD CONTRACTUAL		CANTIDAD MODIFICADA		CANTIDAD EJECUTADA		CANTIDAD ACUMULADA	
KG		848539.25				1142.90		224347.14	
									
UBICACIÓN		FIGURA	CANTIDAD	DIAMETRO [#]	LONGITUD [m]	PESO [Kg/m]	PESO [kg]	CANTIDAD ELEMENTOS	PESO TOTAL
URBANISMO									
JARDINERAS SOBRE JUNTA DE DILATACIÓN									
MURO DE 15 ANCLADO A LOSA DE EJES 6 A 7		Gancho U	111	3	0.82	0.56	50.97	2.00	101.94
		B/longitudinal	10	4	17.20	0.99	170.97	1.00	170.97
MURO DE 10 ANCLADO A LOSA DE EJES 6 A 7		Gancho I	111	3	0.30	0.56	18.65	1.00	18.65
		B/longitudinal	2	4	17.20	0.99	34.19	1.00	34.19
VOLADIZO MURO DE 10 SOBRE DE EJES 6 A 7		Gancho L	111	3	1.35	0.56	83.92	1.00	83.92
		B/longitudinal	5	4	17.20	0.99	85.48	1.00	85.48
MURO DE 15 ANCLADO A LOSA. EJE I		ANCLAJE EN U	96	3	0.82	0.56	44.08	2.00	88.17
		B/longitudinal	10	4	14.95	0.99	148.60	1.00	148.60
MURO DE 10 ANCLADO A LOSA EJE I		Gancho I	96	3	0.30	0.56	16.13	1.00	16.13
		B/longitudinal	2	4	14.95	0.99	29.72	1.00	29.72
VOLADIZO MURO DE 10 EJE I		Gancho	96	3	1.35	0.56	72.58	1.00	72.58
		B/longitudinal	5	4	14.95	0.99	74.30	1.00	74.30
BANCAS FIJAS									
BANCA ANCLADA EJE 1 y EJES DE 6 A 7		Gancho L	70	3	1.26	0.56	49.39	1.00	49.39
		B/longitudinal	49	4	1.50	0.99	73.06	1.00	73.06
MURO ANCLADO. EJE 1 y EJES DE 6 A 7		Gancho L	70	3	0.58	0.56	22.74	1.00	22.74
		B/longitudinal	49	4	1.50	0.99	73.06	1.00	73.06
SUBTOTAL									1,142.90
CANTIDAD ANTERIOR									
TOTAL									1,142.90
OBSERVACIONES									
RESIDENTE DE OBRA					RESIDENTE DE INTERVENTORIA				

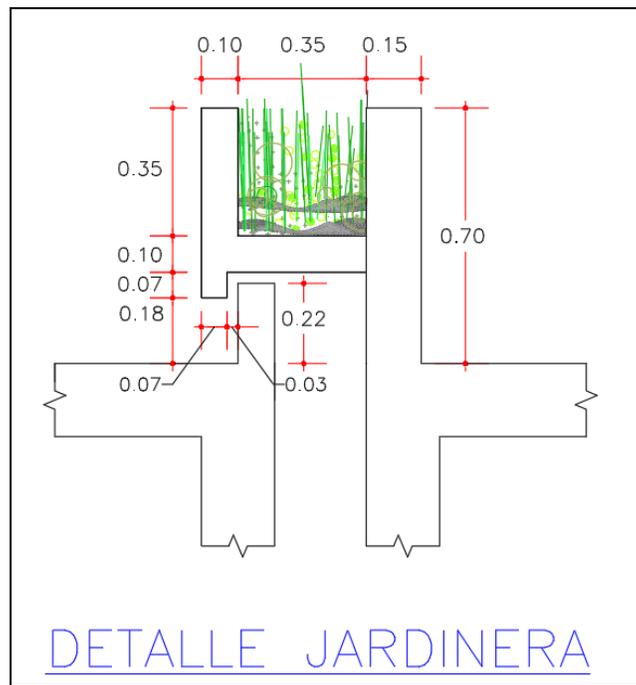
Anexo 3

Memoria de cálculo de concreto estructural para la construcción de jardineras tipo voladizo.

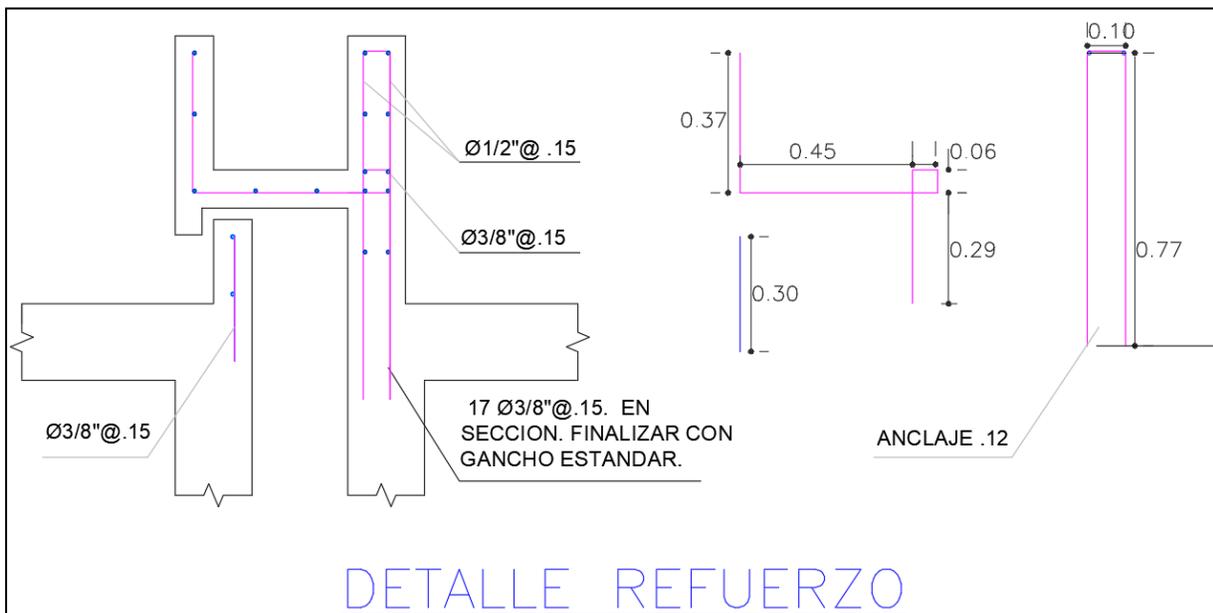
		REGISTRO FOTOGRAFICO Y MEMORIA DE CALCULO								
MEMORIAS AL ACTA DE PAGO PARCIAL DE OBRA No 15										
OBJETO DEL CONTRATO:		CONSTRUCCION DE LA PRIMERA ETAPA DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL CAM Y OBRAS COMPLEMENTARIAS EN EL MUNICIPIO DE SABANETA.								
CONTRATISTA:		CONSTRUCCIONES CIVILES Y PAVIMENTOS S.A.S			INTERVENTORIA:					
CONTRATO No		784 / 2019			CONTRATO No		784 / 2019			
LOCALIZACION:		CRA 46 N°76 SUR -47								
CAPITULO:				ITEM		O.E 153				
		Construcción de jardineras tipo voladizo para cobertura de junta de construcción en concreto 21 Mpa con acabado a la vista, según diseño, incluye todos los elementos necesarios para su ejecución, el acero se paga por su respectivo ítem.								
UNIDAD		CANTIDAD CONTRACTUAL		CANTIDAD MODIFICADA		CANTIDAD EJECUTADA	CANTIDAD ACUMULADA			
ML						31.04	31.04			
										
LOCALIZACION		REF.	CANT.	DIMENSIONES			SUBTOTAL		TOTAL	
				LARGO	ANCHO	ALTO	LONGITUD	AREA	VOLUMEN	
JARDINERAS NIVEL 1 N+00										
MURO DE 15 ANCLADO A LOSA		Ejes 6 a 7	1	16.64			16.64			16.64
MURO DE 10 ANCLADO A LOSA		Ejes 6 a 7								
VOLADIZO MURO DE 10		Ejes 6 a 7								
MURO DE 15 ANCLADO A LOSA		Eje 1	1	14.40			14.40			14.40
MURO DE 10 ANCLADO A LOSA		Eje 1								
VOLADIZO MURO DE 10		Eje 1								
BANCAS NIVEL 1 N+00										
BANCA ANCLADA		Ejes 6 a 7	3	1.50			4.50			4.50
BANCA ANCLADA		Eje 1	4	1.50			6.00			6.00
							SUBTOTAL		31.04	
							CANTIDAD ANTERIOR			
							TOTAL		31.04	
OBSERVACIONES										
RESIDENTE DE OBRA						RESIDENTE DE INTERVENTORIA				

Anexo 4

Detalle constructivo. Geometría aprobada para construcción de jardinera tipo voladizo

**Anexo 5**

Detalle constructivo. Acero de refuerzo aprobado para la construcción de jardinera tipo voladizo.



Anexo 6

Formato de un comparativo de cotizaciones y registro de entidades que cotizaron el sistema de riego automatizado del proyecto.

AREA DE INFRAESTRUCTURA		COMPARATIVO COTIZACIONES																											
		Código: FGP-24																											
FECHA:	10/6/2021	# CUADRO:		1.2 PAISAJISMO. SISTEMA DE RIEGO																									
EDIFICIO CAM SABANETA																													
ACTIVIDAD:		Sistema de riego controlado automatizado, incluye: Automatización; control de apertura y cierre; conexión y regulación de presión y Líneas de riego.																											
Ítem	Nombre	Und	Cantidad	BIOINVERSIONES ALSOLAR VIVERO		ION TECH SAS		SUMMA PROYECTOS Y CONSTRUCCIONES SAS																					
				VALOR UNIT	VALOR TOTAL	VALOR UNIT	VALOR TOTAL	VALOR UNIT	VALOR TOTAL																				
A1	Sistema de riego automático para fachada, 4 caras incluyen 2 temporizadores.	Und	1	\$ 21,800,000	\$ 21,800,000																								
B1	Filtros	Und	1			\$ 1,800,000	\$ 1,800,000																						
B2	Electroválvulas	Und	14			\$ 700,000	\$ 9,800,000																						
B3	Control de riego	Und	1			\$ 3,500,000	\$ 3,500,000																						
B4	Cable eléctrico	Und	1			\$ 2,000,000	\$ 2,000,000																						
B5	Accesorios PVC	Und	1			\$ 2,500,000	\$ 2,500,000																						
B6	Varios (Tornillos, abrazaderas, etc.)	Und	1			\$ 500,000	\$ 500,000																						
B7	Manguera de riego	Und	1			\$ 4,000,000	\$ 4,000,000																						
B8	Distribuidores (Pitillos)	Und	204			\$ 8,000	\$ 1,632,000																						
B9	Abrazaderas de riego (Amarras)	Und	1			\$ 300,000	\$ 300,000																						
B10	Mano de obra (2 ayudantes 1 auxiliar)	Und	1			\$ 6,000,000	\$ 6,000,000																						
B11	Tubos de npt de 3/4 con accesorios	Und	150			\$ 10,000	\$ 1,500,000																						
B12	Tubo PVC para instalación eléctrica	Und	150			\$ 7,000	\$ 1,050,000																						
C1	Suministro transporte e instalación de conexión y regulación de presión en línea de distribución suministrada por el proyecto para la línea de riego	Und	28					\$ 182,140	\$ 5,099,920																				
C2	Suministro transporte e instalación de líneas de riego con goteo temporizado	ml	1092					\$ 9,880	\$ 10,788,960																				
C3	Suministro transporte e instalación de temporización de líneas de riego	Und	1					\$ 1,417,970	\$ 1,417,970																				
C4	Suministro transporte e instalación de control de apertura y cierre de líneas de riego.	Und	4					\$ 327,578	\$ 1,310,312																				
<table border="1"> <tr> <td>SUBTOTAL</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>12%</td> </tr> <tr> <td>Unidad</td> <td>5%</td> </tr> <tr> <td>IVA</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td></td> </tr> </table>				SUBTOTAL		Administración	12%	Unidad	5%	IVA	19%	TOTAL		<table border="1"> <tr> <td>\$ 21,800,000</td> </tr> <tr> <td>\$ 700,000</td> </tr> <tr> <td>\$ 4,142,000</td> </tr> <tr> <td>\$ 26,642,000</td> </tr> </table>	\$ 21,800,000	\$ 700,000	\$ 4,142,000	\$ 26,642,000	<table border="1"> <tr> <td>\$ 34,582,000</td> </tr> <tr> <td>\$ -</td> </tr> <tr> <td>\$ -</td> </tr> <tr> <td>\$ 34,582,000</td> </tr> </table>	\$ 34,582,000	\$ -	\$ -	\$ 34,582,000	<table border="1"> <tr> <td>\$ 18,617,162</td> </tr> <tr> <td>2,234,059.44</td> </tr> <tr> <td>930,858.10</td> </tr> <tr> <td>176,863.04</td> </tr> <tr> <td>\$ 21,958,943</td> </tr> </table>	\$ 18,617,162	2,234,059.44	930,858.10	176,863.04	\$ 21,958,943
SUBTOTAL																													
Administración	12%																												
Unidad	5%																												
IVA	19%																												
TOTAL																													
\$ 21,800,000																													
\$ 700,000																													
\$ 4,142,000																													
\$ 26,642,000																													
\$ 34,582,000																													
\$ -																													
\$ -																													
\$ 34,582,000																													
\$ 18,617,162																													
2,234,059.44																													
930,858.10																													
176,863.04																													
\$ 21,958,943																													
FORMA DE PAGO:		50% anticipo, 20% a las dos semanas de inicio de la obra, 30% ala entrega del proyecto.	50% anticipo, 50% al finalizar las actividades	30% anticipo, actas parciales catorcenales, según avance, valor final al terminar las obras																									
TIEMPO DE EJECUCIÓN				30 días																									
VALIDEZ DE LA OFERTA		5/05/2021 a 5/08/2021	05/06/2021 a 05/07/2021	10/06/2021 a 02/07/2021																									
OBSERVACIONES		No incluye: Obras civiles, intervención en redes eléctricas osanitarias.	No incluye: Obras civiles, intervención en redes eléctricas o sanitarias.	No incluye: Obras civiles, intervención en redes eléctricas o sanitarias.																									
CONTACTO		Bibiana Pezzotti	Oswaldo Soto Osorio	Martín Jaramillo																									
TELEFONO		3508857139 / 3117925689	320 687 78 08	3122271298																									
SELECCIONADO																													

Anexo 7

.Registró fotográfica de revisión y control de las actividades constructivas ejecutadas en el proyecto.

Instalación de impermeabilización mediante sistemas mantos-poliuretanos con remate perimetral a 15 cm de altura del nivel de piso.



Evidencia 1 Impermeabilización en cubiertas.

Construcción de cerramiento, incluye excavación, solado, pilotes, viga de fundación, muro en concreto a las vista y tubería de acero. Eje 1. Paralelo a la CR 46.



Evidencia 2 Cerramiento.

Construcción de vía vehicular en concreto de 21 MPa, paralela eje K.



Evidencia 3 Construcción de vía.

Construcción de andén de 21 MPa con un espesor de 0.1m e instalación de adoquín tipo táctil y guía.



Evidencia 4 Construcción de andén.

Impermeabilización de piso en zona de Plazoleta y Acceso con geomembrana resistente al ataque de agentes químicos y rayos ultravioleta piso y jardineras mediante sistema tipo y aditivo tipo IGOL denso o similar.



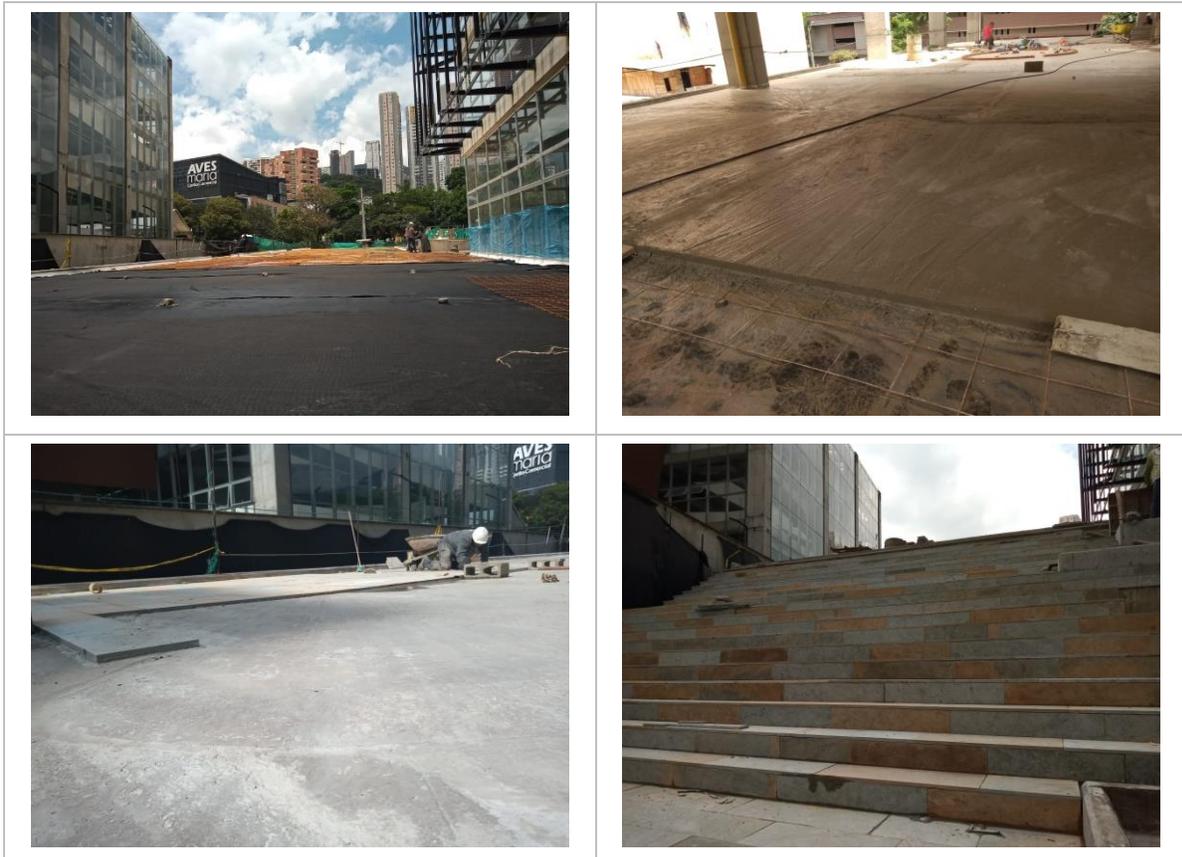
Evidencia 5 Impermeabilización.

Impermeabilización con Pintura asfáltica altamente impermeabilizante y anticorrosiva:



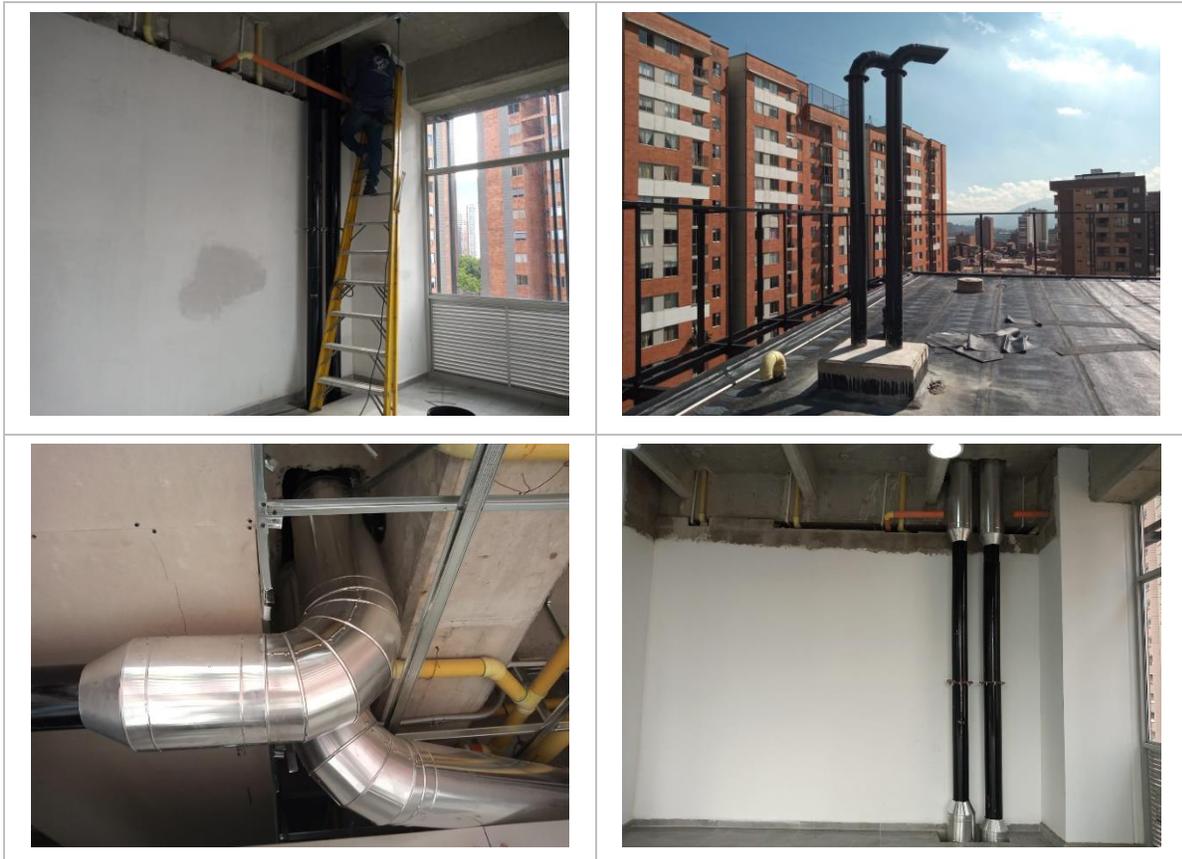
Evidencia 6 Impermeabilización con pintura asfáltica.

Construcción de pendienteado incluye malla y geotextil e instalación de porcelanato tipo Royal Veta.



Evidencia 7 Pendientado.

Instalación de ductos de escape y aislamiento para bomba eléctrica y bomba de red contra incendios.



Evidencia 8 Instalación de ductos de escape.

Revisión e inspección del correcto funcionamiento de comandos en ascensor de costado oriental y occidental del edificio.



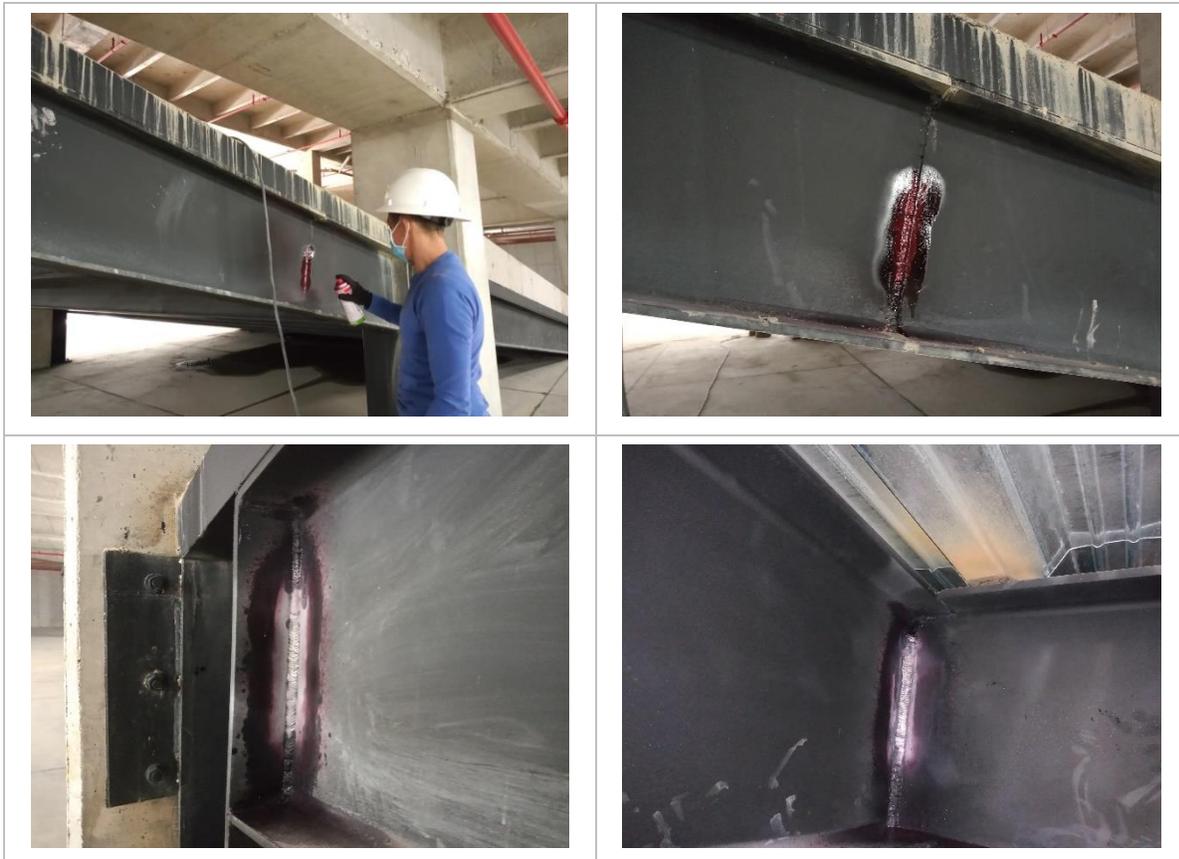
Evidencia 9 Inspección técnica.

Ensayo de adherencia de pintura en estructuras metálicas para la evaluación del grado de adherencia en la pintura de superficies metálicas, y ensayo de espesor de pintura por ultrasonido, según las especificaciones del espesor de la capa de pintura.



Evidencia 10 Ensayo de adherencia y espesor de pintura.

Ensayo no destructivo de Soldadura mediante tintas penetrantes para detectar discontinuidades en superficies.



Evidencia 11 Ensayo de soldadura.



Evidencia 12 Fachada occidente y sur.



Evidencia 13 Planta del proyecto.

Anexo 8

1. Ejemplo de aplicación: Edificio de dos niveles

El edificio de ejemplo es un edificio de acero de dos niveles con un sistema estructural arriostrado, para uso de oficinas; considera riostras restringidas al pandeo y un sistema de cimentación superficial. El siguiente ejemplo muestra las disposiciones del análisis ISE.

1.1. Descripción del sitio, parámetros de movimiento del suelo y propiedades del suelo

Figura 27

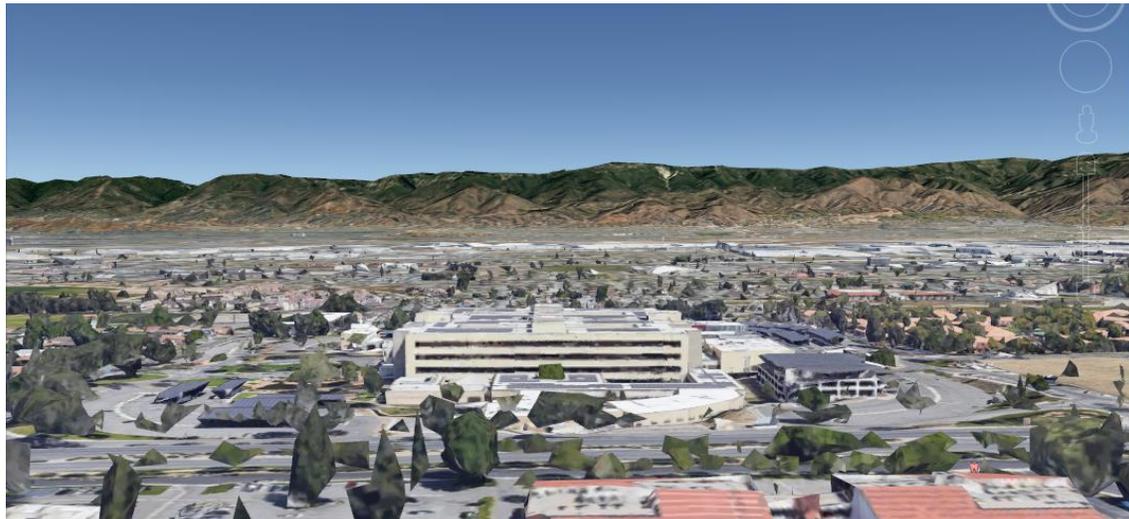
Visual en planta del conjunto residencial VA Loma Linda Healthcare.



Nota. Fuente <https://earth.google.com/web/> (Google earth, 2021).

Figura 28

Visual geográfica de la zona.



Nota. Fuente <https://earth.google.com/web/> (Google earth, 2021).

Para el propósito de este ejemplo, el edificio ficticio está ubicado en el conjunto residencial VA Loma Linda Healthcare en el condado de san Bernardino California, (Latitud 34.049601, Longitud -117.250073), como se muestra en las figuras **Figura 27** y **Figura 28**.

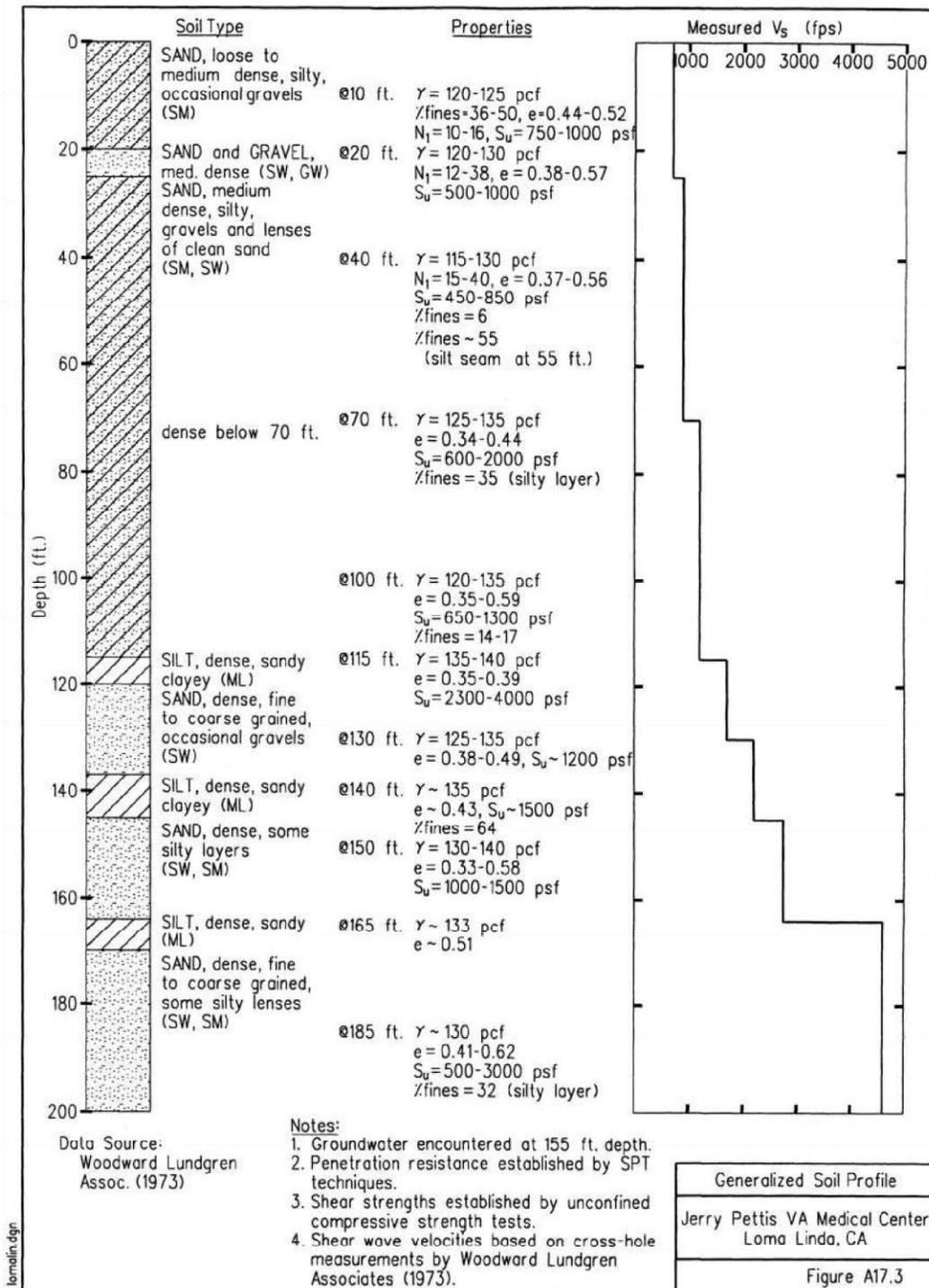
Los suelos del sitio están compuestos por arenas y gravas sueltas en la superficie que aumentan su densidad con la profundidad, la **Figura 29** muestra el perfil generalizado del suelo. La velocidad media de onda cortante a los 100 ft superiores es 950 ft/s o (290 m/s) lo que resulta en una clasificación del sitio como tipo D, esto se puede corroborar en la tabla A.2.4-1 clasificación de los perfiles de suelo NSR-10 donde para este tipo de suelo la velocidad media de onda de corte debe ser mayor o igual a 180 m/s y menor a 360 m/s, de acuerdo con esto, los parámetros de movimiento del suelo son:

- $S_S = 2.355g$
- $S_I = 0.943g$
- $S_{MS} = 2.355g$
- $S_{DS} = 1.57g$

Los valores de S_{M1} y S_{D1} no están especificados por la aplicación web ATC Hazards by Location, que apunta a la Sección 11.4.8 de ASCE/SEI 7-16, que requiere un análisis de respuesta del sitio. Una excepción en ASCE/SEI 7-16 Sección 11.4.8 permite la consideración de una forma espectral conservadora con C_S tomado como el valor determinado por ASCE/SEI 7-16 Ecuación 12.8-2 para períodos de hasta $1.5T_S$ (1.02 s) y tomado como 1,5 veces el valor calculado por ASCE/SEI 7-16 Ecuación 12.8-3 para períodos más largos considerando $F_v = 1.7$.

Figura 29

Perfil de suelo generalizado para el sitio de Loma Linda.



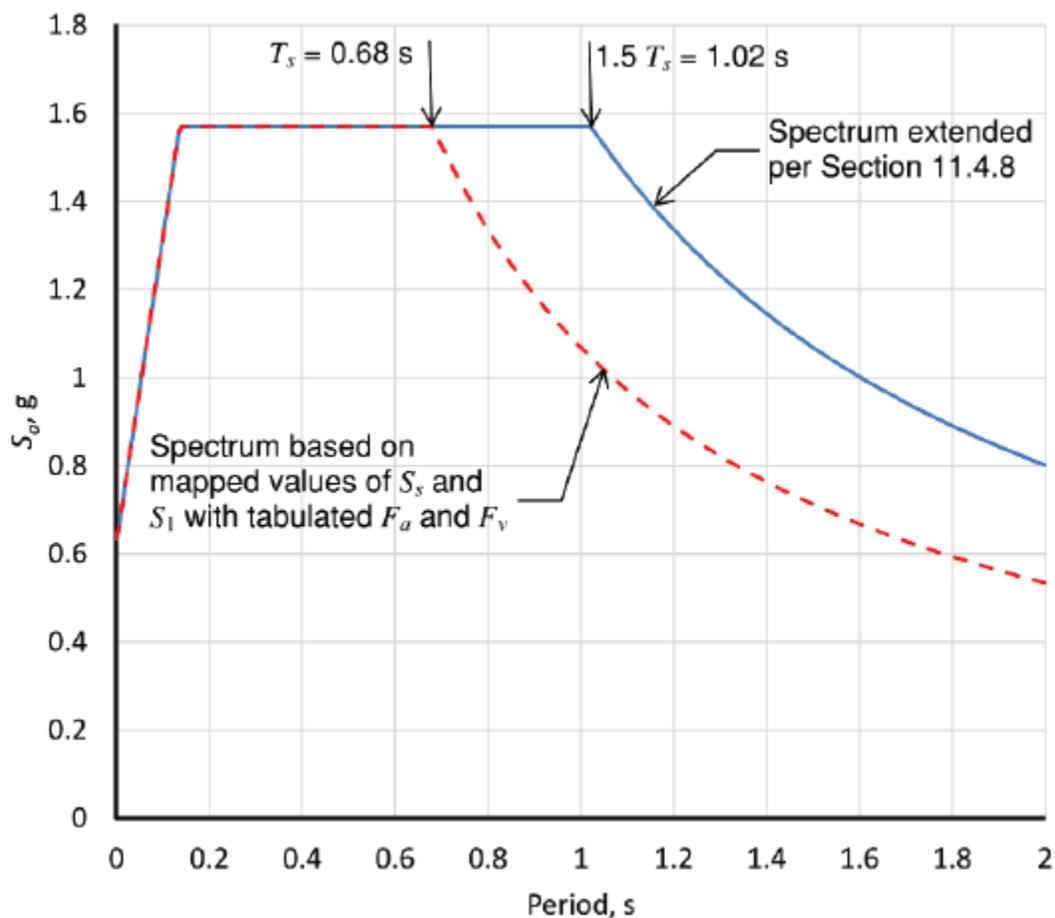
Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

El efecto de la forma espectral modificada es alargar la meseta de período corto, empujando la línea descendente del espectro hacia la derecha. El espectro de respuesta de diseño se muestra

en la **Figura 30**, junto con el espectro basado en los valores mapeados sin los aumentos requeridos por ASCE/SEI 7-16 Sección 11.4.8 para comparación. Se debe tener en cuenta que el período corto del edificio de ejemplo no requerirá la consideración de la porción descendente del espectro de respuesta. El período más largo calculado en este ejemplo (para una reducción del 50% de los resortes y tamaños de riostra reducidos) es 0,62 s, que permanece por debajo de $T_s = 0,68$ s y considerablemente menor al límite establecido por la norma $1,5 T_s = 1,02$ s.

Figura 30

Espectro de respuesta de aceleración de diseño.



Nota. Fuente <https://www.asce.org> (ASCE/SEI 41-17, capítulos 11 y 12, 2017).

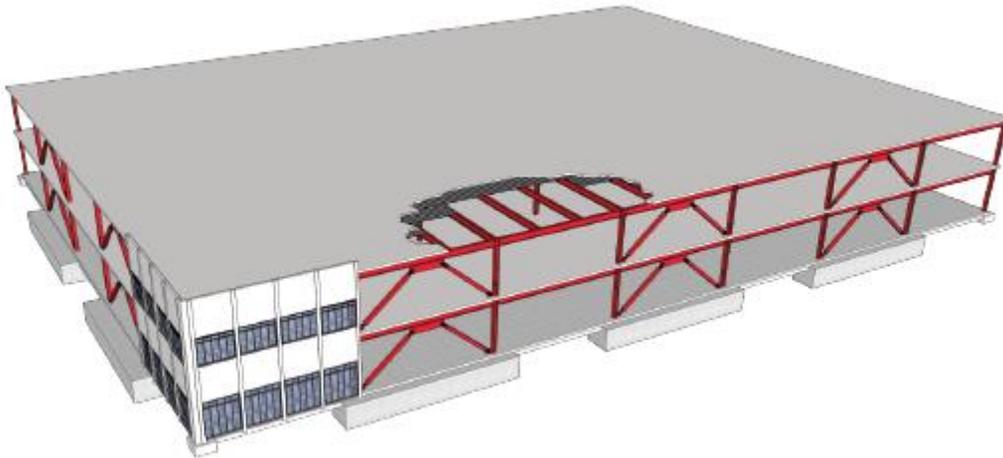
1.2. Descripción del edificio, geometría, estructura de gravedad, sistema de resistencia a la fuerza sísmica y cimientos.

1.2.1. Pórtico resistente a cargas de gravedad.

El edificio de ejemplo es un edificio de oficinas de dos pisos, es de planta rectangular, con cinco luces de 30 ft en la dirección norte-sur (transversal) y siete luces de 30 ft en la dirección este-oeste (longitudinal). La altura de cada piso es de 12'-6". En las Figuras *Figura 31*, *Figura 32* y *Figura 33* se muestra una vista general del edificio, un plano del piso típico y un plano de la cimentación, respectivamente.

Figura 31

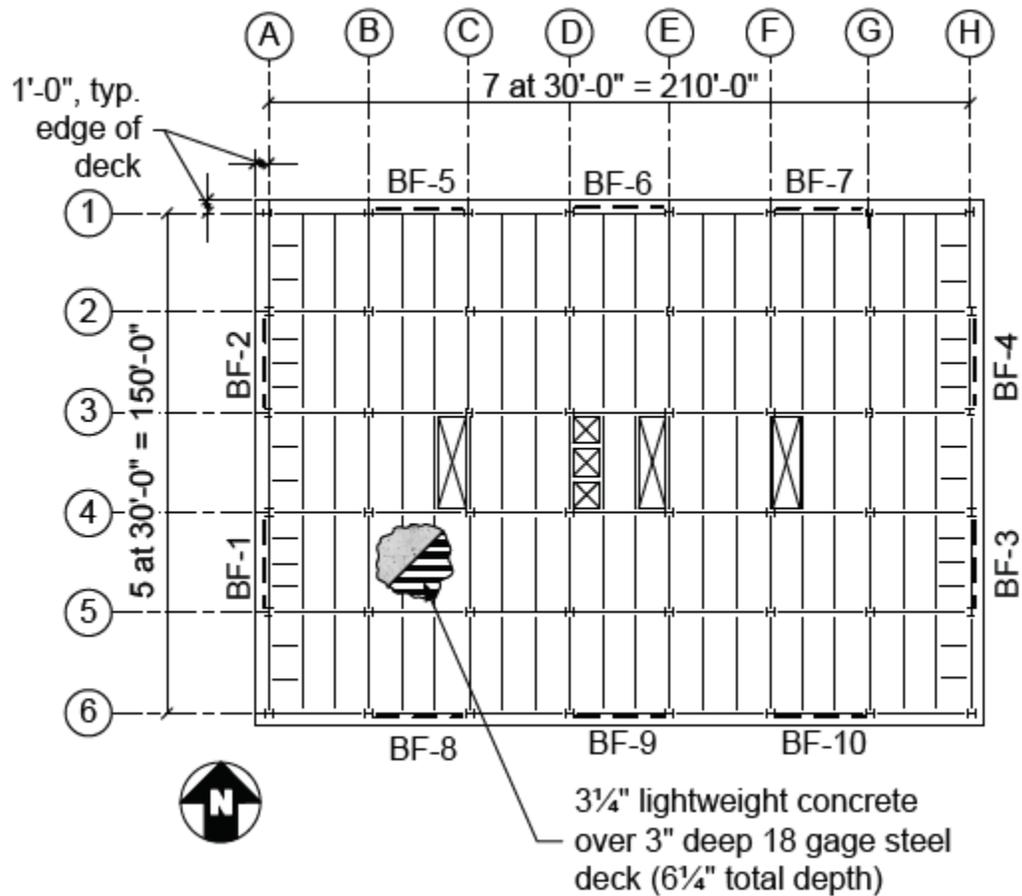
Vista general del edificio.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

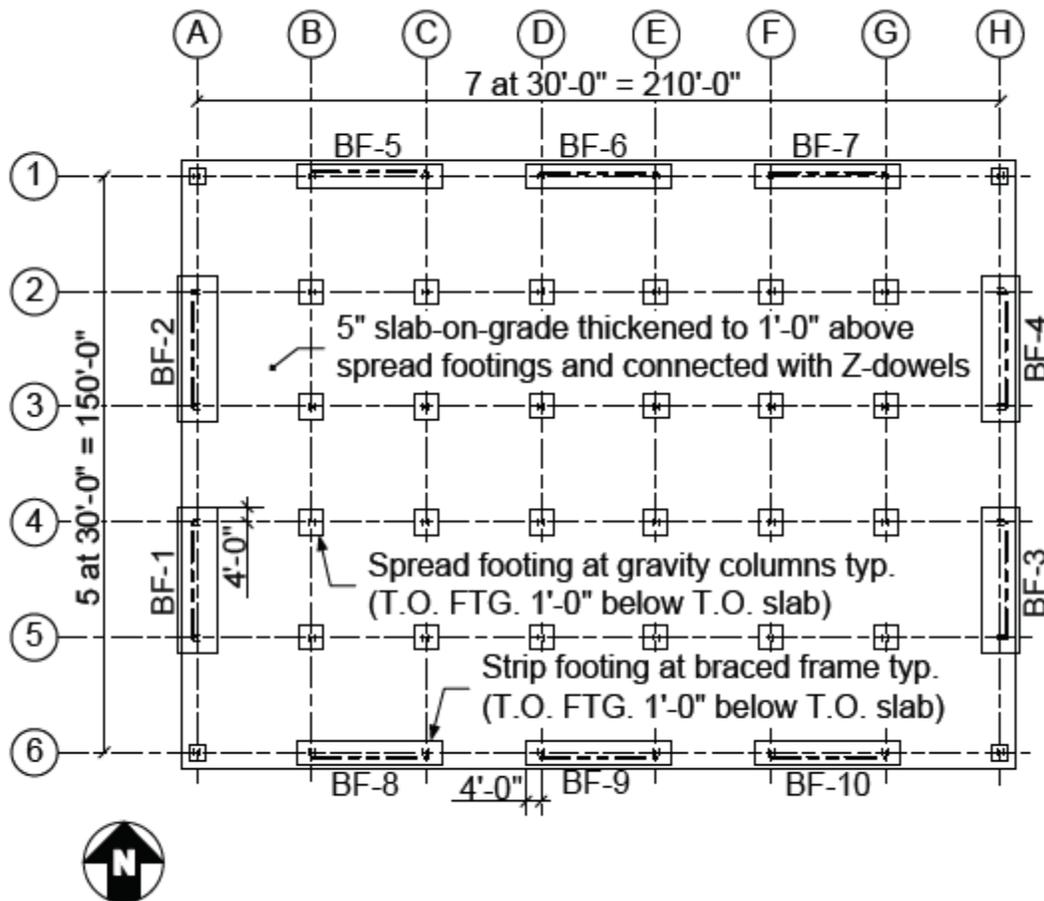
Figura 32

Planta típica del edificio (planta de techo similar).



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Figura 33
Planta de cimentación.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.2.1. Pórtico resistente a cargas de gravedad.

El techo y el segundo piso están contruidos mediante un sistema de lámina colaborante (metaldeck) con hormigón ligero estructural de 3¼ in sobre una plataforma de acero compuesto de 3 in, soportada por vigas de ala ancha de acero con un espaciamento de 10 ft y vigas de ala ancha con un espaciamento de 30 ft. La estructura de gravedad se apoya en columnas W14.

1.2.2. Pórtico resistente a cargas laterales.

El edificio resiste cargas laterales mediante un sistema de pórticos arriostrados de un solo tramo, dispuestos simétricamente en el perímetro, con dos pórticos en cada uno de los lados cortos actuando en la dirección transversal y tres pórticos en cada uno de los lados más largos actuando en la dirección longitudinal.

1.2.3. Cargas de gravedad y peso sísmico.

Las cargas muertas y los pesos sísmicos para el techo se muestran en la **Tabla 1** y en la **Tabla 2** para el piso típico. Las cargas vivas son de 20 lb/ft² para el techo y 50 lb/ft² para el piso típico.

El peso sísmico total a nivel del techo es de 2,385 kip en el techo y 2,449 kip en el segundo piso, lo que resulta en un peso sísmico total de 4,834 kip, como se indica en la **Tabla 3**.

Tabla 1

Cargas a nivel de cubierta.

Component	Dead Load (lb/ft ²)	Seismic Weight (lb/ft ²)
Roofing	5.0	5.0
Insulation	3.0	3.0
Steel deck and concrete fill	46.4	46.4
Steel framing (beams and columns)	7.0	7.0
Ceiling	3.0	3.0
Partitions	0.0	5.0
Exterior walls, MEP, miscellaneous components, extra concrete for deck deflection	4.6	4.6
Total	69.0	74.0

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 2

Cargas en el segundo nivel.

Component	Dead Load (lb/ft ²)	Seismic Weight (lb/ft ²)
Floor Covering	1.0	1.0
Steel deck and concrete fill	46.4	46.4
Steel framing (beams and columns)	11.0	11.0
Ceiling	3.0	3.0
Partitions	15.0	10.0
Exterior walls, MEP, miscellaneous components, extra concrete for deck deflection	4.6	4.6
Total	81.0	76.0

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 3

Resumen de la distribución del peso sísmico.

Level	East-West Dimension (ft)	North-South Dimension (ft)	Area (ft ²)	Flat Load (lb/ft ²)	Total Weight (kip)
Roof	212	152	32,224	74	2,385
Second Floor	212	152	32,224	76	2,449
Total					4,834

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.2.4. Sistema de cimentación

El edificio se apoya en un sistema de zapatas aisladas y continuas; con zapatas cuadradas en cada una de las columnas de gravedad (verticales) y zapatas continuas en cada pórtico arriostrado, que comprende las dos columnas del pórtico y se extiende más allá de cada columna para proporcionar resistencia al vuelco; también se apoya sobre una losa a nivel que está diseñada como un diafragma de interconexión con dovelas en Z fundidas en cada zapata, como se muestra en la **Figura 33**. Para el análisis se desprecia la resistencia a la fricción entre la losa y el suelo.

El diseño de la cimentación se basa en las disposiciones de diseño LRFD según disposiciones de ASCE/SEI 7-16 Sección 12.13. 5. El ingeniero geotécnico ha proporcionado una resistencia de carga nominal de 10 kip/ft², a la que se aplica un factor de resistencia de 0.45 según ASCE/SEI 7-16 Tabla 12.13-1, lo cual da una resistencia de diseño de 4.5kip/ft².

1.3. Diseño inicial, área central de las riostras restringidas al pandeo, tamaños de las columnas y tamaños de los cimientos.

El diseño que incorpora la interacción suelo-estructura requiere un enfoque más iterativo que el diseño tradicional de base fija, dado que la determinación de las reducciones de fuerza de diseño aplicables al edificio depende de los tamaños de los cimientos y de los períodos de la estructura de base fija y base flexible. A continuación, se presenta el diseño de la estructura y de la cimentación, en primera instancia, sin considerar ninguna reducción en la carga sísmica debido a la interacción suelo-estructura. Las reducciones de la ISE se calculan posteriormente, según la dinámica de la estructura y la geometría de los cimientos del diseño inicial.

1.3.1. Cortante basal.

Para el diseño inicial el cortante basal se determina según el método de fuerza Lateral equivalente (FHE) de ASCE/SEI 7-16 Sección 12.8. En este procedimiento, el cortante basal se calcula considerando que el edificio se fija en la base y las fuerzas se distribuyen sobre la altura para encontrar los cortantes de cada piso, los cuales, se usan para calcular las dimensiones requeridas en las riostras y las demandas de vuelco de los cimientos. El período fundamental del edificio para determinar del cortante de la base, T_a , se calcula de acuerdo con:

$$T_a = C_t h_n^x = (0.03)(25)^{0.75} = 0.34 \text{ s}$$

Donde:

- $h_n = 25 \text{ ft}$
- C_t y x son determinadas, según ASCE/SEI 7-16 Table 12.8-2.

Como T_a es menor que $1.5T_s$, el cortante basal v , se calcula como sigue:

$$V = C_s W \quad \text{y} \quad C_s = \frac{S_{DS}}{R/I_e}$$

Donde:

- $R = 8$ para pórticos arriostrados resistentes al pandeo
- $I_e = 1.0$ para categoría de riesgo II

Entonces:

$$V = (C_s = 0.196)(W = 4,834 \text{ kip}) = 949 \text{ kip}$$

Se distribuye las fuerzas sísmicas sobre la altura del edificio de acuerdo con ASCE/SEI 7-16 Sección 12.8.3, como se indica en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Distribución vertical de fuerzas sísmicas.

Level	w_x (kip)	h_x (ft)	C_{vx}	F_x (kip)
Roof	2,385	25	0.66	627
Second Floor	2,449	12.5	0.34	322
Total	4,834			949

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.3.2. Diseño de riostras.

Para el propósito de este ejemplo, no se considera la aplicación de torsión accidental según ASCE/SEI 7-16 Sección 12.8.4.3, lo cual simplifica los cálculos. Para determinar el área requerida de las riostras resistentes al pandeo, se requiere que el total de cortantes por piso se divida por el número de riostras en cada dirección, multiplicado por la relación entre la longitud de la riostra, y el ancho de la mitad de la luz (1.30), y dividido por el límite elástico de diseño del material de la riostra, que en este caso es $(0.9) 42\text{ksi} = 37.8\text{ksi}$. El cálculo de las áreas de las riostras se redondea al cuarto de pulgada cuadrada más cercano para facilitar la fabricación. Las áreas centrales de la riostra se muestran en la **Tabla 5** y **Tabla 6**. Se debe tener en cuenta que las demandas en las riostras de la dirección longitudinal son dos tercios de las de la dirección transversal, ya que la única diferencia entre los dos cálculos es el número de riostras en cada dirección.

Tabla 5*Áreas centrales de la riostra transversal.*

Level	Number of braces	Brace Force (kip)	Computed Core Area (in ²)	Specified Core Area (in ²)
Below Roof	8	102	2.98	3.00
Below Second Floor	8	154	4.51	4.75

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 6*Áreas centrales de la riostra longitudinal.*

Level	Number of braces	Brace Force (kip)	Computed Core Area (in ²)	Specified Core Area (in ²)
Below Roof	12	68	1.99	2.00
Below Second Floor	12	103	3.01	3.25

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Las columnas en cada pórtico están diseñadas para resistir las demandas de vuelco amplificadas factorizadas, que son 461 kip para los pórticos transversales y 351 kip para la dirección longitudinal. La sección de columna W10 sísmicamente compacta más pequeña, W10 × 68, se utiliza con una capacidad de compresión axial de 687 kip para toda la altura del edificio.

1.3.3. Diseño de los cimientos.

Los cimientos de los pórticos están diseñados para resistir cargas de gravedad junto con las demandas de vuelco sísmico. Se consideran dos combinaciones de carga LRFD para soportar cargas de gravedad mínima y máxima que ASCE/SEI 7-16 considera aplicables en las demandas de terremotos. Las combinaciones de carga de ASCE/EI 7-16 Sección 2.3.6 se emplean a continuación:

- $1.2D + E_v + E_h + 0.5L + 0.2S$ (ASCE/SEI 7-16 Sec. 2.3.6, Eq. 6)
- $0.9D - E_v - E_h$ (ASCE/SEI 7-16 Sec. 2.3.6, Eq. 7)

Donde E_v es $0.2S_{DS}D$, como se define en ASCE/SEI 7-16 Sección 12.4.2.2. Con S_{DS} para el sitio igual a $1.57g$, esta es una carga muerta agregada o reducida de $0.314D$. Según la excepción de 2b que indica el efecto de carga sísmica vertical, E_v puede tomarse como cero en ASCE/SEI 7-16 Sec. 2.3.6 Ecuación 7 cuando se determinan las demandas de vuelco en la interfaz suelo-estructura de la cimentación, por lo que no es necesario considerar la reducción de $0.314D$ en la ecuación al determinar la estabilidad de la cimentación y las presiones del suelo.

Aunque las columnas del pórtico están diseñadas para incorporar la carga amplificada debido a la sobrerresistencia, no es necesario considerar la carga amplificada para el diseño de la cimentación.

Dado que los pórticos y sus cargas son simétricos, se puede considerar que la carga total por gravedad actúa en la línea central del pórtico. El peso de la cimentación se incluye en la carga muerta, D . La carga de nieve, S , es cero. La carga viva, L , es la carga viva reducida que actúa en el segundo piso. El factor de 0.5 en la carga viva está en la Excepción 1 en ASCE / SEI 7-16 Sección 2.3.6. No se considera que la carga viva del techo actúe con la carga sísmica.

Para el análisis se considera una cimentación continua con una profundidad de 5 ft, que se extiende 4 ft más allá del centro de cada columna, lo que da como resultado una longitud de cimentación de 38 ft. Se determina el ancho de la cimentación mediante prueba y ajuste para proporcionar estabilidad al giro y que las presiones del suelo permanezcan por debajo de la resistencia de diseño de 4.5 kip/ft^2 . Debido a que las áreas tributarias son las mismas entre los dos tipos de pórticos, las cargas de gravedad de la superestructura en cada columna del pórtico son las mismas para ambos tipos.

La reducción de carga viva se calcula de acuerdo con ASCE / SEI 7-16 Sección 4.7.2, con el área tributaria, A_T de 480 ft^2 y K_{LL} tomado como 4, según ASCE/SEI 7-16 Tabla 4.7-1.

$$L = L_0 = \left(0.25 + \frac{15}{\sqrt{K_{LL}A_T}} \right) = (L_0 = 50 \text{ lb/ft}^2)(0.59) = 29.6 \text{ lb/ft}^2$$

Las cargas de las columnas en la base son las siguientes:

$$D = (480 \text{ ft}^2) (69 \text{ lb/ft}^2 + 81 \text{ lb/ft}^2) = 72 \text{ kip}$$

$$L = (480 \text{ ft}^2) (29.6 \text{ lb/ft}^2) = 14.2 \text{ kip}$$

La demanda de vuelco se reduce en un 25% para el diseño de estabilidad y presión del suelo, según lo permitido por ASCE / SEI 7-16 Sección 12.13.4.

1.3.3.1. Cimentación del pórtico transversal

La carga muerta de la cimentación para un ancho de cimentación de 8 ft se calcula como (5 ft) (38 ft) (8 ft) (0,15 k/ft³) = 228 kip y para la losa de 1 ft se calcula como (1 ft) (38 ft) (8 ft) (0,15 k/ft³) = 45,6 kip, el peso total de la cimentación es 273,6 kip.

Para el cálculo de los resortes laterales del suelo, se tiene la premisa de que la resistencia al cortante en la base de los pórticos es movilizada por todas las zapatas del edificio que actúan juntas e interconectadas por medio de la losa a nivel, por lo tanto, es necesario confirmar este supuesto verificando la capacidad de la losa a nivel y sus conexiones a las zapatas; es posible que se necesiten vigas de amarre además de la losa. Aproximadamente el 90% de la resistencia a cualquier carga lateral de un solo pórtico actúa a través de la losa a nivel; el 10% restante de la resistencia actúa sobre la cara de la zapata del pórtico mediante presión pasiva o en su base mediante fricción. La resistencia resultante actúa en o cerca de la parte superior de la zapata, que es también el punto a partir del cual se define la altura del piso inferior. En consecuencia, las alturas de piso empleadas en los cálculos de vuelco son las mismas que las alturas de piso nominales definidas inicialmente. Los momentos se suman alrededor del punto "A" como se indica en la *Figura 34*.

La demanda de vuelco reducida en cada uno de los cuatro pórticos en la dirección transversal es:

$$M_{or} = (1/4) [(626.7 \text{ kip}) (25 \text{ ft}) + (321.8 \text{ kip}) (12.5 \text{ ft})] (1-0.25) = 3,692 \text{ kip-ft}$$

El momento de resistencia se calcula por separado para cada combinación de carga. La *Tabla 7* muestra la suma de las cargas de gravedad para cada combinación, junto con el momento de resistencia y el factor de seguridad contra vuelco.

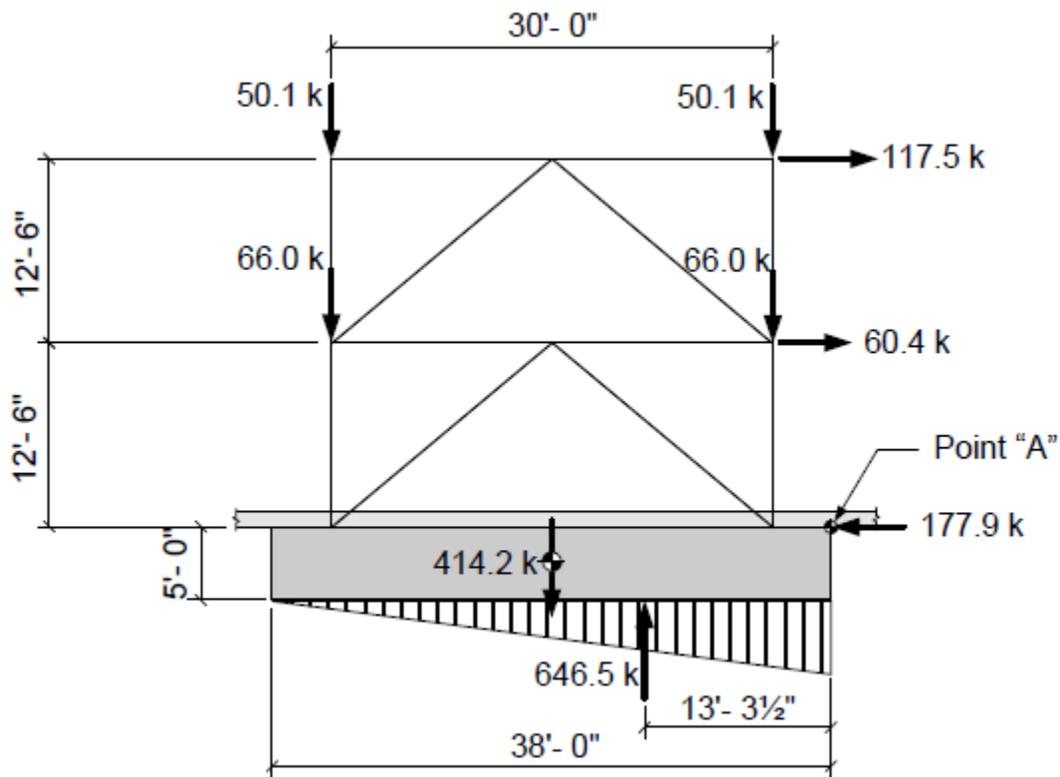
La **Figura 34** muestra un diagrama de cuerpo libre del pórtico transversal y de la cimentación, indicando las demandas de vuelco reducidas en un 25% y las cargas de gravedad máximas en el pórtico.

El peso factorizado de la cimentación se muestra en la, según ASCE/SEI 7-16 Sección 2.3.6 Ecuación 6:

$$P_u = 1.2 + [0.2 (S_{DS} = 1.57)] 273.6 \text{ kip} = 414.2 \text{ kip}$$

Figura 34

Diagrama de cuerpo libre de un pórtico transversal típico que muestra las demandas de vuelco reducidas en un 25% y las cargas de gravedad factorizadas máximas.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 7*Momentos resistentes.*

ASCE/SEI 7-16 Section 2.3.6 Equation	Total Weight (kip)	Resisting Moment (kip-ft)	Factor of Safety Against Overturning
Eq. 6 (Maximum gravity load)	647	12,282	3.3
Eq. 7 (Minimum gravity load)	376	7,141	1.9

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Tabla 8** muestra la distancia resultante desde el final de la zapata hasta el centroide de la reacción del suelo, a , junto con las presiones del suelo máxima y mínima calculadas para cada caso.

El caso de control es la combinación de carga de gravedad máxima, que da como resultado una distribución de la presión del suelo casi triangular, con una presión prácticamente nula en el extremo posterior de la cimentación. La presión máxima es menor que la capacidad de soporte del suelo de diseño ($4.0 \text{ kip/ft}^2 < 4.5 \text{ kip/ft}^2$), por lo que este tamaño de cimentación es aceptable.

Tabla 8*Presiones del suelo.*

ASCE/SEI 7-16 Section 2.3.6 Equation No.	a (ft)	Maximum Soil Pressure (kip/ft ²)	Minimum Soil Pressure (kip/ft ²)
Eq. 6 (Maximum gravity load)	13.3	4.0	0.21
Eq. 7 (Minimum gravity load)	9.2	3.4	0.0

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.3.3.2. Cimentación del pórtico longitudinal

Hay seis pórticos longitudinales y cuatro pórticos transversales que comparten la misma carga sísmica y carga de gravedad, como resultado, los cimientos en el pórtico longitudinal son más estrechos. La longitud y la profundidad de la base se mantienen iguales.

La carga muerta de la cimentación para un ancho de cimentación de 5,5 ft se calcula como $(5 \text{ ft}) (38 \text{ ft}) (5.5 \text{ ft}) (0.15 \text{ kip/ft}^3) = 157 \text{ kip}$. y para un ancho de losa de 1 ft, se calcula como $(1 \text{ ft}) (38 \text{ ft}) (5.5 \text{ ft}) (0.15 \text{ kip/ft}^3) = 31 \text{ kip}$, por lo tanto, el peso total de la cimentación es 188kip.

La demanda de vuelco reducida considerando seis pórticos en la dirección longitudinal es:

$$M_{or} = (1/6) [(626.7 \text{ kip}) (25 \text{ ft}) + (321.8 \text{ kip}) (12.5 \text{ ft})] (1-0.25) = 2,461 \text{ kip-ft}$$

El momento de resistencia de la cimentación se calcula por separado para cada combinación de carga. La **Tabla 9** muestra la suma de las cargas de gravedad para cada combinación, junto con el momento de resistencia y el factor de seguridad contra vuelco.

Tabla 9

Momentos resistentes.

ASCE/SEI 7-16 Section 2.3.6 Equation	Total Weight (kip)	Resisting Moment (kip-ft)	Factor of Safety Against Overturning
Eq. 6 (Maximum gravity load)	517	9,823	4.0
Eq. 7 (Minimum gravity load)	299	5,679	2.3

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Tabla 10** muestra la distancia resultante desde el final de la zapata hasta el centroide de la reacción del suelo, a , junto con las presiones del suelo máxima y mínima calculadas para cada caso.

Tabla 10

Presiones del suelo.

ASCE/SEI 7-16 Section 2.3.6 Equation No.	a (ft)	Maximum Soil Pressure (k/ft ²)	Minimum Soil Pressure (k/ft ²)
Eq. 6 (Maximum gravity load)	14.2	4.3	0.62
Eq. 7 (Minimum gravity load)	10.8	3.4	0.00

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

El caso de control es nuevamente la combinación de carga de gravedad máxima, que da como resultado una distribución de la presión del suelo casi triangular, una presión (levantamiento) muy baja en el extremo posterior de la base. La presión máxima es menor que la capacidad de soporte del suelo de diseño ($4.3 \text{ kip/ft}^2 < 4.5 \text{ kip/ft}^2$), por lo que este tamaño de base más estrecho es aceptable.

1.3.3.3. Análisis modal de base fija

Aunque los análisis de esta sección emplean el método FHE, es necesario calcular los períodos de vibración de la estructura para la condición de base fija, esto permite comparar el comportamiento dinámico de las condiciones de base fija y de base flexible, para lo cual es necesario para calcular el amortiguamiento por radiación.

Las riostras se modelan en ETABS 2016 (CSI, 2016) como miembros rectangulares prismáticos, que se extienden de nodo a nodo, con factores de modificación de rigidez de 1.28 para tener en cuenta una mayor rigidez en los elementos de conexión a los extremos de la riostra.

El análisis modal de base fija da como resultado periodos para los modos primarios de vibración, **0,466s** y **0,459s** debidos al movimiento en la dirección transversal y longitudinal, respectivamente; de modo que la dirección transversal es ligeramente más flexible que la dirección longitudinal. Si bien las áreas de la riostra en las dos direcciones son proporcionales al cortante del piso dividido entre el número de pórticos (redondeado), el tamaño de las columnas son los mismos. Los pórticos longitudinales son efectivamente más rígidos porque hay seis columnas que resisten el vuelco en lugar de cuatro.

1.4. Análisis modal de base fija

Los cálculos de interacción suelo-estructura requieren el análisis del comportamiento del edificio con una base flexible, esto es por dos razones; en primer lugar, es necesario considerar el cambio en el comportamiento dinámico entre las condiciones de base fija y base flexible para calcular la reducción del amortiguamiento por radiación, que dependen de la relación entre los

períodos de base fija y base flexible. En segundo lugar, la Sección 19.1 de ASCE/SEI 7-16 dispone que todos los elementos de una cimentación flexible deben ser considerados para la evaluación de interacción suelo-estructura, esto incluye rigideces horizontal, vertical y rotacional además de la flexibilidad del suelo; con el fin de garantizar la interconexión de la cimentación como una unidad ante una perturbación sísmica.

La Sección 12.13.3 de ASCE/SEI 7-16 establece aumentar y reducir un 50% en los valores de los resortes del suelo para realizar el análisis, esto requiere que los valores máximo y mínimo del resorte se calculen como 1,5 veces y 0,5 veces las mejores estimaciones.

Para el análisis de base flexible, es necesario incluir resortes verticales debajo de cada una de las zapatas corridas que soportan los pórticos arriostrados, así como resortes laterales que representan la resistencia al deslizamiento debido a la presión pasiva en las caras de la cimentación y la fricción en la parte inferior de las zapatas bajo carga por gravedad.

1.4.1. Resortes verticales.

Los resortes verticales del suelo se calculan de acuerdo con la Sección 8.4.2.5 Método 3 de ASCE/SEI 41-17. Este método emplea un resorte uniforme a lo largo de la zapata basado en cierta flexibilidad del elemento de cimentación de concreto en relación con el suelo. El método se considera aplicable porque las zapatas continuas se extienden como voladizos más allá de las columnas del pórtico, lo que produce flexibilidad en la estructura de la cimentación, por ende, la flexibilidad de las zapatas se incluye explícitamente en el modelo.

Los valores del resorte se basan en el módulo de corte del suelo, G , y la relación de Poisson, ν ; estos parámetros pueden ser estimados por el ingeniero geotécnico o determinados de acuerdo con las definiciones en ASCE/SEI 7-16 Sección 19.3.3. Para el propósito de los cálculos de los resortes verticales del suelo, el ingeniero geotécnico ha recomendado el uso de $\nu = 0.3$ y $G = 538$ kip/ft², que se emplean en la Ecuación 8-11 de ASCE/SEI 41-17 para calcular los resortes verticales del suelo.

$$k_{sv} = \frac{1.3G}{B_f(1-\nu)} = \frac{1.3(538 \text{ kip/ft}^2)}{B_f(1-03)} = \frac{1,000}{B_f}$$

(ASCE/SEI 41-17 Eq.8-11)

La intensidad de la rigidez del suelo se expresa como kip/ft^3 , que es la rigidez (kip/ft) por unidad de área (ft^2). Se debe tener en cuenta que en esta formulación la intensidad de rigidez por área está inversamente relacionada con el ancho de la cimentación; a medida que la zapata se ensancha, su intensidad de rigidez disminuye debido a que un mayor volumen de suelo está sujeto a compresión. Como resultado, la intensidad de la rigidez por unidad de longitud es independiente del ancho de la cimentación. Entonces, multiplicando por una unidad de ancho de la zapata, el valor de resorte lineal en kip/ft^2 es el mismo que el valor de resorte por área en kip/ft^3 . El valor unitario del resorte de 1000 kip/ft por pie lineal es el empleado para cualquier ancho de cimentación. Esto se modela en ETABS como un resorte de línea vertical con la rigidez de $1,000/(12)^2 = 6.94 \text{ kip/in}$ por pulgada lineal.

1.4.2. Resortes laterales.

La resistencia lateral del edificio en la base incluye dos componentes: presión pasiva en los lados de las zapatas y fricción en la base de las zapatas. Debido a que el edificio tiene una losa continua a nivel que está conectada a las zapatas del pórtico arriostrado y a las zapatas individuales, se considera que toda la base del edificio actúa como una unidad, de modo que todas las zapatas se movilizan para resistir cargas laterales.

El ingeniero geotécnico ha proporcionado un valor recomendado para la presión pasiva que se puede desarrollar en cada zapata, que es de 1.6 kip/ft^2 , distribuida uniformemente sobre la cara de la zapata que se desarrolla de acuerdo con el desplazamiento relativo de la cara de la zapata y el suelo. Según ASCE/SEI 41-17 Figura 8-6, que se reproduce en la **Figura 35**. La proporción de la presión pasiva última que se desarrolla, P/P_{ult} , es una función de δ/H , donde δ es el desplazamiento lateral y H es la profundidad de la zapata. Esta relación de movilización puede aproximarse mediante la siguiente ecuación, que se ha ajustado a la curva de la figura.

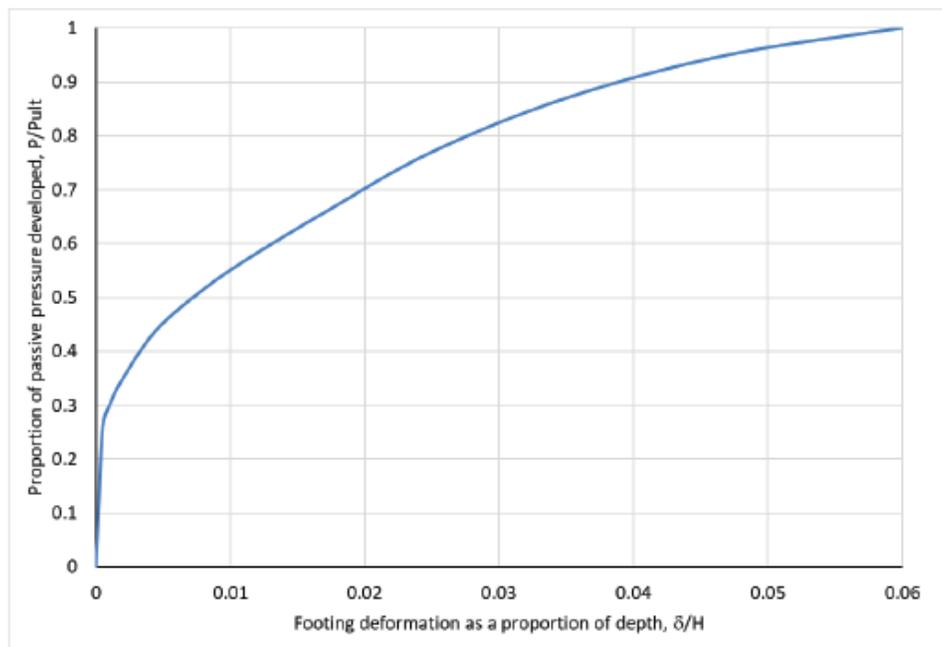
$$\frac{P}{P_{ult}} = 0.15 + 2.88 \left(\frac{\delta}{H} \right)^{0.43}$$

El ingeniero geotécnico también ha proporcionado un coeficiente de fricción de 0,35 que se aplicará a la carga de gravedad en cada zapata, esta fricción se desarrolla con un desplazamiento muy pequeño, en consecuencia, para el propósito de estos cálculos, se supone que la movilización de la fricción ocurre con un desplazamiento cero.

La fricción es proporcional a la carga de gravedad en las zapatas, que puede variar según la combinación de carga seleccionada; dado que los resortes de esta manera desarrollan para las mejores estimaciones, la carga de gravedad utilizada para el análisis se basa en la combinación de carga $D + 0.25L$, donde L es la carga viva no reducida, como se describe en ASCE / SEI 41-17 Sección 7.2.2.

Figura 35

Curva de movilización de presión pasiva.



Nota. Fuente <https://www.asce.org> (ASCE/SEI 41-17, Figura 8-6, 2017).

Debido a la forma de la curva de movilización de presión pasiva, los resortes laterales en la base del edificio no son lineales. Para realizar un análisis lineal de base flexible, se desarrolla una rigidez secante basada en el valor esperado de la resistencia al cortante basal, este no es el cortante basal nominal calculado en la sección 1.3.1, que incluye el factor de modificación de respuesta, R,

por lo tanto, como la resistencia a la presión pasiva no es lineal (y la resistencia a la fricción es efectivamente constante), es apropiado realizar este cálculo en una estimación de la demanda real en lugar de la demanda reducida. ASCE/SEI 7-16 usa el factor de sobrerresistencia, Ω_0 , como un multiplicador de la cortante basal nominal para aproximar la carga sísmica real, en consecuencia, la mejor estimación para la resistencia de la cortante basal se toma como $\Omega_0 V$, que es:

$$(\Omega_0 = 2.5) (V = 949 \text{ kip}) = 2,371 \text{ kip}.$$

La resistencia lateral total se calcula mediante prueba y ajuste para encontrar el desplazamiento que produce la resistencia deseada de 2,371 kip. Para facilitar los cálculos, la **Tabla 11** y **Tabla 12** muestran la resistencia total desarrollada según el tipo de columna, cada columna en los pórticos arriostrados se considera por separado (con cimientos de la mitad de la longitud total). En cada una de estas tablas, la resistencia pasiva para los pórticos paralelos a la carga considera solo una cara pasiva por pórtico (no una por columna), mientras que la presión pasiva desarrollada en las zapatas del pórtico perpendicular a la carga se aplica a la mitad de la longitud de los cimientos en ambas columnas del pórtico.

Tabla 11

Resistencia lateral total: dirección transversal con un desplazamiento de 0,015 in.

Column Type	No. Each	Depth (ft)	Width (ft)	Axial Load (kip)	Friction Each (kip)	Passive Developed Each (kip)	Total Resistance (kip)
Corner	4	2	4	38	13	3	67
Interior	24	3	8	151	53	10	1,500
Transverse Frame friction	8			76	27		213
Transverse Frame passive	4	5	8			15	59
Longitudinal Frame	12	5	19	76	27	35	741
TOTAL							2,580

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 12

Resistencia lateral total: dirección longitudinal con un desplazamiento de 0,035 in

Column Type	No. Each	Depth (ft)	Width (ft)	Axial Load (kip)	Friction Each (kip)	Passive Developed Each (kip)	Total Resistance (kip)
Corner	4	2	4	38	13	4	70
Interior	24	3	8	151	53	12	1541
Transverse Frame	8	5	19	76	27	21	375
Longitudinal Frame friction	12			76	27		319
Longitudinal Frame passive	6	5	5.5			6	71
TOTAL							2,376

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo de la resistencia pasiva en una zapata aislada típica, que tiene 8 ft por 8 ft en planta y 3 ft de profundidad con un desplazamiento de 0,015 in.

$$\text{Resistencia pasiva máxima} = (3 \text{ ft}) (8 \text{ ft}) (1.6 \text{ kip/ft}^2) = 38.4 \text{ kip.}$$

$$\delta/H = 0.015/36 = 0.00042$$

El valor P/P_{ult} se puede calcular de acuerdo con la ecuación de ajuste de la curva anterior de la siguiente manera:

$$\frac{P}{P_{ult}} = 0.15 + 2.88(0.00042)^{0.43} = 0.25$$

$$\text{Presión pasiva desarrollada} = (38.4) (0.25) = 10 \text{ kip}$$

Estos valores de ejemplo están sombreados en la **Tabla 11**.

El desplazamiento total requerido en la dirección transversal es menor que el requerido en la dirección longitudinal, debido al ancho pasivo total más amplio proporcionado por las zapatas del marco longitudinal cuando se empujan perpendicularmente a su longitud.

La rigidez del resorte lateral se calcula como la resistencia total dividida por el desplazamiento en el que se desarrolla. El mejor valor estimado del resorte para la dirección transversal se calcula como $(2,580 \text{ kip}) / (0.015 \text{ in}) = 172,026 \text{ kip/in}$, que se divide por 4 ($43,006 \text{ kip/in}$) este valor se aplica en el modelo en cada esquina de la losa. La rigidez del resorte lateral en la dirección longitudinal se calcula de manera similar.

1.4.3. Análisis modal de base flexible.

Como lo requiere ASCE/SEI 7-16 Sección 12.13.3, se deben realizar un análisis de base flexible que incorporen tres estimaciones para cada resorte, que incluyen un aumento del 50% y una reducción del 50% en los mejores valores estimados del resorte. La **Tabla 13** muestra los valores de rigidez de los resortes empleados en los tres modelos de base flexible.

Tabla 13

Valores de rigidez de los resortes.

Spring	Lower Bound	Best Estimate	Upper Bound
Vertical linear springs	3.47 kip/in/in	6.94 kip/in/in	10.42 kip/in/in
Transverse lateral springs (each building corner)	21,503 kip/in	43,006 kip/in	64,510 kip/in
Longitudinal lateral springs (each building corner)	8,485 kip/in	16,970 kip/in	25,456 kip/in

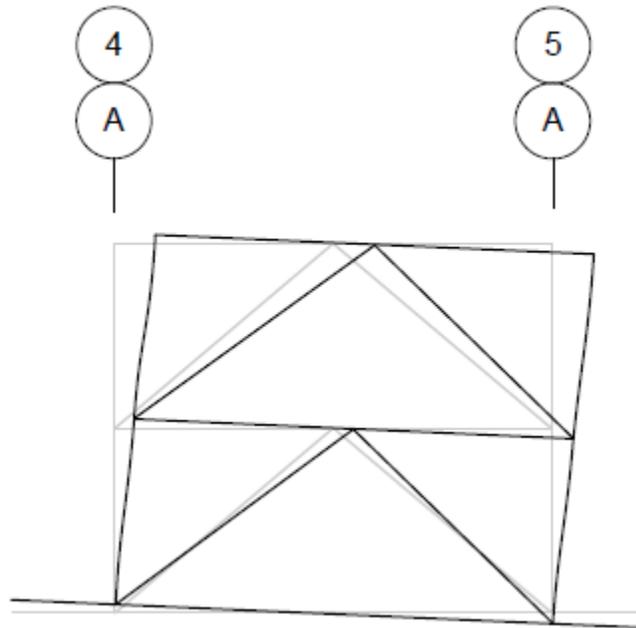
Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Los resortes laterales son muy rígidos y no afectan significativamente el comportamiento, pero los resortes verticales debajo de cada pórtico producen una rotación en el pórtico y su base, lo cual modifica el modo principal de comportamiento.

La **Tabla 14** presenta los modos fundamentales para el modelo de base fija y las tres versiones del modelo de base flexible. La **Figura 36** muestra la forma desplazada del primer modo de un pórtico transversal. Se debe tener en cuenta el desplazamiento vertical de los extremos de las zapatas debido a los resortes verticales de la cimentación.

Figura 36

Forma desplazada de primer modo de un pórtico típico con flexibilidad de cimentación incluida.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 14

Períodos fundamentales para modelos de base fija y flexible.

Model	Transverse first mode period (s)	Longitudinal first mode period (s)
Fixed base (for comparison)	0.466	0.459
Flexible-base upper bound	0.510	0.493
Flexible-base best estimate	0.532	0.509
Flexible-base lower bound	0.592	0.554

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Los períodos del primer modo aumentan un 27% en la dirección transversal y un 21% en la dirección longitudinal entre los modelos de base fija y de base flexible. (nivel más bajo).

1.5. Amortiguamiento de la cimentación.

Con los análisis completos, se calculan las reducciones de interacción suelo-estructura debidas al amortiguamiento de la cimentación. Hay dos categorías de amortiguamiento a considerar: amortiguamiento histerético del suelo y amortiguamiento por radiación. Se debe tener en cuenta que el amortiguamiento de la cimentación no está permitido según ASCE/SEI 7-16 Sección 19.3.1.1 cuando el sistema de cimentación consta de zapatas aisladas que (1) no están interconectadas y (2) el espaciamiento es menor a la dimensión mayor del elemento resistente a la fuerza lateral soportado en la dirección considerada.

En este edificio de ejemplo, la losa a nivel se refuerza, se aumenta su espesor y se conecta a las zapatas como se muestra en la **Figura 33**; se considera que esto proporciona suficiente interconectividad para que todos los elementos que componen la base se muevan juntos; así, el amortiguamiento en la cimentación es permitida. Sin embargo, si las zapatas no estuvieran interconectadas, estarían demasiado espaciadas para usar las disposiciones de amortiguamiento de la cimentación, dado que los pórticos arriostrados tienen una luz de 30'0" y las zapatas corridas que los soportan tienen una longitud de 38'0", dejando un espacio de 22'0" entre zapatas; a continuación, se ilustran las disposiciones de amortiguamiento de la cimentación, no obstante, se ignoran estos cálculos de espaciamiento.

1.5.1. Amortiguamiento histerético del suelo.

Este efecto depende únicamente de la clasificación del sitio y del valor de S_{DS} para el sitio. El valor aplicable se toma directamente de ASCE/SEI 7-16 Tabla 19.3.3. Para la clase de sitio D, los valores tabulados para el amortiguamiento histerético de suelo son: 0.07 para $S_{DS}/2.5 = 0.4$ y 0.15 para $S_{DS}/2.5 = 0.8$, dado que este sitio tiene un S_{DS} de 1.57, este valor se interpola y se obtiene como resultado un $S_{DS}/2.5$ igual a 0.628, con todo esto, la relación de amortiguamiento histerético del suelo, β_s , es 0.116.

1.5.2. Amortiguamiento por radiación.

El amortiguamiento por radiación es considerablemente más complejo. La densidad del suelo y la velocidad de la onda de corte del sitio de análisis son los parámetros de entradas iniciales. Se debe tener en cuenta que la velocidad de la onda de corte en este cálculo no es \bar{v}_s (valor utilizado para determinar la clasificación del sitio); para este cálculo se considera la capa superior del suelo sobre una profundidad B, donde B es la mitad del ancho de la base en análisis.

El uso de \bar{v}_s para determinar la clasificación del sitio tiene el propósito de considerar la rigidez promedio del suelo en los 100 ft (30 m) superiores; ahora bien, el uso de v_s para la capa superior del suelo tiene el propósito de capturar los efectos de los suelos en las capas superiores que afectan directamente el amortiguamiento en la interfaz suelo-estructura.

La **Figura 29** muestra que la densidad del suelo en los estratos superiores, γ , es de 120 a 125 lb/ft³. Para este análisis se usa un valor promedio de 122,5 lb/ft³: Se escala la velocidad de la onda de corte del perfil v_{s0} de la **Figura 29**, lo cual, da como resultado 653 ft/s. Luego se usa la tabla 19.3-1 de ASCE/SEI 7-16 para calcular la velocidad de onda de corte efectiva, v_s . El factor de modificación de la velocidad de corte efectiva se interpola de manera similar a la utilizada para determinar la relación de amortiguamiento histerético del suelo, esto da 0.488, lo que da como resultado una velocidad de onda de corte efectiva v_s de 319 ft/s.

El módulo de corte del suelo a niveles de deformación pequeños, G_0 , se calcula como:

$$G_0 = \gamma \frac{V_{s0}^2}{g} = 1,624 \text{ kip/ft}^2$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

La tabla 19.3-2 de ASCE/SEI 7-16 se usa para calcular el módulo de corte efectivo, G; el factor de modificación se interpola de una manera similar a la utilizada para la relación de amortiguamiento histerético del suelo, así se obtiene un factor de modificación de 0.272, lo cual da como resultado un módulo de corte efectivo, G, de 442 kip/ft², esto es levemente más bajo que el valor recomendado por el ingeniero geotécnico para el cálculo del resorte vertical del suelo.

Dado que la cimentación se comporta de forma independiente, se calcula el amortiguamiento por radiación para un pórtico en cada dirección; para la dirección transversal, las dimensiones del plano de cimentación son: $2L = 38$ ft por $2B = 8$ ft. La relación dimensional L/B es 4.75.

La razón de alargamiento del período es \tilde{T}/T donde \tilde{T} es el período de base flexible y T es el período de base fija. El valor de \tilde{T}/T se calcula como $0,532/0,466 = 1,142$, luego se calcula la relación de alargamiento del período efectivo, que depende de la ductilidad del sistema, μ . ASCE/SEI 7-16 indica en la definición de que μ puede tomarse como la relación entre el factor de modificación de la respuesta, R y el factor de sobrerresistencia, Ω_0 , que es $8/2,5 = 3,2$. Así, la razón de alargamiento del período efectivo se calcula de acuerdo con ASCE/SEI7-16 :

$$\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right) = \left\{1 + \frac{1}{\mu} \left(\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^2 - 1 \right)\right\}^{0.5} = 1.046$$

(ASCE/SEI 7 - 16 Eq.19.3 - 2)

La rigidez de traslación, K_y , y la rigidez de rotación, K_{xx} , se calculan de acuerdo con las ecuaciones 19.3-8 y 19.3-9 de ASCE / SEI 7-16, respectivamente; ν es la relación de Poisson, tomada como 0.3 para suelo arenoso, de acuerdo con las definiciones en ASCE/SEI 7-16 Sección 19.3. Se debe tener en cuenta que estas ecuaciones de rigidez son específicas para los cálculos de amortiguamiento por radiación. La geometría y la dirección del movimiento implícitas en estas ecuaciones se basan en el movimiento del eje débil de una base rectangular, que en este caso da como resultado una evaluación conservadora del amortiguamiento, estas ecuaciones de rigidez no están directamente relacionadas con la rigidez de los análisis estructurales en ETABS.

$$K_y = \frac{GB}{2 - \nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B}\right) + 1.6 \right] = 2.506 \times 10^7 \text{ lb/ft}^2$$

(ASCE/SEI 7 - 16 Eq. 19.3 - 8)

$$K_{xx} = \frac{GB^3}{1 - \nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B}\right) + 0.8 \right] = 6.46 \times 10^8 \text{ ft - lb/rad}$$

(ASCE/SEI 7 - 16 Eq. 19.3 - 9)

Para calcular los valores de amortiguamiento, se calculan tres constantes adimensionales, a_0 , Ψ y α_{xx} , de acuerdo con las ecuaciones 19.3-11, 19.3-13 y 19.3-14 de ASCE/SEI 7-16, respectivamente.

$$a_0 = \frac{2\pi B}{\check{T}v_s} = 0.148$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 11)

$$\Psi = \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}} = 1.871$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 13)

Ψ no debe exceder de 2.5:

$$\alpha_{xx} = 1.0 - \left[\frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{(L/B) - 1}\right)}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right] = 0.995$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 14)

El período de traslación fundamental y el período de rotación fundamental del sistema de amortiguamiento se calculan en función de la rigidez calculada, la masa modal efectiva, M^* , y la altura efectiva de la estructura, h^* . La masa modal efectiva, M^* , es la masa sísmica del edificio, multiplicada por el primer factor de participación de masa modal (en este caso, 0,87), dividido por el número de pórticos en la dirección considerada (4). El factor de participación de masa modal expresa la proporción de la masa total excitada en el primer modo fundamental de vibración, esto, se puede encontrar en los resultados modales de ETABS (o un programa de análisis similar).

En este caso, $M^* = 3,26 \times 104 \text{ lb} - \text{sec}^2/\text{ft}$. La altura efectiva de la estructura, h^* , se calcula a partir de la forma desplazada del primer modo o se puede tomar como 0,7 veces la altura del edificio. Un cálculo más explícito basado en la forma real del primer modo da como resultado 0,68 veces la altura del edificio, 16,92 ft.

La forma del primer modo para este edificio de dos pisos se define mediante dos puntos, los desplazamientos laterales del segundo piso y del techo en el primer modo, con cada desplazamiento considerado a la altura del diafragma asociado.

Para el edificio de dos pisos, la altura efectiva se puede calcular de la siguiente manera:

$$h^* = \frac{\left(\frac{2}{3}h_2 + h_1\right)\left(\frac{(\delta_2 - \delta_1)}{2}h_2\right) + \left(\frac{h_2}{2} + h_1\right)(\delta_1 h_2) + \left(\frac{2}{3}h_1\right)\left(\frac{\delta_1}{2}h_1\right)}{\frac{\delta_1 h_1}{2} + \frac{(\delta_1 - \delta_2)h_2}{2}}$$

$$h^* = 16.92 \text{ ft}$$

Donde h_1 y h_2 son las alturas del primer y segundo piso, y δ_1 y δ_2 son los desplazamientos laterales del segundo piso y del techo en el primer modo, que en este caso son 0.48 y 1.0 respectivamente. El período de traslación, T_y , y el período de rotación, T_{xx} , se calculan luego de acuerdo con las ecuaciones 19.3-6 y 19.3-7 de ASCE/SEI 7-16, como se presenta a continuación. Se debe tener en cuenta que estos valores son particulares de los cálculos de amortiguamiento por radiación y no están directamente relacionados con los períodos a considerar en los análisis estructurales.

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{M^*}{K_y}} = 0.227 \text{ sec}$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 6)

$$T_{xx} = 2\pi \sqrt{\frac{M^* h^{*2}}{\alpha_{xx} K_{xx}}} = 0.757 \text{ sec}$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 7)

El coeficiente de amortiguamiento traslacional, β_y el coeficiente de amortiguamiento rotacional, β_{xx} , se calculan de acuerdo con las ecuaciones 19.3-10 y 19.3-12 de ASCE/SEI 7-16, de la siguiente manera:

$$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{K_y/GB} \right] \left[\frac{a_0}{2} \right] = 0.099$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 10)

$$\beta_{xx} = \frac{(4\Psi/3)(L/B)a_0^2}{\left(\frac{k_{xx}}{GB^3}\right) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2 \right]} \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right] = 3.827 \times 10^{-4}$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 12)

El amortiguamiento traslacional es un efecto mucho más significativo que el amortiguamiento rotacional ($\beta_y = 0.099 > \beta_{xx} = 3.287 \times 10^{-4}$), aunque el comportamiento elástico del edificio se ve afectado más significativamente por la rotación. La relación de amortiguamiento por radiación, β_{rd} , se calcula de acuerdo con la ecuación 19.3-5 de ASCE/SEI 7-16, así:

$$\beta_{rd} = \frac{1}{(\tilde{T}/T_y)^2} \beta_y + \frac{1}{(\tilde{T}/T_{xx})^2} \beta_{xx}$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 5)

A continuación, se calcula la relación de amortiguamiento de la cimentación, β_f , que incluye el amortiguamiento por radiación y se calcula de acuerdo con la ecuación 19.3-4 de ASCE/SEI 7-16, y la relación de amortiguamiento efectiva, β_0 , se calcula de acuerdo con ASCE/SEI 7-16 Ecuación 19.3-1.

$$\beta_f = \left[\frac{(\tilde{T}/T_y)^2 - 1}{(\tilde{T}/T_y)^2} \right] \beta_s + \beta_{rd} = 0.046$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 4)

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{\beta}{(\tilde{T}/T)^2} = 0.091$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.3 – 1)

β_0 no debe exceder de 0.2

Donde:

β es el índice de amortiguamiento viscoso efectivo de la estructura, tomado como 5% como se recomienda en ASCE/SEI 7 y \tilde{T}/T es la relación de alargamiento del período efectivo.

1.5.3. Ajuste al cortante basal.

Una vez calculada la relación de amortiguamiento efectiva, se calcula el factor de ajuste de respuesta, B_{SSI} , que se calcula a partir de la ecuación 19.2-4 de ASCE/SEI 7-16. La reducción en el cortante basal, ΔV , se calcula a partir de la ecuación 19.2-2 de ASCE/SEI 7-16, y el ajuste al cortante basal a partir de la ecuación 19.2-1 de ASCE/SEI 7-16

$$\beta_{ssi} = \frac{4}{[5.6 - \ln(100\beta_0)]} = 1.181$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq.19.2 – 4)

Para facilitar la comparación de los resultados, se calcula la reducción en el coeficiente de respuesta sísmica, ΔC_s , en lugar de calcular la reducción en el cortante basal, ΔV .

$$\Delta C_s = C_s - \frac{\tilde{C}_s}{B_{SSI}} = 0.196 - \frac{0.196}{1.181} = 0.196 - 0.166 = 0.03$$

(Modificada de ASCE/SEI 7 – 16 Eq.19.2 – 2)

Donde el C_s es el coeficiente de respuesta de base fija, y \tilde{C}_s es el valor del coeficiente de respuesta de base flexible. En este caso, el valor es el mismo que el calculado en el período de base fija, ya que todos los períodos fundamentales están dentro de la región de la parte superior plana (aceleración controlada) del espectro de respuesta.

En consecuencia, el valor actualizado de C_s se calcula como $0,196 - 0,03 = 0,166$. Este valor es el 87% de 0.196, valor presentado en el cap. 12 de ASCE/SEI 7-16. Las reducciones de C_s se calculan de forma similar para las otras direcciones y valores de rigidez, como se indica en la **Tabla 15**.

Tabla 15

Tabulación de la respuesta sísmica reducida.

Model	C_s Transverse (g)	C_s Longitudinal (g)
Fixed base (for comparison)	0.196	
Upper bound springs	0.168	0.175
Best estimate springs	0.166	0.172
Lower bound springs	0.162	0.167

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.5.4. Ajuste al cortante basal según el límite dado por el código.

El valor más grande de C_s calculado se utiliza como límite superior para los resortes del suelo en la dirección longitudinal, que es 0.175g. En la dirección transversal, el valor máximo es 0,168 g. ASCE/SEI 7-16 La Sección 19.2.1 establece una limitación a la reducción de la demanda para estructuras con factores de R mayores o iguales a 6, el coeficiente de respuesta ajustado debe ser al menos el 90% del valor ASCE/SEI 7-16 Cap. 12: $(0.9) (0.196g) = 0.177g$.

1.6. Diseño para reducir el cortante basal según ASCE / SEI 7-16 Cap.19

Para calcular el cortante basal reducido, la estructura se rediseña empleando las fuerzas de diseño más bajas, lo cual da como resultado áreas de refuerzo más pequeñas y cimientos más estrechos, después de este rediseño, se vuelven a calcular las reducciones según el coeficiente de respuesta sísmica para compararlo con el punto de partida de 0,177. Si el valor resultante es menor que este valor, los tamaños reducidos siguen siendo aplicables. Si el coeficiente de respuesta sísmica resultante es mayor que 0,177, se requiere una iteración adicional con el coeficiente más grande y los tamaños resultantes más grandes.

1.6.1. Diseño de riostras.

Las áreas de las riostras se calculan de la misma manera que en la Sección 1.3.2 . La *Tabla 16* y *Tabla 17* muestran los tamaños de riostra requeridos para las demandas sísmicas reducidas.

Los tamaños de las columnas permanecen sin cambios, ya que eran las secciones compactas W10 más pequeñas disponibles.

Tabla 16

Áreas centrales de la riostra transversal.

Level	Number of braces	Brace Force (kip)	Computed Core Area (in ²)	Specified Core Area (in ²)
Below roof	8	92	2.69	2.75
Below second floor	8	139	4.07	4.25

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 17

Áreas centrales de la riostra longitudinal.

Level	Number of braces	Brace Force (kip)	Computed Core Area (in ²)	Specified Core Area (in ²)
Below Roof	12	61	1.79	2.00
Below Second Floor	12	93	2.71	2.75

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

En general, las áreas de los arriostramientos se reducen en proporción aproximada a la demanda sísmica. Sin embargo, debido al redondeo, los arriostramientos debajo del techo en la dirección longitudinal siguen siendo del mismo tamaño.

1.6.2. Diseño de la cimentación.

Con las demandas reducidas, el momento de vuelco se reduce, pero la carga de gravedad sigue siendo la misma, por lo que el efecto sobre los tamaños de los cimientos no es una reducción lineal. Los tamaños de los cimientos se determinan de la misma manera que en la Sección 1.3.3.

Las longitudes y profundidades de los cimientos siguen siendo las mismas, por medio de prueba y ajuste se reduce el ancho de 8 ft a 7 ft para el pórtico transversal y de 5,5 ft a 4 ft para el pórtico longitudinal. Estos anchos reducidos son los tamaños mínimos (redondeados al medio pie más cercano) que producen presiones de suelo aceptables.

1.6.3. Análisis modal de base fija.

Los tamaños de riostra más pequeños dan como resultado una estructura más flexible. El período modal primario en la dirección transversal aumenta de 0,466 s a 0,489 s. El período modal primario en la dirección longitudinal aumenta de 0,459 s a 0,483 s.

1.6.4. Análisis modal de base flexible.

Los resortes lineales verticales no dependen del ancho de la zapata, por lo que esos valores no cambian con las cimentaciones más estrechas. Los valores del resorte lateral incluyen la presión pasiva, que depende de los tamaños de los cimientos, pero los anchos de los cimientos del pórtico no son significativos. Sin embargo, el cortante en la base es menor y esto afecta las propiedades del resorte lateral al reducir el desplazamiento anticipado. La **Tabla 18** muestra los valores actualizados usados en el análisis de base flexible.

Tabla 18

Valores actualizados de rigidez de los resortes.

Spring	Lower Bound	Best Estimate	Upper Bound
Vertical linear springs	3.47 kip/in/in (unchanged)	6.94 kip/in/in (unchanged)	10.42 kip/in/in (unchanged)
Transverse lateral springs (each building corner)	32,079 kip/in	64,158 kip/in	96,238 kip/in
Longitudinal lateral springs (each building corner)	21,406 kip/in	42,811 kip/in	64,217 kip/in

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

La **Tabla 19** muestra los períodos fundamentales actualizados usados en el análisis de base flexible.

Tabla 19

Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible.

Model	Transverse first mode period (s)	Longitudinal first mode period (s)
Fixed base (for comparison)	0.489	0.483
Flexible-base upper bound	0.531	0.515
Flexible-base best estimate	0.552	0.530
Flexible-base lower bound	0.610	0.573

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.6.5. Análisis del cortante basal.

Con base en los tamaños de los cimientos actualizados y las propiedades dinámicas, se vuelve a calcular las propiedades de amortiguamiento y el coeficiente de respuesta sísmica resultante utilizando el mismo enfoque descrito en la Sección 1.5.3 . Los coeficientes de respuesta sísmica resultantes se muestran en la **Tabla 20**.

Tabla 20

Tabulación de la respuesta sísmica reducida.

Model	Reduced C_r Transverse (g)	Reduced C_r Longitudinal (g)
Upper bound springs	0.171	0.177
Best estimate springs	0.171	0.175
Lower bound springs	0.164	0.169

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

El valor más alto del coeficiente de respuesta sísmica calculado con los tamaños de riostra reducidos y los anchos de cimentación reducidos es el mismo que el valor inicial de 0.177g, lo que indica que no se requiere más iteración y que el diseño que incluye la interacción suelo-estructura es aceptable.

1.7. Diseño alternativo para determinar la cortante basal con ISE-reducido

Esta sección presenta la extensión de las reducciones en las cargas de diseño más allá de las permitidas por ASCE/SEI 7-16. Esto permite mayores reducciones debido al amortiguamiento de los cimientos, así como, una reducción adicional debido a la presencia de una losa de cimentación, que no está permitido por ASCE/SEI 7-16. para análisis lineales.

1.7.1. Losa de cimentación.

El promedio de una losa de cimentación es un efecto que aborda la incoherencia de los movimientos del suelo sobre la base de un edificio. Si la base del edificio es lo suficientemente grande y el sistema de cimentación tiene suficiente interconexión y rigidez lateral, se reducirá el efecto de los movimientos del suelo por terremotos. Este efecto es más pronunciado para edificios con períodos de vibración más cortos y para aquellos con extensiones de base más grandes. Estas dos cantidades por sí solas determinan la reducción debida al promedio de la losa de cimentación, denominada RRS_{bsa} . El tamaño efectivo de la base, b_e , depende del área de la base del edificio A_{base} , que es la extensión de la losa a nivel del suelo.

$$A_{base} = (150ft)(210ft) = 31,500 ft^2$$

$$b_e = \sqrt{A_{base}} = 177 ft$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq.19.4 – 4)

El valor calculado de b_e no debe exceder los 260 ft. ASCE/EI 7-16 requiere que la velocidad de la onda de corte del suelo, v_s , esté en el rango de 650 a 1,650 ft/s, en este caso, v_s se toma como el valor promedio sobre una profundidad igual al tamaño efectivo de la base, b_e . Como se puede observar en la **Figura 29**, la velocidad media de onda cortante para este sitio está claramente dentro del rango establecido.

La reducción debida al promedio de la losa de cimentación depende de b_e y del período de la estructura, la reducción se calcula de acuerdo con las ecuaciones 19.4-1, 19.4-2 y 19.4-3 de ASCE/SEI 7-16, los valores que se muestran a continuación pertenecen al período de base flexible en la dirección transversal para la mejor estimación de los resortes del suelo ($T = 0.532$ s).

$$b_0 = 0.00071 \left(\frac{b_e}{T} \right) = 0.236$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.4 – 3)

El período, T , no debe ser inferior a 0,2 s. ASCE/SEI 7-16 La ecuación 19.4-2 para B_{bsa} presenta dos formas de cálculo dependiendo del valor de b_0 .

La primera forma (para $b_0 \leq 1$) es aplicable:

$$B_{bsa} = 1 + b_0^2 + b_0^4 + \frac{b_0^6}{2} + \frac{b_0^8}{4} + \frac{b_0^{10}}{12} = 1.06$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.4 – 3(a))

La segunda forma (para $b_0 > 1$) es aplicable:

$$B_{bsa} = \exp(2b_0^2) \left[\frac{1}{\sqrt{\pi b_0}} \left(1 - \frac{1}{16b_0^2} \right) \right]$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.4 – 2(b))

La reducción es calculada como sigue:

$$RRS_{bsa} = 0.25 + 0.75 \left\{ \frac{1}{b_0^2} \left[1 - (\exp(-2b_0^2)) B_{bsa} \right] \right\} = 0.98$$

(ASCE/SEI 7 – 16 Eq. 19.4 – 1)

Esta reducción se aplica al valor de C_s de 0.166g, valor deducido en la Sección **1.5.3**; por lo tanto, el valor actualizado de C_s es $(0,98) (0,166 \text{ g}) = 0,163 \text{ g}$. La **Tabla 21** presenta los valores de C_s para cada dirección y para cada estimación de resorte del suelo con y sin la reducción por el promedio de la losa de cimentación. (BSA)

Tabla 21

Tabulación de la respuesta sísmica reducida con y sin promedio de la losa de cimentación.

Model	C_s Transverse (No BSA) (g)	C_s Transverse (w/ BSA) (g)	C_s Longitudinal (No BSA) (g)	C_s Longitudinal (w/ BSA) (g)
Fixed base (for comparison)	0.196			
Upper bound springs	0.168	0.164	0.175	0.164
Best estimate springs	0.166	0.163	0.172	0.164
Lower bound springs	0.162	0.159	0.167	0.159

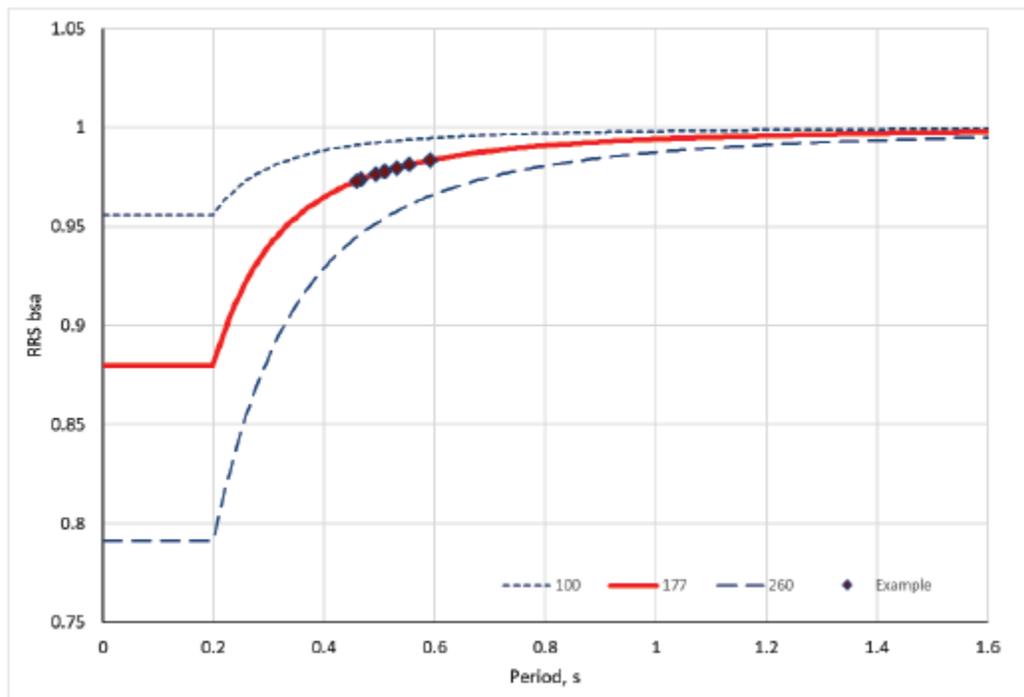
Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Cabe notar que las reducciones debidas al promedio de la losa de cimentación son más significativas en la dirección longitudinal, debido a los períodos más cortos, así mismo, las estimaciones del resorte en el límite superior dan como resultado los valores más altos de C_s , 0,164 g.

La **Figura 37** muestra las reducciones por el promedio de la losa de cimentación para tres valores de b_e : 100 ft, 177 ft (este ejemplo) y 260 ft (máximo permitido). Se debe tener en cuenta que las reducciones se limitan a los valores calculados en períodos de 0,2 s.

Figura 37

Reducciones por el promedio de la losa de cimentación en relación con el período de la estructura para tres valores de tamaño efectivo de cimentación.



Nota. Fuente <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

En la sección anterior se rediseñó la estructura empleando las fuerzas de diseño más bajas, donde se obtuvo áreas de riostra más pequeñas y cimientos más estrechos, por consiguiente en este caso de análisis se vuelven a calcular las reducciones en el coeficiente de respuesta sísmica para comparar con el punto de partida de 0,164 g; si el valor resultante es menor que este valor, los tamaños reducidos siguen siendo aplicables, si el coeficiente de respuesta sísmica resultante es mayor que 0,164 g, se requiere una iteración adicional con el coeficiente más grande y los tamaños resultantes más grandes.

1.7.2. Diseño de riostras.

Las áreas de las riostras se calculan de la misma manera que en la Sección 1.3.2. La *Tabla 21* y *Tabla 22* muestran los tamaños de riostra requeridos para las demandas sísmicas reducidas, con los tamaños originales (no reducidos) y los tamaños reducidos limitados por el código, los cuales se muestran para comparación.

En general, las áreas de arriostamiento se reducen en proporción aproximada a la demanda sísmica, sin embargo, debido al redondeo, los tirantes debajo del segundo piso en la dirección longitudinal siguen siendo del mismo tamaño.

Tabla 22

Áreas centrales de la riostra transversal.

Level	Unreduced Core Area (in ²)	Code-Limited Reduced Core Area (in ²)	Fully Reduced Core Area (in ²)
Below Roof	3.00	2.75	2.50
Below Second Floor	4.25	4.25	4.00

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Tabla 23

Áreas centrales de la riostra longitudinal.

Level	Unreduced Core Area (in ²)	Code-Limited Reduced Core Area (in ²)	Fully Reduced Core Area (in ²)
Below Roof	2.00	2.00	1.75
Below Second Floor	3.25	2.75	2.75

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.7.3. Diseño de la cimentación.

Con las demandas reducidas, el momento de vuelco se reduce, pero la carga de gravedad sigue siendo la misma, por lo que el efecto sobre los tamaños de los cimientos no es una reducción lineal. Los tamaños de los cimientos se determinan de la misma manera que en las secciones anteriores, las dimensiones en planta de la cimentación siguen siendo las mismas que las calculadas en la Sección 1.3.3 para las reducciones limitadas por el código, las profundidades de los cimientos se reducen de 5 ft a 4 ft.

1.7.4. Análisis modal de base fija.

Las dimensiones más pequeñas en las riostras dan como resultado una estructura más liviana. El período modal primario en la dirección transversal aumenta aún más desde 0.489s. a 0,506s, así mismo, el período modal primario en la dirección longitudinal aumenta aún más de 0,483s a 0,496s.

1.7.5. Análisis modal de base flexible.

Los valores del resorte lateral se ajustan nuevamente en función del cortante basal más bajo y al desplazamiento anticipado más bajo resultante. La **Tabla 24** muestra los períodos fundamentales actualizados de base flexible.

Tabla 24

Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible.

Model	Transverse first mode period (s)	Longitudinal first mode period (s)
Fixed base (for comparison)	0.506	0.496
Flexible-base upper bound	0.545	0.524
Flexible-base best estimate	0.564	0.538
Flexible-base lower bound	0.618	0.577

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.7.6. Comprobación del cortante basal.

El coeficiente de respuesta sísmica se vuelve a calcular en función de las propiedades dinámicas actualizadas, utilizando el mismo enfoque descrito anteriormente, los coeficientes de respuesta sísmica resultantes se muestran en la **Tabla 25**.

Tabla 25

Tabulación de la respuesta sísmica reducida.

Model	Reduced C_s Transverse (g)	Reduced C_s Longitudinal (g)
Upper bound springs	0.169	0.168
Best estimate springs	0.167	0.166
Lower bound springs	0.163	0.162

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Los valores más altos de los coeficientes de respuesta sísmica calculados son 0,168 g y 0,169 g, en comparación con el valor inicial de 0,164 g, indica que la estructura diseñada para las cargas totalmente reducidas ya no produce la misma cantidad de reducción de cargas, en consecuencia, se requiere un rediseño utilizando las cargas calculadas más altas.

1.7.7. Rediseño (iteración).

Los elementos estructurales afectados se rediseñaron para el valor más alto de $C_s = 0.169g$. Se requieren pequeños cambios en algunos elementos del diseño, estos son, un aumento en el tamaño de la riostra transversal debajo del techo a 2.75 in² y un aumento en la profundidad de la cimentación transversal a 5 ft. (Estos son los mismos valores usados en la sección 1.6

1.7.8. Reanálisis.

Los modelos de base fija y de base flexible se vuelven a analizar incorporando el diseño actualizado, los períodos en la dirección longitudinal se mantienen esencialmente sin cambios, ya que las modificaciones de diseño no afectaron a estos pórticos. La **Tabla 26** muestra las propiedades dinámicas actualizadas.

Tabla 26

Períodos fundamentales actualizados para modelos de base fija y de base flexible.

Model	Transverse first mode period (s)	Longitudinal first mode period (s)
Fixed base (for comparison)	0.498	0.496
Flexible-base upper bound	0.537	0.524
Flexible-base best estimate	0.556	0.538
Flexible-base lower bound	0.611	0.578

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

1.7.9. Comprobación del cortante basal.

El coeficiente de respuesta sísmica se calcula en función de las propiedades dinámicas actualizadas utilizando el mismo enfoque descrito anteriormente, los coeficientes de respuesta sísmica resultantes se muestran en la *Tabla 27*.

Tabla 27

Tabulación de la respuesta sísmica reducida.

Model	Reduced C_s Transverse (g)	Reduced C_s Longitudinal (g)
Upper bound springs	0.168	0.168
Best estimate springs	0.166	0.166
Lower bound springs	0.162	0.162

Fuente. <https://www.fema.gov> (FEMA P-2091, A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, 2020).

Los valores más altos de los coeficientes de respuesta sísmica calculados son 0,168 g, ligeramente más bajos que el valor inicial de 0,169 g, esto indica que la estructura modificada produce la misma cantidad de reducción de cargas que las utilizadas en el cálculo de los tamaños de los elementos estructurales y los cimientos. Por lo tanto, este diseño es internamente consistente, aunque no está permitido por ASCE/SEI 7, ya que incluye reducciones por el promedio de la losa de cimentación con el procedimiento FHE y no considera la limitación en la reducción por las fuerzas de diseño.

(FEMA, 2020) y (Garbellini & Laloui, 2021)