

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DINÁMICA
SUELO – ESTRUCTURA EN PUENTES DE HORMIGÓN BASADO EN
EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Autora: Vanesa Carballo García

HOLGUÍN 2022



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN DINÁMICA
SUELO – ESTRUCTURA EN PUENTES DE HORMIGÓN BASADO EN
EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Autora: Vanesa Carballo García

Tutora: MsC. Ing. Vivian Hernández Columbié, pa

HOLGUÍN 2022



PENSAMIENTO

“Una idea solo vale cuando aparece quien tenga la
energía y habilidad para hacerla fructificar”

William Felhey

DEDICATORIA

A mi Señor Jesús, esposo, familiares y amigos. A mi guerrera, mi abuela Nancy, por la cual estoy donde estoy el día de hoy. A mi madre que se ha dejado la piel para que me sirviera de abrigo. A mi padre que ha sido mi amigo y mi guía en cada batalla.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero agradecer desde lo más profundo de mi corazón a mi Señor y Dios por su eterno amor, por llenarme cada día de favores y misericordias, por abrirme puertas y por quien gozo de la compañía de personas tan especiales.

Quiero agradecer a cada uno de mis familiares, de manera especial a mi abuela, que a pesar de no estar ya conmigo, es la merecedora de todas mis victorias.

A mis padres, que han dedicado su vida a la difícil tarea de formar una mujer de bien y su apoyo incondicional en todo tiempo.

A mi esposo José Alejandro, quien con tanto amor y paciencia me ha soportado y acompañado en esta lucha.

A mi familia, porque siempre hemos celebrados unos las victorias de los demás.

A mi tutora Vivian, por su dedicación y paciencia, verdaderamente sin su ayuda esta victoria no habría sido posible.

A todos aquellos profesores de la universidad que de una manera u otra prestaron su ayuda y dedicaron parte de su preciado tiempo a mi desarrollo como profesional.

A mis amigos incondicionales: Betty, Yaris, Lenia, Nani, Luis, Laura, Ivett, Mary, Eduardo y otros que, si los mencionara necesitaría tomos enteros. A todos, gracias por su amistad y oraciones.

¡Qué gran privilegio contar con personas tan especiales como ustedes, los llevo en el corazón!

A todas las personas que mostraron su apoyo y buena disposición a lo largo de la investigación.

¡Este triunfo es de todos ustedes!

RESUMEN

Los puentes son estructuras de vital importancia que garantizan la conectividad con lugares inaccesibles por sus características geográficas. Estos pueden llegar a ser más susceptibles a los efectos de la interacción suelo - estructura que otro tipo de obra. Su falla puede causar importantes pérdidas, por lo que es imprescindible que mantengan su integridad ante la acción de fenómenos naturales como los sismos.

En el presente trabajo se realiza un análisis de la interacción dinámica suelo – estructura en puentes de hormigón. Para ello se emplea el Método de Elementos Finitos a través de los softwares Midas Civil y Midas GTS NX. Se plantea un procedimiento para la integración de ambos programas. Se aplica al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas. Se realiza una comparación entre el análisis sin considerar la interacción suelo – estructura, y considerándola empleando el Método del Coeficiente de Balasto y el Método de Elementos Finitos. El desarrollo del estudio dinámico lineal, dinámico no lineal incorporando la rigidez del suelo y modelando la obra y el emplazamiento como un todo, reporta un incremento de las fuerzas axiales para este último. Con la sollicitación de momento y el cortante existen variaciones significativas. Las deformaciones y rotaciones son superiores en el caso que considera la estructura y el suelo como un conjunto, con respecto a los demás, esto se debe a un aumento en la flexibilidad del sistema.

ABSTRACT

Bridges are structures of vital importance that guarantee connectivity with places that are inaccessible due to their geographical characteristics. These can become more susceptible to the effects of soil-structure interaction than other types of works. Their failure can cause significant losses, so it is essential that they maintain their integrity against the action of natural phenomena such as earthquakes.

In the present work, an analysis of the soil-structure interaction in concrete bridges is carried out. For this, the Finite Element Method is used through the Midas Civil and Midas GTS NX software. A procedure for the integration of both programs is proposed. Applies to the case study: Bridge over the Cabañas River. A comparison is made between the analysis using the Ballast Coefficient Method and the Finite Element Method. The development of the linear dynamic, non-linear dynamic study incorporating the stiffness of the soil and modeling the work and the site as a whole, reports an increase in the axial forces for the latter. With the solicitation of the moment and the shear there are significant variations. The deformations and rotations are higher in the case that considers the Structure and the ground as a whole, with respect to the others, this is due to an increase in the flexibility of the system.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE REFERENTE A PUENTES DE HORMIGÓN Y SU ENFOQUE RELACIONADO CON LA INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO – ESTRUCTURA.....	7
Introducción al capítulo	7
1.1. Interacción suelo – estructura	7
1.2. Los puentes de hormigón. Enfoque referente a la interacción suelo – estructura.....	9
1.3. Métodos para el análisis de la interacción suelo – estructura	16
1.3.1. Método del Coeficiente de Balasto	16
1.3.2. Método de las Diferencias Finitas.....	18
1.3.3. Método de los Elementos de Contorno.....	19
1.3.4. Método de los Elementos Finitos.....	20
1.4. Softwares que facilitan el análisis de la interacción suelo – estructura	22
1.4.1. SAP 2000	23
1.4.2. Plaxis	23
1.4.3. Abaqus	24
1.4.4. Midas	25
1.4.5. Otros softwares.....	26
Conclusiones del capítulo	26
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO –ESTRUCTURA A TRAVÉS DEL SOFTWARE MIDAS, CON BASE EN EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	27
Introducción al capítulo	27
2.1. Procedimiento para el análisis de la interacción suelo – estructura	27
2.1.1. Esquema de trabajo modelo – estructura en el software Midas Civil (Etapa I).....	28

2.1.2. Esquema de trabajo modelo estructura en el software Midas GTS NX (Etapa II).....	30
2.2. Aplicación del procedimiento al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas.....	32
2.2.1. Modelo del puente en Midas Civil	34
2.2.2. Modelo del suelo en Midas GTS NX.....	38
2.2.3. Análisis de la incidencia de la interacción suelo – estructura	39
2.2.4. Resultados y análisis de los resultados	40
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	48

INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad sísmica es uno de los temas más tratados en el contexto internacional en los últimos años, fundamentalmente en países con actividad sísmica importante. Se estima que el 50 % de las pérdidas causadas por desastres naturales, han sido provocadas por catástrofes de origen geológico, generalmente sismos. Los daños económicos y el número de víctimas afectadas por los terremotos tienen una estrecha relación con el deterioro que sufren las edificaciones, pues existen muchas construcciones vulnerables en zonas afectadas por temblores de tierra. Como consecuencia de lo antes expuesto, el Código Sísmico vigente en Cuba establece que:

- La estructura debe soportar sismos severos y no colapsar ni causar graves daños a las personas durante los sismos (Estado último).
- La estructura debe soportar sismos moderados, experimentando daños aceptables (Estado de servicio).

En el caso específico de los puentes, evaluar su vulnerabilidad sísmica, como parte de las construcciones ingenieriles, es vital para impedir la pérdida de recursos humanos y materiales, ya que constituyen un elemento esencial para garantizar la conectividad del país luego de un desastre natural. Citando a (Sánchez, 2008), en Cuba no se conocen reportes frecuentes de daños considerables en puentes de hormigón armado, debido a sismos de gran intensidad; sin embargo, los daños sufridos en países afectados por terremotos destructivos, demuestran la vulnerabilidad estructural que estos poseen ante eventos de esta naturaleza. (Grand, 2019), plantea que los criterios establecidos para el diseño de puentes, buscan que estos se comporten en un rango elástico de deformaciones durante sismos de intensidad moderada, que se limiten los daños durante eventos de mediana intensidad y, por último, que se evite el colapso, aunque presenten daño en sismos de intensidad excepcionalmente severa.

La inclusión de las propiedades del suelo en los modelos de análisis, ha ganado auge en la previsión del comportamiento y detección de daños, aunque hoy día continúa siendo un reto y una opción a considerar. La influencia de las características del suelo en la respuesta de la estructura o edificación proyectada en él, es un aspecto que puede contribuir al buen

desempeño de la estructura (en mejor de los casos) o ampliar los efectos desfavorables de la actividad sísmica; a este fenómeno se le conoce como la interacción suelo – estructura.

En el ámbito internacional (Avilés & Pérez-Rocha, 2004), (Villarraga, 2005) (Valderrama, 2014), (Villarreal, 2003, 2005 y 2017), son autores que han tratado el tema de la interacción suelo estructura y definido sus conceptos y definiciones, así como su uso práctico en la detección del comportamiento del suelo, la estructura y por ende en la respuesta de la estructura y su capacidad ante acciones sísmicas. Autores como (Rojas, 2009), (Canavesio et al. 2011), (Martínez, 2014), (Herrera, 2013), (Valderrama y Meza, 2014), (Fernández, 2013), (Suescum, 2016), desarrollaron en la universidad de Sevilla (España) una investigación orientada a evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura en lo que respecta al comportamiento estructural.

Plantean que la ISE es tomar en cuenta las propiedades elásticas del suelo, es decir, considerar que el suelo no es infinitamente rígido, como suele plantearse en la mayoría de análisis, sino que tiene cierto grado de amortiguamiento y absorbe parte de la energía generada por el sismo. La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en las cercanías de la cimentación.

En particular, las amplificaciones dinámicas del subsuelo adquieren valores extraordinariamente altos cuando los periodos predominantes del sismo y el suelo son similares. De igual forma, la interacción puede ocasionar considerables incrementos o reducciones de la respuesta estructural, dependiendo de la relación entre los periodos fundamentales de la estructura y el suelo. Específicamente, cuando el periodo efectivo (propiedad dinámica) de la ISE se acerca a la dominante del suelo tiene lugar el fenómeno de resonancia, haciendo que la respuesta estructural sea excepcionalmente elevada. De ahí la relevancia de evaluar el comportamiento, la influencia y la vulnerabilidad sísmica ante el fenómeno de la interacción dinámica suelo – estructura.

Existen diferentes métodos para la consideración de la interacción dinámica suelo estructura. Destaca por su facilidad de aplicación el “Método del coeficiente de balasto”, también conocido como el Método de Winkler, siendo este habitual en la práctica ingenieril, tanto internacional como nacional. (Sithole, 1993; González, Getty, 1994; Rosquete, Hernández,

1994; Cañete, Morales, 1995; Chagoyen, 1996), consideran este método poco representativo y lo denominan de forma general como el método de las deformaciones locales. Esta forma de modelar el terreno presenta limitaciones tales como:

- La contradicción con el comportamiento de algunos tipos de terrenos, porque con frecuencia las deflexiones de la superficie, ocurren no solo inmediatamente bajo la región cargada como lo expresa este modelo de terreno, sino que los desplazamientos ocurren dentro de cierta zona límite, fuera del campo de acción de las cargas actuantes.
- No toman en cuenta las deformaciones generales fuera de la superficie cargada, lo que permite representar en algunos casos, la base con un comportamiento elástico, simulando éste por muelles no conectados entre sí.
- Limita su aplicabilidad solo a terrenos que posean poca capacidad de transmisión de esfuerzos y de pequeña potencia de capa de terreno compresible.
- En este método los muelles que simulan el comportamiento del suelo, no presentan interconexiones entre ellos, por lo que no se logra simular totalmente la continuidad del medio.
- Consideración del suelo con un comportamiento lineal elástico. (Esta consideración presenta varias limitaciones como son: los modelos elásticos solo pueden ser empleados para el caso de rangos de carga bajos, no consideran la historia pasada en el comportamiento del material, no simulan la rotura en el mismo y desprecian el efecto no estacionario de los fenómenos físicos que se estudian.)

Otro método que permite englobar la interacción suelo – estructura en un mismo modelo y simular un comportamiento más cercano a la realidad es el Método de Elementos Finitos (MEF). Es muy ventajoso debido a que permite discretizar geometrías muy complejas y detalladas en elementos que aproximan la realidad y facilitan el cálculo ingenieril con gran precisión para la solución de determinados problemas, como son: mecánica de sólidos, fluidos, problemas dinámicos, electroestático e incluso transferencia de calor (Weck & Yong, 2004).

El MEF se utiliza ampliamente en muchas subdisciplinas de la ingeniería civil; en la geotecnia se necesitaban herramientas de cálculo complejas para estimar asientos de grandes estructuras que transmiten una carga importante al suelo (presas de tierra, por ejemplo). A través del método, no solo se puede estimar el comportamiento de diversas estructuras en un suelo (interacción suelo-estructura), también puede modelar el efecto de las condiciones ambientales y meteorológicas sobre un determinado suelo (interacción suelo-atmósfera).

En el contexto nacional, autores como (Hernández, 2018), (de Zayas Nuñez, 2019) y (Arzuaga, 2018), han tratado el tema de la interacción suelo – estructura, pero con base en el Método del coeficiente de balasto, que solo permite un análisis lineal estático. Por lo que es necesario realizar un estudio que contemple la aplicación del Método de Elementos Finitos, debido a las ventajas que el mismo presenta con respecto al anterior.

Por consiguiente, el **objeto de investigación** es: puentes de hormigón. Específicamente se analiza como **campo de acción**: la interacción suelo - estructura en puentes de hormigón.

Como **objetivo general** se establece: analizar la incidencia de la interacción suelo estructura en puentes de hormigón empleando el Método de Elementos Finitos.

Para llevar a cabo el objetivo general antes mencionado se plantea la siguiente **hipótesis**: si se emplea el Método de Elementos Finitos se podrá analizar la incidencia de la interacción dinámica suelo - estructura en puentes de hormigón, en el régimen de comportamiento del suelo no lineal.

Objetivos específicos:

1. Determinar los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan incidencia de la interacción dinámica suelo – estructura y su influencia en puentes de hormigón.
2. Determinar los procedimientos para análisis de interacción suelo - estructura basada en el Método de Elementos Finitos.
3. Realizar la modelación del sistema integral puente – cimentación – estructura con el software Midas Civil y Midas GTS NX.
4. Realizar comparación entre el Método de Elementos Finitos y el Método del Coeficiente de Balasto aplicados al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas.

Con el propósito de dar solución al problema de investigación y concretar la hipótesis, se tienen en cuenta los siguientes métodos:

- **Métodos teóricos:**

- **Análisis – síntesis:** Para realizar un estudio detallado de la información precedente y la bibliografía que existe acerca de la interacción suelo – estructura, principalmente en puentes de hormigón.
- **Inducción – deducción:** Para llevar a cabo un proceso investigativo lógico, que permita llevar a la práctica la teoría concebida acerca de la interacción suelo – estructura en puentes de hormigón.
- **Abstracción – generalización:** Se parte de criterios existentes, y otros de elaboración propia, para poder hacer palpable esta investigación.
- **Histórico – lógico:** Análisis detallado de la cronología histórica del estudio de la interacción suelo – estructura en puentes de hormigón, para tener una idea del contexto en el que se encuentra enmarcado el campo.
- **Hipotético – deductivo:** Para lograr la elaboración correcta de la hipótesis y por tanto asegurar la lógica de la investigación.
- **Sistémico estructural funcional:** Para desarrollar un análisis del objeto de estudio, tanto teórico como práctico, a través de su descomposición en los elementos que lo integran.
- **Modelación:** Se realiza una propuesta para dar una solución más cercana a la realidad de la interacción suelo – estructura.

- **Métodos empíricos:**

- **Observación:** Se utiliza en la caracterización empírica del campo que se investiga, revisando el marco teórico alrededor del cual gira, con un enfoque histórico.
- **Análisis documental:** Para lograr la recopilación de la información necesaria acerca de la interacción suelo – estructura en puentes de hormigón.
- **Consulta a expertos:** Con el objetivo de valorar la calidad final del resultado obtenido.

- **Métodos estadísticos - matemáticos:**

- **Estadísticos descriptivos:** Organización de los datos para la interpretación, análisis y diseño de la interacción suelo – estructura en puentes de hormigón.

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

El **aporte de la investigación**: radica en la obtención de la influencia de la interacción dinámica suelo estructura en puentes de hormigón armado a partir de considerar un modelo que ejemplifique de manera más acertada el comportamiento del suelo. Mediante el uso de los softwares Midas Civil y Midas GTS NX.

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE REFERENTE A PUENTES DE HORMIGÓN Y SU ENFOQUE RELACIONADO CON LA INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO – ESTRUCTURA

Introducción al capítulo

En el siguiente capítulo se realiza un análisis general del diseño y construcción de puentes, enfocado principalmente en la respuesta de estas estructuras ante cambios en el suelo donde se encuentra enclavada la obra. Se estudia la interacción suelo – estructura, tanto en el ámbito nacional como internacional, detallando los diferentes enfoques de personalidades que se han dedicado a su investigación. Se describen las soluciones que se han implementado a lo largo de los años para el diseño de puentes resistentes; aplicando la experiencia obtenida de los daños causados por fenómenos naturales de gran envergadura. Se comparan los principales métodos empleados para analizar la interacción del suelo con las estructuras, obteniendo sus principales ventajas y desventajas. Por último, se resumen los softwares más empleados con el fin de lograr una respuesta lo más cercana posible a la realidad; así como sus limitaciones.

1.1. Interacción suelo – estructura

En el ámbito de la construcción, se tienen en cuenta todo tipo de aspectos. Es necesario conocer la relación de las estructuras con el medio que las rodea, ya que existen desastres naturales que pueden destruirlas completamente, causando grandes pérdidas. En el caso específico del suelo, podemos citar los sismos, que además de no poder preverse, infringen daños de gran envergadura. Se hace imprescindible entonces, el análisis detallado de las características geológicas a la hora de diseñar, y la influencia de estas en la futura construcción. El primer paso para iniciar el estudio del movimiento de la superficie del terreno durante los sismos, es el análisis de los movimientos ocurridos en el pasado interpretados a la luz de una teoría suficientemente aproximada del fenómeno de propagación de ondas. (Soriano, 1989)

Según (Soriano, 1989):

“...Existe un gran número de investigaciones relativas a la caracterización del movimiento sísmico de la superficie del terreno, con vistas a su posterior utilización en el estudio del comportamiento de equipos y/o estructuras que

descansen directa o indirectamente sobre él; un ejemplo claro es la investigación financiada por la Comisión Reguladora de la Energía Nuclear de Estados Unidos (publicación USNRC, 1978). Con este tipo de trabajos es posible obtener un movimiento de cálculo partiendo de los datos básicos del sismo esperado, tales como la distancia epicentral, la profundidad focal, la magnitud, la intensidad local, entre otros...”

(López López, 2020) Plantea que:

“...Estos procedimientos, más o menos establecidos, permiten conocer el movimiento del suelo libre de la presencia de cualquier estructura (movimiento de campo libre). Sin embargo, el proyecto de estructura frente a acciones sísmicas necesita conocer cuál es el movimiento de la base de la estructura o del terreno inmediatamente adyacente, que evidentemente es distinto del movimiento de campo libre correspondiente; la presencia de la estructura modifica el movimiento. En la Figura 1.1 se puede apreciar cómo difieren los movimientos en el punto A, debido a interacción del suelo con la estructura (Rosenblueth, 1992)...”

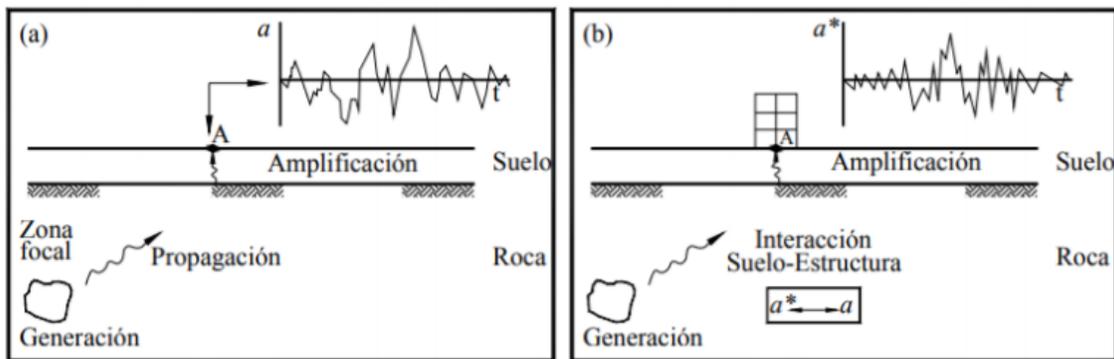


Figura 1.1 Modificación del movimiento del campo libre debido a la presencia de estructuras. (López López, 2020)

El mecanismo por el cual la presencia de la estructura influye en el movimiento del terreno es conocido bajo el nombre de interacción suelo – estructura (Soriano, 1989). Consiste en el conjunto de cambios en la respuesta del suelo – cimentación – estructura, que en general es causado por dos fenómenos: la flexibilidad del terreno de desplante, y el cambio en los movimientos de entrada debido a la presencia de la estructura (García Solano, 2012).

Citando a (López López, 2020):

“...El efecto de la ISE se fundamenta en la diferencia entre la respuesta de un punto donde está situada una estructura y la respuesta que debería experimentar ese punto si no estuviera (Espinoza, 1999). Este intercambio modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría una edificación supuestamente indeformable, así como las características del movimiento del terreno alrededor de la cimentación (Avilés & Pérez-Rocha, 2004)...”

Este es complejo y no puede ser considerado explícitamente más que en estudios especiales, como el caso de las instalaciones nucleares u otras de alto riesgo, y aun en esas situaciones hay que recurrir a un buen número de hipótesis simplificadoras que permitan tratar el problema por alguna vía numérica asequible a los ordenadores actuales (Soriano, 1989).

1.2. Los puentes de hormigón. Enfoque referente a la interacción suelo – estructura

Los puentes garantizan la conectividad de lugares en los que, debido a las características geográficas, sería imposible acceder; ya que permite salvar accidentes como ríos, quebradas y valles. También son usados como pasos sobre niveles que permiten cruzar carreteras o vías férreas agilizando el flujo vehicular (Grand Barros, 2019). Es por ello que se hace necesario diseñar una estructura capaz de resistir ante cualquier desastre de gran envergadura, pues el colapso de la misma ante un fenómeno natural, podría traer consigo graves consecuencias.

En el caso específico de los sismos, es evidente que una catástrofe de esta índole puede ocasionar daños irreparables si no se tiene en cuenta de antemano el análisis geotécnico en el diseño del puente, así como la interacción del suelo con la estructura. Por lo que resulta imprescindible encontrar soluciones cada vez más factibles, que garanticen la obtención de resultados cercanos a la realidad.

Existen cientos de puentes diseñados y construidos en zonas de elevada peligrosidad sísmica. Si a esto se le suma el mal estado de conservación, muy común en América Latina, y que muchos de ellos fueron diseñados y construidos con códigos que han quedado obsoletos, se tiene como consecuencia la posibilidad de pérdidas de vidas humanas. Además, se ven afectadas las redes de transportes, objetos indispensables para el ingreso de equipos de asistencia durante una emergencia y el desarrollo de las economías (Danna, 2017).

Si se observa el problema en el contexto internacional, debido al crecimiento poblacional en los últimos años y a las escasas o nulas previsiones sísmicas en las construcciones,

ocurrieron catástrofes sin precedentes. En el terremoto de Haití, uno de los países más pobres del planeta, en el año 2010 murieron 316.000 personas. También en los países con más alto nivel de desarrollo en materia de ingeniería sísmica, como Estados Unidos y Japón ocurrieron sismos devastadores. En el terremoto de la región de Tohoku (Japón) seguido de tsunami murieron en el año 2011, 15893 personas y 2567 resultaron desaparecidos. En reiteradas ocasiones acontecieron eventos cuya magnitud no podría haber sido prevista. Cabe mencionar que el nivel de destrucción de un terremoto, puede ser minimizado pero no evitarse (Danna, 2017).

Con respecto a este tema (Danna, 2017) refiere que:

“...La pérdida de vidas humanas no es el único problema grave inducido por los terremotos. Movimientos sísmicos como los de Northridge (1994), Kobe (1995), Kocaeli (1999), produjeron daños significativos en importantes puentes y en la economía de las naciones (Priestley, et al., 1996). Además, la interrupción prolongada de las rutas que prestan servicio incidió de manera negativa. Esto ocurrió incluso en puentes diseñados bajo las previsiones de la normativa entonces vigente, que presentaba algunas falencias hasta ese momento no detectadas...”

Existen diversos criterios a la hora de diseñar los puentes. El análisis de los daños ocurridos y el estudio de los elementos que fallaron ante la ocurrencia de sismos fuertes favorecen una nueva evaluación de los códigos existentes para el diseño sísmico de puentes.

Desde el punto de vista de (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013):

“...Los daños severos producidos a varios puentes de carreteras por el sismo ocurrido el 9 de febrero de 1971 en Estados Unidos y que afectó principalmente la localidad de San Fernando, propiciaron la modificación del criterio que establecía realizar la revisión sísmica por el método de la fuerza equivalente, obtenida mediante la multiplicación de un coeficiente por el peso de la estructura. El mismo dependía únicamente de las características de la cimentación y no se tomaban en cuenta factores tan importantes, como el peligro, las características dinámicas del suelo y de la estructura y la ductilidad de esta última. Esta situación alentó en el país la realización de numerosas investigaciones con el fin de mejorar la seguridad sísmica de estas obras de fábrica (Galindo, 2012)...”

“...También afirma Galindo que, como resultado de todos estos acontecimientos, la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) llevó a cabo la modificación de sus métodos de diseño sísmico para los puentes que se ejecutaron a partir del año 1977, teniendo en cuenta la dependencia del coeficiente sísmico de la amplificación dinámica que posee el suelo, el riesgo sísmico de la región, y por último el análisis de la interacción del suelo con la estructura...”

“...Por su parte, la Applied Technology Council ATC-32 (1996) establece dos niveles de diseño a partir del terremoto esperado, evaluación de la seguridad y evaluación funcional, que considera un nivel de servicio inmediato para corregir daños reparables en puentes ordinarios y un nivel de servicio inmediato para reparar daños mínimos en puentes importantes (Rojahn, Mayer y Nutt, 1997). En los resultados de investigación mostrados en este reporte se aprecia una evolución con respecto a la inclusión de un nuevo nivel de evaluación del desempeño (funcional); no obstante, persisten ambigüedades a la hora de clasificar los puentes en ordinarios e importantes...”

“...En Japón, las experiencias de sismos pasados y principalmente el estudio de los daños detectados luego del terremoto de Kobe, en 1995 demostraron la necesidad de transformar la idea del diseño mediante la utilización del Método de Coeficiente Sísmico. Los conocimientos adquiridos permitieron considerar la inclusión del método de diseño por ductilidad para los elementos estructurales más afectados por los sismos. Esta nueva versión incluye nuevas clasificaciones del suelo, con la variación del coeficiente de condiciones del sitio; se asegura una mayor consideración de las características vibracionales del puente mediante el cálculo de la inercia para cada unidad de vibración y el desarrollo del cálculo sísmico de puentes continuos. Estas valoraciones, incluidas en las modificaciones de JRA (1996), contienen también el análisis del fenómeno de licuefacción, la introducción de los parámetros del terremoto y métodos para el análisis dinámico de modelos y el chequeo de seguridad a partir del análisis dinámico (Kawashima y Unjoh, 2004)...”

En Europa, de igual manera, se extendían las investigaciones. A partir de nuevos criterios, obtenidos también del análisis del comportamiento real de los puentes, se continúan desarrollando otras versiones del Eurocódigo 8 Parte 2, que en sus especificaciones para el diseño establece dos requerimientos básicos: estado límite último, donde se precisa que como

resultado del diseño sísmico la estructura no colapse, sino que debe mantener su integridad aunque algunas partes de ella puedan sufrir daños considerables; y el estado límite de servicio, donde se evalúan terremotos con alta probabilidad de ocurrencia durante la vida útil del puente y como consecuencia de los cuales solo se deben producir daños menores en elementos secundarios que no precisen reducciones de tráfico ni reparaciones inmediatas (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Establece tres categorías de importancia de los puentes (alta, moderada y baja), aspecto novedoso, pues la mayoría de las normas vigentes solo evalúan dos clases (alta o esencial y normal u otros puentes) y recomienda tres tipos de comportamiento de las estructuras: esencialmente elástico, comportamiento dúctil y ductilidad limitada. Para cada uno de estos desempeños establece las consideraciones relacionadas con su diseño y las verificaciones necesarias que se deben realizar. En opinión de los autores de este trabajo, este código es claro con respecto a la evaluación de los efectos torsionales y en los casos necesarios considera la posible sobrerresistencia existente en las secciones a diseñar o revisar. Introduce, además, una sección relacionada con el aislamiento sísmico de puentes, herramienta poderosa, flexible y económica para diseñar nuevas obras y para reforzar las existentes (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

El Manual de puentes de Nueva Zelanda, en su sección 5: Diseño sismorresistente de puentes (2004) establece tres requerimientos de desempeño sísmico y 8 categorías referidas a la relación entre la carga horizontal total aplicada y el desplazamiento resultante del centro de masa de la estructura. En el análisis de estados de cargas y combinaciones para el diseño solo considera dos direcciones ortogonales; es decir, no tiene en cuenta el análisis de las acciones verticales conjuntamente con las horizontales; sin embargo, propone una ecuación para el cálculo de la acción vertical en el diseño de la superestructura, para la cual establece un comportamiento elástico ante esta acción, sea esta negativa o positiva (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

En opinión de estos autores, resulta novedosa la inclusión en este código para el cálculo del cortante estático en la dirección analizada de un coeficiente básico de aceleración que depende del factor de ductilidad y del período de la estructura, un factor de riesgo en función

de la categoría del puente y un factor de comportamiento estructural en función de la categoría del suelo de emplazamiento (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Esta norma establece tres categorías de importancia de los puentes en función del número de vehículos y la categoría de la vía donde está ubicado; esta clasificación interviene en la selección del factor de riesgo, que también se relaciona para propósitos del diseño, con el período de retorno del sismo analizado. Especifica, además, cómo valorar la torsión horizontal en el análisis a partir de su adición a la fuerza cortante calculada para el análisis estático (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Empleando las palabras de (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013):

“...En algunos países de América Latina, entre ellos Venezuela, los daños observados en el mundo y la revisión de los puentes construidos en su territorio demostraron la necesidad de diseñar estructuras seguras y de ejecutar trabajos de rehabilitación a las ya existentes. A partir de esta realidad se han revisado y propuesto ideas para modernizar los códigos. A continuación, se muestran algunos aspectos tratados por (Lobo, 2003) con este propósito:

1. Definición de una filosofía de dos estados límites, que controle el diseño sismorresistente y determine zonificación, acciones sísmicas, clasificación de sistemas estructurales, métodos de análisis, diseño, evaluación y detallado.
2. La modificación de los mapas de zonificación sísmica, para adaptarlos a la sismicidad ocurrida, la probabilidad esperada y la filosofía de diseño.
3. La revisión de las formas espectrales y la clasificación de los suelos, según las investigaciones y experiencias de comportamiento sísmico, incluyendo la consideración de sismos de fuentes cercanas.
4. La reafirmación de los métodos de diseño por desplazamiento, buscando un enfoque híbrido, que permita, simultáneamente, el control más adecuado de las fuerzas sísmicas y los daños ocurridos.
5. La normalización del sismo-aislamiento y el sismo-amortiguamiento, como medios para evitar la pérdida de vidas, controlar y reducir los daños y mantener la función específica de los puentes...”

Algunas de estas consideraciones ya han sido tratadas por códigos de mayor avance, lo que demuestra otro aspecto importante relacionado con el diseño sísmico actual, la marcada diferencia existente entre las regulaciones de países de gran desarrollo económico con respecto a la normativa de la mayoría de los países del Tercer Mundo (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

La Norma Cubana que establece los requisitos para el diseño de las construcciones sismorresistentes (NC 46, 1999) constituyó un paso de avance decisivo de la Ingeniería sísmica en Cuba. Su puesta en vigor dotó a los diseñadores de una herramienta con criterios novedosos para su época, lo cual permitió un mejor diseño, revisión y reforzamiento de estructuras existentes. Sin embargo, actualmente se hace necesario la inclusión en su contenido de aspectos que, basados en la experiencia mundial, son imprescindibles en el diseño de puentes con comportamiento adecuado, sobre todo los relacionados con el diseño por desempeño, base actual de muchos códigos modernos (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Como aspecto importante hay que mencionar que este código establece su campo de aplicación para puentes metálicos convencionales y de vigas de hormigón armado con longitud menor de 150 metros. Por tanto, no refiere ningún aspecto relacionado con el diseño de puentes especiales: puentes arco y atirantados; así como no valora la influencia de grandes curvaturas horizontales en el comportamiento sísmico; además, excluye en la ejecución de este análisis, a los puentes simplemente apoyados, consideración con la que no coinciden los autores, aunque precisa algunos criterios a tener en cuenta en su diseño (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Por otra parte, la clasificación de las estructuras que realiza el código cubano vigente, basada en dos categorías: puentes de excepcional importancia y otros, no es lo suficientemente clara, es más bien ambigua ya que no acota técnicamente la diferencia entre una y otra, pues no las relaciona con la respuesta que debe manifestar la estructura analizada ante determinado nivel de demanda sísmica, filosofía actual del diseño sismorresistente en el mundo, al no establecer así los daños permisibles en cada caso (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013)

Otro aspecto significativo es que la NC 46:1999 no establece los tipos de comportamiento para cada uno de los sismos de diseño, y no evalúa que durante la construcción del puente es

imprescindible valorar la posible ocurrencia de un evento, tanteando la forma de trabajo y las etapas constructivas, como forma de garantizar con falsas obras y/o facilidades temporales la integridad de las partes ya ejecutadas, para evitar de esta manera las pérdidas económicas, materiales y humanas de consideración. Se ha mencionado que este sismo es clasificado como de construcción por algunas normas (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Como se explicó anteriormente, un aspecto novedoso de la evolución de los códigos de Estados Unidos de América y Japón fue la inclusión de las características del suelo en el análisis, en esta norma cubana se observa la consideración de este parámetro a partir de un coeficiente de sitio según el perfil de suelo; sin embargo, es válido significar la importancia de considerar las características litológicas del área con el fin de evaluar la influencia de las condiciones del suelo hasta una profundidad de 30 metros, tal como se establece en algunos códigos importantes. La correcta evaluación de este fenómeno es vital pues el coeficiente participa en la definición del espectro elástico de respuesta a través del coeficiente sísmico espectral (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

El código cubano, para incorporar esta filosofía al diseño, establece la utilización de un coeficiente de reducción solo por ductilidad, considerado según los criterios de la AASHTO (1996), sin tener en cuenta las características y la no linealidad de los materiales cubanos y estableciendo valores fijos que no tienen en cuenta, como en otros reglamentos de diseño, la relación entre las dimensiones de los elementos estructurales diseñados ni los valores de solicitaciones resultantes de las combinaciones que incluyen la acción sísmica (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

Estos y otros aspectos reflejan la necesidad de realizar propuestas que permitan el perfeccionamiento del diseño sísmico de puentes de hormigón, que también garanticen la ejecución de proyectos de rehabilitación de estructuras construidas en la isla (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

La experiencia adquirida de la observación y estudio de daños sufridos por puentes de hormigón armado en el mundo, ante la acción de sismos fuertes, ha propiciado la mejora de los códigos de diseño, aunque quedan aspectos que por su complejidad aún no son claramente tratados en estas regulaciones. El código cubano de construcciones sismorresistentes en su acápite referido al diseño de puentes adolece de muchos criterios

importantes para lograr estructuras más seguras ante acciones sísmicas significativas y no responde a la necesidad actual de acometer la rehabilitación de las obras construidas. Las recomendaciones realizadas están fundamentadas en el análisis de códigos, regulaciones y manuales vigentes de reconocido prestigio internacional y pueden mejorar de forma significativa los resultados del diseño de puentes de hormigón en zonas de elevada sismicidad de Cuba (Candebat Sánchez & Godínez Melgares, 2013).

1.3. Métodos para el análisis de la interacción suelo – estructura

Con el objetivo de lograr una respuesta cada vez más cercana a la realidad, se ha propuesto modelar el sistema suelo – estructura, a través del análisis de la subestructura como un todo, o discretizada en elementos lineales. Se realizan diferentes modelaciones del terreno, donde se considera este un medio discontinuo o continuo, de acuerdo a que tenga un comportamiento tenso deformacional lineal o no lineal.

Hasta el inicio de los años 1950, la mayoría de los problemas elásticos eran resueltos por métodos analíticos formulados localmente, puesto que los problemas variacionales eran muy laboriosos. En la actualidad, el uso de las computadoras, ha permitido resolver eficientemente las ecuaciones variacionales, poniendo en práctica métodos como el del Coeficiente de Balasto, Diferencias Finitas, Elementos Finitos y Elementos de Contorno.

1.3.1. Método del Coeficiente de Balasto

La primera vez que fue propuesto un procedimiento considerando la interacción del suelo con la subestructura fue realizado por Winkler en el año 1867. Este modela las cimentaciones como una viga flexible, en el cual se supone el terreno como un conjunto infinito de muelles situados bajo una viga deformable, la cimentación. La constante de deformación de cada muelle es K_s (Módulo de Balasto), valor obtenido de la relación entre la presión de contacto (q) y el desplazamiento (δ) (Figura 1.2) (León Alvarado, 2011).

$$K_s = \frac{q}{\delta} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

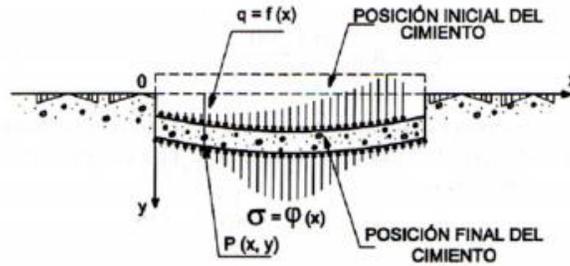


Figura 1.2 Teoría de Winkler. (León Alvarado, 2011)

El método se creó inicialmente para el análisis de las traviesas del ferrocarril, donde el balasto es la capa de grava que se tiende sobre la explanación de los ferrocarriles para asentar y sujetar las traviesas. Este modelo tiene múltiples aplicaciones, no solo en el campo de las cimentaciones, sino en cualquier problema que pudiera adaptarse a él (León Alvarado, 2011).

La aplicación de la teoría del Módulo de Balasto ha ganado aceptación en los últimos tiempos, ya que permite una fácil asimilación del modelo de la interacción estructura – terreno, a partir de la utilización de los métodos matriciales de cálculo. Basta con incluir muelles en los nudos con la rigidez correspondiente al balasto, en elementos lineales mediante su discretización en varias barras cuyos nudos incluyen bielas, en elementos superficiales mediante un emparillado de barras con las bielas en los nudos. Es por ello que el Método de Winkler se usa en la mayoría de los softwares de cálculo de estructuras, principalmente para vigas y losas de cimentación (León Alvarado, 2011).

El valor de K_s depende de la continuidad del suelo, de la rigidez de la estructura y de la distribución de la carga. Su determinación es un tema de reconocida importancia sobre todo en el análisis estructural de cimentaciones. Con este sencillo parámetro es posible describir el comportamiento que un suelo específico tendrá al imponerse sobre él una determinada cimentación.

La forma común para determinar su valor es mediante un ensayo de campo que se conoce con el nombre de “*Ensayo de Placa de Carga*”, el cual, si bien es cierto cuando se realiza con entera prudencia y calidad ofrece resultados de enorme interés, la realidad es que generalmente este ensayo es más bien complicado y hasta riesgoso de llevar a cabo y esto

podría fácilmente significar resultados erróneos y por tanto los parámetros que de ellos se determinen serían poco confiables (Cortés Mena, 2010).

Entre las ventajas de este método se pueden citar:

- Es muy sencillo, solo requiere la estimación de un parámetro para ser definido, el Coeficiente de Balasto.
- Permite considerar puntos de interés de la viga (disposición de arriostramientos, cambios del estrato del suelo, aplicación de fuerzas, entre otros).

Se pueden plantear las siguientes desventajas:

- El Coeficiente de Balasto es complejo y con muchas limitaciones a la hora de ser estimado.
- Solo permite estimar movimientos horizontales, mas no movimientos globales del terreno.
- Se pierde precisión alrededor de aquellos puntos sobre los cuales se introducen elementos de arriostramiento (Bautista, 2010)

1.3.2. Método de las Diferencias Finitas

Al tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, se quiere dar una idealización de la estructura que se acerque a la realidad lo más que se pueda, ya que es muy importante hacer un análisis tomando en cuenta todos los factores que intervienen en el problema de contacto, sobre todo, cuando la misma se apoya en suelos blandos, que son más susceptibles a ocasionar asentamientos en las estructuras. (Santos Miñón, 1980) describe: “El problema de contacto estudia el caso cuando en el contorno de un cuerpo existe numerosas regiones Ω , en cada una de las cuales se dan las siguientes condiciones de contacto:

- Igualdad de deformaciones entre dos cuerpos en la zona de contacto.
- La presión de contacto que se produce entre dos cuerpos, o reacción de uno sobre el otro, ha de ser tal que la deformación inducida por estas tensiones cumpla la primera condición o condición de deformación.”

En comparación con otros métodos de análisis, utilizados para resolver el problema de contacto, el Método de las Diferencias Finitas resulta ser un método confiable y bastante accesible para su programación computarizada, de manera que es posible conocer con mejor

precisión el comportamiento de este tipo de estructuras de cimentación. Permite plantear soluciones matriciales ya que básicamente consiste en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales parciales, por sus correspondientes ecuaciones de diferencias finitas, para luego obtener un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas que son más sencillas de resolver (Ballinas-Mijangos, 2006).

1.3.3. Método de los Elementos de Contorno

El Método de los Elementos de Contorno es utilizado frecuentemente como una poderosa herramienta de análisis y su acople es un tema de gran interés a lo largo de más de dos décadas. Presenta ventajas en el manejo de problemas donde se consideran dominios infinitos o semi-infinitos; sin embargo, para problemas que involucran subregiones con diferentes características, es natural emplear la combinación de este método y el Método de los Elementos Finitos. Desafortunadamente, el sistema de ecuaciones producido por ambos, está expresado en términos diferentes, los cuales no se pueden relacionar entre sí sin ser tratados previamente.

Las primeras ideas sobre el método fueron presentadas por (Jawson y Ponter, 1963), para problemas de potencial; (Rizzo, 1967), lo formuló para problemas elásticos; (Cruse y Rizzo, 1968) lo hicieron para el caso dinámico. La solución de estas ecuaciones permite obtener valores que no se conocían, y por medio de estos obtener el movimiento y las tensiones en cualquier punto interno.

El Método de los Elementos de Contorno puede ser aplicado, tal como ha sido formulado anteriormente, a la obtención de rigideces dinámicas de cimentaciones sobre un suelo que se supone elástico e isótropo.

Entre las ventajas podemos citar:

- Reducir en un orden la dimensión del problema, siendo preciso discretizar únicamente la interfase entre suelo – estructura y la superficie libre del mismo.
- Ofrece la posibilidad de tratar cimentaciones enterradas.
- Produce unas integrales cuyo valor es mucho más fácilmente obtenido numéricamente.

En su contra se puede decir:

- Requiere la discretización de la superficie libre del suelo aunque en el caso de cimentaciones superficiales, si se hace la hipótesis usual de “smooth footing”, tan solo es preciso discretizar la interfase entre suelo y estructura (Rojas, Lehmann, & Cerrolaza, 2008).

1.3.4. Método de los Elementos Finitos

De acuerdo con (Ramos Wendehake, 2017):

“...Gracias al auge de la informática y de los métodos numéricos es común realizar estudios que engloban en un mismo modelo la interacción suelo-estructura. Esta práctica es muy común para obras grandes como las presas (Tellado, 1999). Uno de los métodos numéricos más utilizados en la modelación del suelo es el método de los elementos finitos (MEF)...”

“...El MEF consiste en subdividir un dominio en componentes de geometría simple, que no se solapan durante el análisis, conocidos también como elementos finitos o simplemente elementos (American Concrete Institute, 2002). Estos elementos están compuestos por nodos y puntos de Gauss, que permiten simular asientos y tensiones aplicadas respectivamente...”

“...El elemento se discretiza en un número de nodos que determinan los grados de libertad de cada elemento. El modelo matemático que describe el problema es de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el problema físico, logrando así discretizar cada elemento transformando un problema continuo en uno discreto. De esta forma, resulta un sistema de ecuaciones, lineales o no lineales, cuyas incógnitas son los desplazamientos en los nodos de los elementos (Zienkiewicz y Taylor, 1994)...”

“...Aunque también hay que resaltar algunas desventajas como la respuesta matemática del modelo, que según (Weck y Yong, 2004) resulta en una aproximación que será más cercana a la respuesta real a medida que los elementos estén discretizados con más nodos. Además, un error del usuario podría llevar a resultados muy lejanos a la realidad causando un diseño erróneo...”

En general, para resolver un problema se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Definir el tipo de análisis que se quiere hacer y en base a esto seleccionar los elementos que discretizan el problema. Luego a los elementos se les asignan propiedades de los materiales que se modelan, también se pueden agregar cargas externas y condiciones de contorno.
2. Antes de empezar el cálculo se genera una malla, esta abarca el dominio del problema y lo discretiza en elementos, estos elementos están conectados entre sí y están conformados por nodos. Si la malla es muy fina habrá una mayor discretización, por lo tanto, una mejor aproximación en los resultados, sin embargo, un exceso de elementos puede hacer que el proceso de cálculo sea lento.
3. Por último, se ejecuta el cálculo para resolver la modelación.

El MEF se utiliza ampliamente en muchas subdisciplinas de la ingeniería civil. En la geotecnia se necesitaban herramientas de cálculo complejas para estimar asientos de grandes estructuras que transmiten una carga importante al suelo (presas de tierra, por ejemplo). No solo se puede estimar el comportamiento de diversas estructuras en un suelo (interacción suelo-estructura), también puede modelar el efecto de las condiciones ambientales y meteorológicas sobre un determinado suelo (interacción suelo-atmósfera) (Ramos Wendehake, 2017).

Los resultados del coeficiente de balasto, calculado con expresiones analíticas, son poco representativos del comportamiento del suelo en comparación con los resultados de k calculados a través del Método de los Elementos Finitos. Estos no son constantes. Para un suelo dado, el coeficiente de balasto depende de la geometría del problema y también del punto considerado. En ocasiones es factible usar el coeficiente de balasto mínimo, calculado con el mayor desplazamiento, pero en otros casos, hay que hacer la envolvente de esfuerzos en la estructura considerando el valor mínimo y un valor máximo (Ramos Wendehake, 2017).

En esencia, la teoría del cálculo por elementos finitos tiene dos aspectos fundamentales, “la física del problema” y “la matemática necesaria para manipular y plantear en forma de modelos matemáticos el problema físico” (Otero, 2006).

A partir del análisis detallado del Método de Elementos Finitos se puede arribar a una serie de conclusiones (Otero, 2006):

- La formulación de un elemento para representar una determinada situación física no es necesariamente matricial. Solo que el modelo matemático que contiene el conjunto de las variables, (fuerzas, desplazamientos, etc.) considerados para un elemento en la condición de equilibrio, puede ser representado de forma matricial, debido a la tremenda facilidad que brindan las matrices para el almacenamiento y manipulación de las variables y ecuaciones.
- Aunque los elementos están definidos por sus nodos, lo más importante no es cuántos nodos tiene el elemento sino la cantidad de grados de libertad por nodo que tiene dicho elemento.
- El concepto de desplazamiento nodal es muy amplio, por lo que es más adecuado identificar los diversos componentes de los desplazamientos asociados a los nodos como el componente de desplazamiento en una dirección determinada, definida en el sistema de coordenadas (x; y; z) y relacionado con el grado de libertad en esa dirección.
- La matriz de rigidez de cualquier elemento finito es cuadrada y simétrica y su orden se corresponde con la cantidad de grados de libertad que tiene el elemento que pretende simular una determinada condición física.
- Al definir la matriz de rigidez de un elemento queda automáticamente definida la relación fuerza vs desplazamiento.
- Los coeficientes de la matriz de rigidez del elemento representan físicamente fuerzas asociadas a un desplazamiento unitario impuesto en un nodo, manteniendo los restantes nodos fijos, es decir con desplazamiento nulo.

1.4. Softwares que facilitan el análisis de la interacción suelo – estructura

A lo largo de los años se han desarrollado estrategias que faciliten el análisis de la interacción suelo – estructura, así como la reducción de los rigurosos cálculos que este conlleva. Es por ello que se han implementado softwares que permiten obtener resultados detallados y muy cercanos a la realidad, garantizando una mayor eficiencia y rapidez en el diseño de estructuras. A continuación, se consideran algunos de estos programas, que tienen como base el Método de Elementos Finitos.

1.4.1. SAP 2000

El SAP2000 es un software especializado para diseño, implementando el Método de Elementos Finitos dentro de una interfaz gráfica 3D orientada a objetos. El proceso de resolución consiste en usar un programa en lenguaje FORTRAN, el cual obtiene las deformaciones en el suelo, mediante el ingreso de datos haciendo uso de un editor de textos. El programa realiza la interacción suelo – estructura con el método Deméneghi (1979).

Para el análisis estructural utiliza el método de las rigideces y en el caso de las deformaciones de suelo, emplea dos opciones para calcularlas. Posteriormente realiza la compatibilidad de deformaciones entre la estructura y el suelo; y por último, calcula los elementos mecánicos de la cimentación.

Se genera un archivo de resultados que muestra las deformaciones en cada uno de los puntos de la cimentación. Con estas, y las cargas aplicadas, se obtienen los coeficientes de rigidez.

Las rigideces obtenidas se sustituyen en los puntos de la base de la cimentación de la estructura como si fueran resortes.

Por otra parte y de manera posterior, se hace uso del software SAP2000 para obtener las deformaciones en la estructura aplicando las cargas establecidas, que de acuerdo con la Tercera Ley de Newton son las mismas que las reacciones del suelo.

Al modelo generado por el SAP2000 se le asignan las cargas establecidas. Se corre el programa escogiendo la opción de análisis lineal estático. Se obtienen las deformaciones de los puntos bases de la estructura y se comparan con las obtenidas anteriormente; si son iguales, el proceso finaliza, si no, se obtienen nuevas reacciones en el suelo.

La principal desventaja en este caso radica en el hecho de que el análisis del suelo se realiza por separado, y los resultados son aplicados a la estructura como resortes, por lo que no existe un análisis estrechamente cercano a la realidad, además se corre el riesgo de introducir errores en la formulación.

1.4.2. Plaxis

Plaxis 3D Foundation es un programa en tres dimensiones desarrollado para el análisis de estructuras de fundación incluyendo zapatas, pilas y estructuras costa afuera. Este programa de elementos finitos es usado principalmente en la ingeniería geotécnica y el diseño. Los

asentamientos dependen de las condiciones locales del suelo y del método constructivo (Paico Amaya, 2021).

Los principales resultados que proporciona un cálculo mediante elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y las tensiones en los puntos de tensión. Además, cuando el modelo incluye elementos estructurales, se calculan los esfuerzos en dichos elementos (Paico Amaya, 2021).

Primeramente se tienen en cuenta las características de la estructura a analizar y del suelo de fundación para obtener las masas y los coeficientes de rigidez que intervienen en la interacción suelo estructura. Luego se diseña específicamente el elemento que se quiere analizar, conociendo las características del material y el suelo. Se añaden las cargas y se genera una maya en 2D que sirve de base al análisis en tres dimensiones. Por último, se corre el programa para obtener los gráficos y resultados de cálculo (Paico Amaya, 2021).

A pesar de la veracidad de los cálculos obtenidos, este programa presenta una desventaja, y es el hecho de que solo analiza elementos aislados, por lo que la interacción suelo – estructura que se quiere obtener, no es la más cercana a la realidad posible, pues habría que hacer un diseño por separado de cada elemento y luego unir los resultados.

1.4.3. Abaqus

Abaqus FEA es un conjunto de programas informáticos de simulación, que aplican el Método de Elementos Finitos, para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales dinámicos.

Para el análisis de la interacción suelo – estructura, el programa ofrece una solución: el diseño de la estructura simulando la geometría, la forma de aplicación de la carga y las condiciones de apoyo. Primeramente se modela el elemento que se desea estudiar, incluyendo la armadura de refuerzo y el suelo donde se encuentra; estos se construyen individualmente y más tarde se ensamblan en el módulo de ensamblaje ABAQUS/CAE. A partir de aquí, se obtiene un esquema geométrico, que tiene en cuenta las condiciones de contorno y la aplicación de las cargas. Se determina entonces el elemento que represente con la mayor aproximación posible el verdadero comportamiento de la estructura, así como el tamaño adecuado. A partir de aquí, se puede realizar el análisis detallado del comportamiento del

modelo diseñado, teniendo en cuenta diversas características del suelo y variando las cargas aplicadas.

Este software tiene como desventaja, que no permite el análisis para estructuras complejas, sino que se adapta solamente a elementos puntuales, por lo que se hace muy complejo el correcto estudio de la interrelación del suelo con una obra de mayor complicación.

1.4.4. Midas

MIDAS es un programa para el análisis y diseño de edificios, estructuras generales, puentes y estudios geotécnicos. Permite el modelado, diseño integral y análisis, ya que constituye una herramienta de última generación que emplea el Método de Elementos Finitos en la solución de problemas de diversa índole, en campos como ingeniería civil, mecánica, geotécnica, entre otras.

Contiene una serie de softwares que facilitan el trabajo, y se especializan en un campo en particular. El Midas Gen, es una herramienta para el análisis en construcción de edificios, con análisis geométrico no lineal, condiciones de frontera no lineal, colapso progresivo, construcción por etapas considerando las propiedades de los materiales que varían con el tiempo; así como la utilización de estándares de diferentes países, considerando las condiciones de diseño convencionales y no convencionales. El Midas Civil, se especializa en la ingeniería de puentes y tiene la capacidad para el modelado en 3D y los análisis y detalles en 2D. El Midas GTS NX, constituye una solución para la ingeniería de túneles y geotécnica; el programa genera de forma automática reportes de análisis prácticos y concisos que garantizan resultados lo más cercanos a la realidad posibles.

Para el estudio de la interacción suelo – estructura, el programa permite realizar un análisis detallado mediante la interrelación de los modelos de diseño de estructuras (Midas Gen y Midas Civil) y el modelo geotécnico (Midas GTS NX). El proceso consiste en la modelación del elemento que se desea construir, y la posterior creación de nodos que se hacen coincidir en el diseño del suelo; de esta manera, se pueden obtener resultados verídicos.

Este programa ofrece como ventaja el hecho de que permite la modelación de la estructura completa, sin importar su complejidad; el análisis detallado del suelo con sus diversas características; y la posterior integración de estos resultados en un mismo software, donde se

puede ver claramente la reacción que va a tener la obra ante cualquier cambio del suelo donde está construida.

1.4.5. Otros softwares

Existen otros softwares como el Geo5 y GeoStudio, que permiten realizar un análisis de la interacción de la estructura con el terreno, pero su alcance se restringe al vínculo suelo – cimentación. Esta limitación, impide la modelación de la estructura para su estudio en conjunto.

El software Robot Structural, al igual que el SAP 2000, realiza el análisis a través del coeficiente de Balasto, calculado a partir de los datos del terreno. Sin embargo, no se pueden modelar el suelo y la estructura como un conjunto.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se detallaron, de manera general las investigaciones más relevantes realizadas en el ámbito del estudio de la interacción suelo – estructura; se pudo arribar a las siguientes conclusiones:

- El análisis de la interacción suelo – estructura constituye un tema de vital importancia, cuyas soluciones han ido evolucionando a lo largo de los años, obteniendo experiencia y renovando constantemente el enfoque, según las necesidades que se tengan.
- Los puentes son una de las estructuras más susceptibles a los cambios ocasionados por el fenómeno de la interacción suelo – estructura.
- Los métodos que se emplean en el análisis de la interacción suelo – estructura son: Coeficiente de Balasto, Diferencias Finitas, Elementos de Contorno y Elementos Finitos; de los cuales, este último es el más exacto por sus ventajas.
- Los software que facilitan el análisis de la interacción suelo – estructura son: SAP 2000, Abaqus, Plaxis y Midas; este último tiene mayor ventaja ya que ofrece una solución más cercana a la realidad.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO –ESTRUCTURA A TRAVÉS DEL SOFTWARE MIDAS, CON BASE EN EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Introducción al capítulo

En el siguiente capítulo se describen los pasos empleados para el trabajo con los softwares Midas Civil y Midas GTS NX; con el objetivo de realizar un análisis no lineal de la interacción dinámica del suelo con la estructura, donde se tenga en cuenta el emplazamiento y la obra como un todo. Se elabora además, un esquema general para la integración de ambos programas. Se realiza la aplicación de este procedimiento a un caso de estudio específico. Por último, se establece una comparación entre el Método del Coeficiente de Balasto y el Método de Elementos Finitos, empleados en el estudio de la interacción suelo – estructura.

2.1. Procedimiento para el análisis de la interacción suelo – estructura

Para el análisis de la interacción suelo – estructura mediante el Método de Elementos Finitos, se modela primeramente la estructura (puente) en el software Midas Civil. Luego se importa a través del software Midas GTS NX. Se definen las propiedades del suelo. Por último se ejecuta el análisis para obtener las solicitaciones.

Las concepciones metodológicas empleadas para la elaboración del procedimiento, parten de los métodos para la realización de diagramas de procesos. El inicio y fin de la actividad se denotan con un óvalo y los pasos se delimitan con rectángulos. En este caso no existe bifurcación o toma de decisiones, por lo que esta parte no se contempla (Hermosilla Redondo, 2015).

Para construir adecuadamente un flujograma se deben realizar los siguientes pasos:

- Listar las actividades que conforman el proceso.
- Describir las actividades uniformemente y anotar puntos de decisión y actividades que deriven de las alternativas.
- Identificar los agentes que ejecutan cada actividad.
- Dibujar la secuencia de actividades.
- Añadir entradas y salidas.
- Revisión final y reflexión.

- Retroalimentación para mejora del proceso. (Hermosilla Redondo, 2015)

En este mapa se contemplan tres etapas que conforman el análisis de la interacción suelo – estructura:

- Etapa 1: Diseño de la estructura a través del software Midas Civil.
- Etapa 2: Modelación del suelo a través del programa Midas GTS NX.
- Etapa 3: Examen de los resultados.

Esto permite establecer comparaciones y llegar a las conclusiones esperadas. En la figura 2.1 se muestra el mapa de procesos antes descrito.

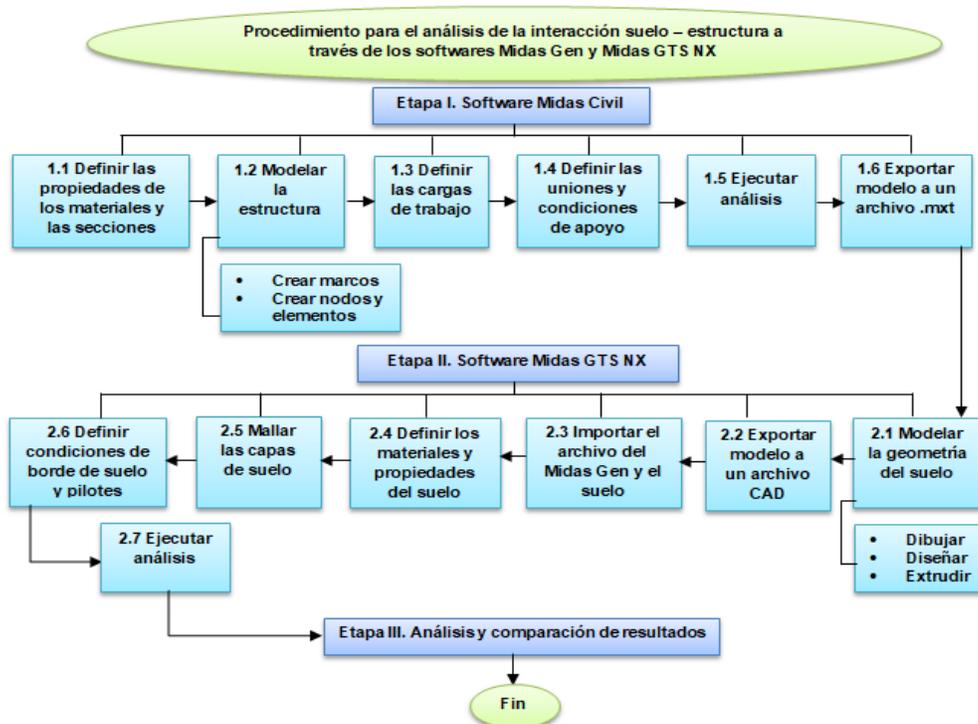


Figura 2.1 Esquema de procedimiento para el análisis de la interacción suelo – estructura a través de los softwares Midas Civil y Midas GTS NX. (Fuente: Elaboración propia)

2.1.1. Esquema de trabajo modelo – estructura en el software Midas Civil (Etapa I)

Una vez cargado el programa se definen las unidades en que se quiere trabajar, esta opción se encuentra en la esquina inferior derecha del área de trabajo. Entonces se procede a modelar la estructura deseada (Ver figura 2.2).

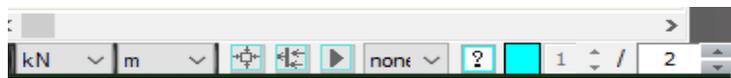


Figura 2.2 Definición de unidades de trabajo.

Para comenzar, se definen las características del material que se emplea, las dimensiones de las secciones y el grosor de paredes y losas. Esto se realiza mediante la opción *Properties* (Ver figura 2.3).

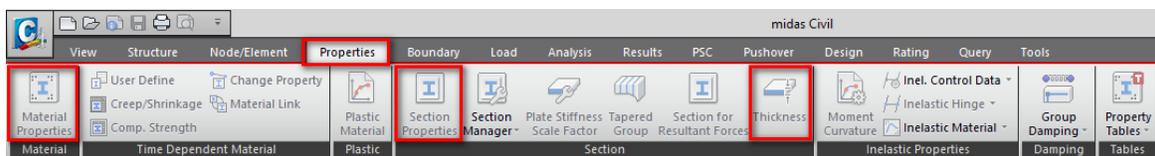


Figura 2.3 Herramienta para definir de las propiedades del material y las secciones.

Las herramientas *Structure* y *Node/Element* permiten modelar la estructura con las características deseadas. Mediante la primera, se puede dibujar teniendo como base un marco o emplear un wizard que permite diseñar un puente solo con introducir los datos, lo cual facilita el trabajo. La segunda, ofrece opciones para la creación y edición de nodos, elementos o mallado (Ver figuras 2.4 y 2.5).

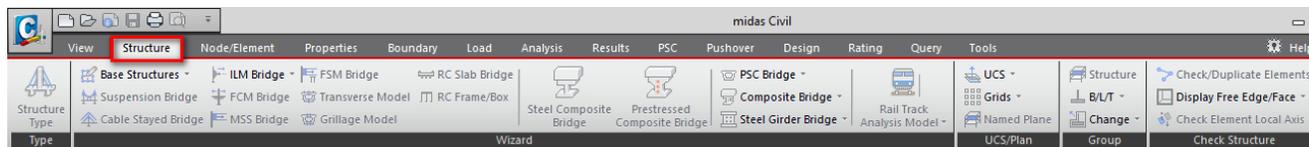


Figura 2.4 Herramientas para la creación de marcos.

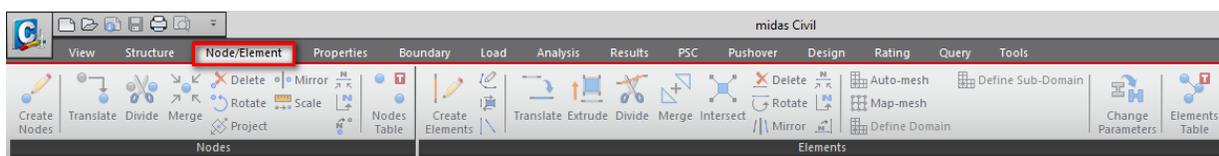


Figura 2.5 Herramientas para la creación de nodos y elementos.

Se definen los casos de cargas y las combinaciones a emplear a través de la herramienta *Load*. Luego estas cargas son aplicadas a la estructura (Ver figura 2.6).

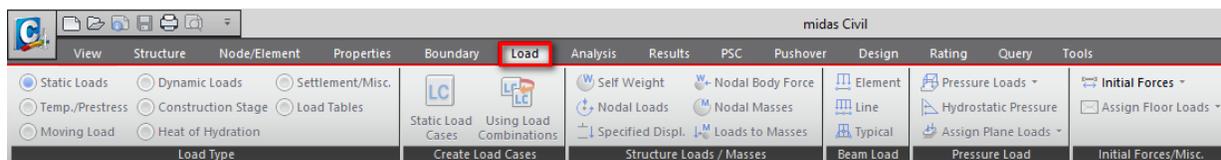


Figura 2.6 Herramientas para la definición de cargas de trabajo.

Las condiciones de apoyo y de borde se definen mediante la opción *Boundary* (Ver figura 2.7).

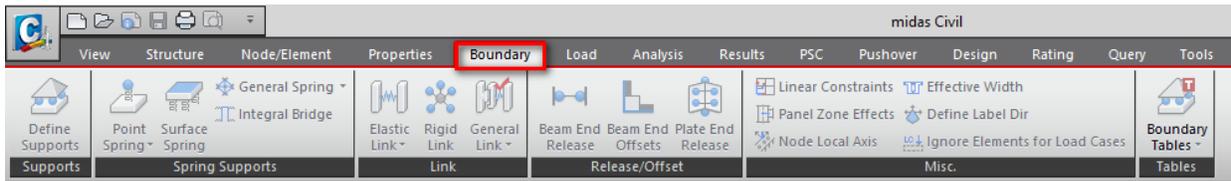


Figura 2.7 Herramientas para la definición de uniones y apoyos.

A partir de los datos introducidos el programa es capaz de generar resultados que nos permiten un análisis del comportamiento de la estructura. Se muestran los diagramas con las solicitaciones para las distintas combinaciones de carga; los esquemas de deformaciones y desplazamientos; las reacciones, así como las tablas de estos valores (Ver figura 2.8).



Figura 2.8 Herramienta para ejecutar análisis del proyecto.

Al finalizar, se exporta el modelo a un archivo con extensión *.mxt*, que luego podrá ser importado a través del Midas GTS NX.

2.1.2. Esquema de trabajo modelo estructura en el software Midas GTS NX (Etapa II)

Primeramente se modelan las diferentes capas de suelo teniendo en cuenta las características de los estratos. Esto se logra a través de la herramienta *Geometry*, que ofrece una serie de comandos para facilitar el dibujo (Ver figura 2.9).



Figura 2.9 Herramientas de dibujo.

Este modelo debe ser exportado como un archivo CAD, para ser empleado más adelante en la interacción suelo – estructura.

Se importa el modelo del Midas Civil, el cual debe haberse exportado con un formato *.mxt*. El programa conserva todas las propiedades, características y condiciones del diseño realizado.

Se definen las características de las diferentes capas de suelo que se desea modelar. Para ello se encuentra la opción *Material* dentro de la herramienta *Mesh*. Existe una gran variedad

de modelos constitutivos, y dependiendo del que se escoja, hay diversas opciones de los parámetros a definir. También se pueden de importar las características desde Excel (Ver figura 2.10).

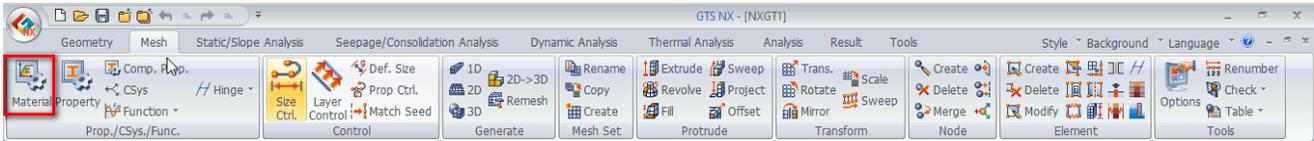


Figura 2.10 Herramienta para definir propiedades del material.

A través de la opción *Property*, se asignan los materiales creados a un elemento específico. Como la estructura ya está diseñada, se crean dos propiedades, una en 2D y una en 3D, que serán aplicadas al mallado del suelo (Ver figura 2.11).

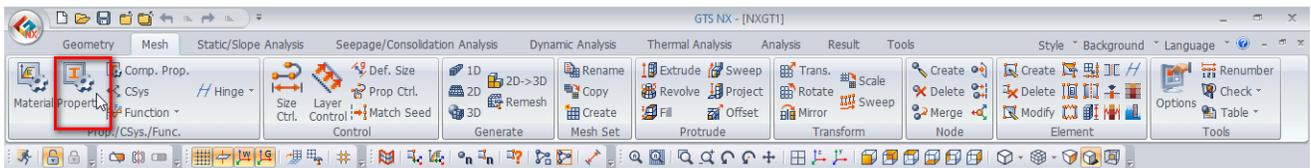


Figura 2.11 Herramienta para definir las propiedades de los elementos.

Se importa el archivo previamente exportado desde el Midas GTS NX y se hace coincidir el suelo con la estructura del puente.

Se procede al mallado del suelo a través de la herramienta *Mesh*, haciendo coincidir primeramente la capa del suelo que está en contacto con la estructura, con los nodos de la misma, mediante el mallado 2D. Luego se realiza el mallado de las diferentes capas de suelo, con el mallado 3D, verificando que coincidan los nodos (Ver figura 2.12).

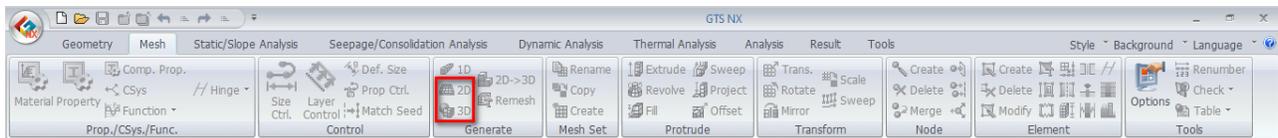


Figura 2.12 Herramientas para el diseño del mallado.

A partir de este diseño se definen las condiciones de contorno del suelo y de los pilotes, ya que las características del diseño previo, mediante la herramienta *Static/Slope Analysis* (Ver figura 2.13)

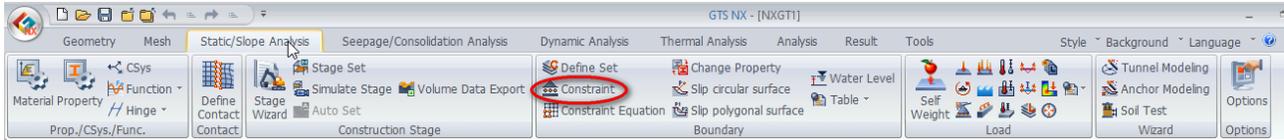


Figura 2.13 Definición de condiciones de contorno.

Se crea entonces un caso de estudio definiendo las cargas y condiciones de contorno a analizar. Luego se ejecuta el análisis y se obtienen los resultados. Se pueden realizar todo tipo de comparaciones (Ver figura 2.14).



Figura 2.14. Herramienta para ejecutar análisis.

2.2. Aplicación del procedimiento al caso de estudio: Puente sobre el río Cabañas.

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

Encima del mismo se apoyan las vigas de la superestructura con sus respectivos aparatos de apoyo que consisten en planchas de neopreno. El tablero está compuesto por losas prefabricadas que se apoyan en las vigas y que funcionan como cofre para la fundición superior del tablero que se encarga de unir todos estos elementos logrando un vínculo entre ellos y que los obliga a trabajar como un emparrillado, garantizando la rigidez de la superestructura.

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

El área objeto de estudio se encuentra ubicada aguas arriba y próxima al antiguo puente colapsado sobre el río Cabañas, en la ciudad cabecera del municipio Moa. En el informe de la (ENIA, 2017) fue determinado el corte ingeniero – geológico hasta una profundidad de 30.00 m (Ver figura 2.15). A partir de los resultados obtenidos se pudo conocer

que el mismo está conformado por 5 capas, las cuales se describen en la Tabla 2.1. Los niveles freáticos oscilan entre 4.80 y 5.00 m (Ver perfil ingeniero – geológico, Anexo 1).

Tabla 2.1 Propiedades de los estratos

Suelos	Relleno	S ₁	S ₂	S _{2a}	S ₃	S ₄	S ₅
Descripción	Suelo laterítico redepositado, de composición arenosa arcillosa y/o limosa.	Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas.	Arcilla de alta plasticidad con arena.	Mezcla de arena arcillosa y/o limosa con algunas gravas.	Arcilla de baja plasticidad con diferentes contenidos de arena.	Arena con contenido variable de limo y grava.	Serpentinita y/o peridotita serpentizada.
Propiedades							
Peso específico del suelo (Gs) (kN/m³)	25	27,1	27,2	27,3	27,1	26,9	27
Humedad natural (ω) (%)	32	31,2	34,8	25,6	37,8	23,7	1,2
Peso específico húmedo (γ_t) (kN/m³)		18,6	18,7	18,5	18,5		22,3
Peso específico seco (γ_d) (kN/m³)		13,9	13,1	13,6	13,3		22
Índice de poros (e)	0,95	0,96	1	1	1,03	1	1
Saturación (S) (%)		88	89	70	99		14
Ángulo de fricción interna (φ) (°)	5	5	10	6	21	35	
Cohesión (C) (kPa)	15	15	43	11	19	10	
Módulo de deformación (E) (kPa)	5800	5716	9423	6229	8447	5000	2346
Coefficiente de poisson (μ)	0,35	0,3	0,38	0,3	0,41	0,3	0,1
Peso específico saturado (γ_{sat}) (kN/m³)	10,3	10,31	10,28	10,37	10,25	10,41	17,78



Figura 2.15 Ubicación de las calas.

2.2.1. Modelo del puente en Midas Civil

Para comenzar se definen las unidades de trabajo y los materiales a emplear. A continuación se muestran los mismos (Ver figura 2.16).

Tabla 2.2 Materiales

Materiales	Peso específico (γ_{esp}) (kN/m ³)	Módulo de deformación (E) (kN/m ²)	Coefficiente de poisson (μ)	Resistencia a la compresión (f'c) (Mpa)	Fluencia (fy) (kN/m ²)
Hormigón 30 MPa "in situ"	24	25 742 960	0,17	30	
Hormigón 30 MPa prefabricado	25	25 742 960	0,17	30	
Acero G-40	78,5				300 000

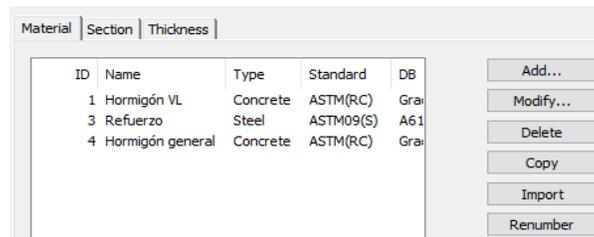


Figura 2.16 Definición de materiales

Se definen las propiedades de las secciones de las vigas, cabezales, pilotes; así como el espesor de la losa y los estribos (Ver figura 2.17).

Tabla 2.3 Secciones

Secciones	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Diámetro
Losa	48	11,8	0,18	
Vigas	16	0,4	0,75	
Cabezales	11,8	0,7	0,7	
Pilotes	25			0,6
Estribos	2,5 – 3	4	0,4	

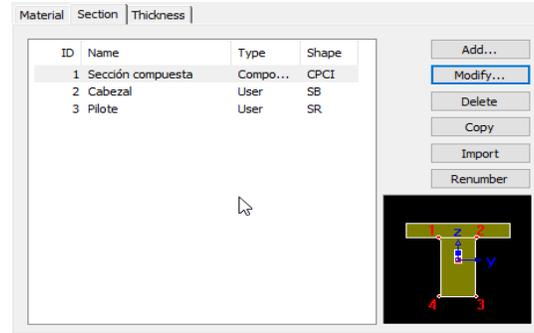
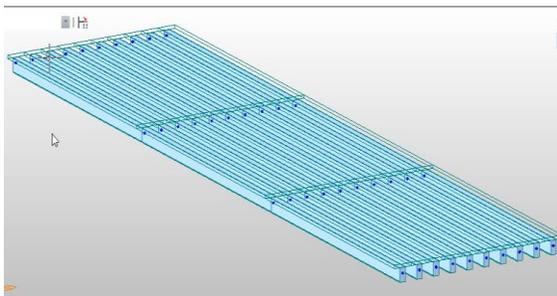
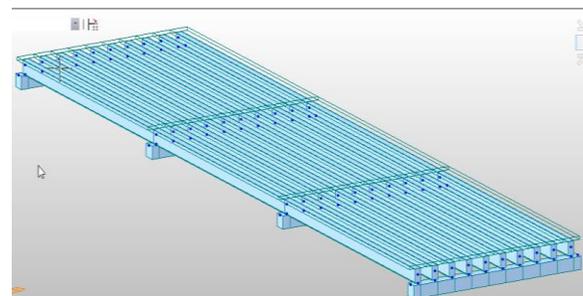


Figura 2.17 Definición de secciones

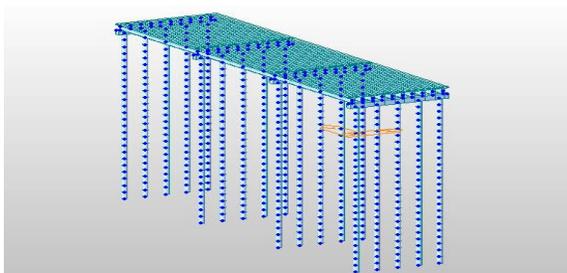
Se modela geoméricamente el puente a través de las distintas herramientas que ofrece el programa. Para ello se colocan las secciones compuestas (viga – losa), ya que funcionan como un todo una vez fundida “in situ” la losa. Se crean los cabezales y a partir de estos se extruden los pilotes. Por último se dibujan los estribos (Ver figura 2.18).



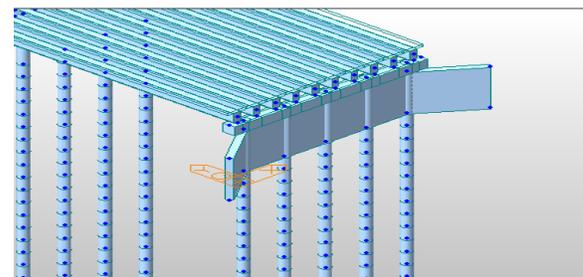
a) Sección compuesta (viga – losa)



b) Cabezales



c) Pilotes



d) Estribos

Figura 2.18 Modelación del puente

A continuación se definen las uniones y condiciones de apoyo. Las vigas están unidas a los cabezales por medio de planchas de neopreno, lo cual se considera en el programa como un

Elastic link (Unión elástica). Mientras que los pilotes, al ser empotrados, tienen restringidos todos sus grados de libertad (Ver figura 2.19).

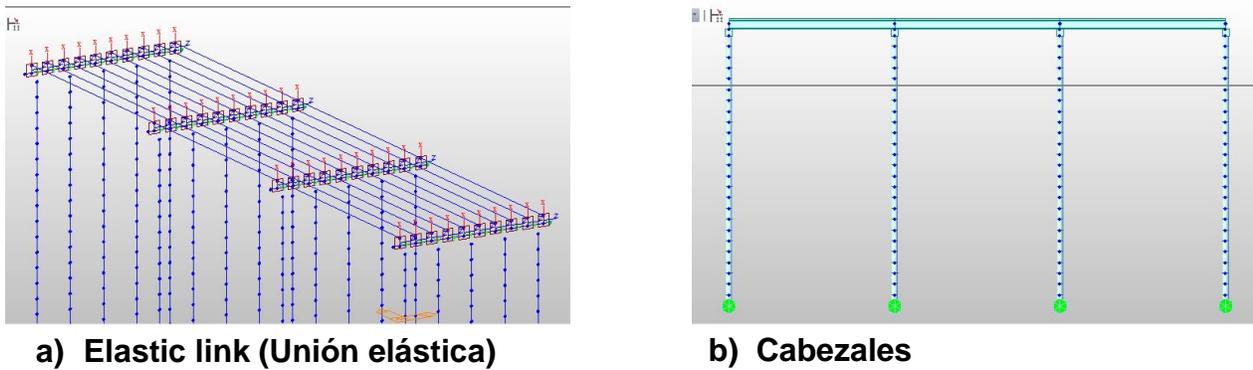


Figura 2.19 Uniones y condiciones de apoyo

Se especifican los casos de carga, y se procede a aplicar las mismas a la estructura (Ver figura 2.20). En la Tabla 2.4 se muestran los valores obtenidos.

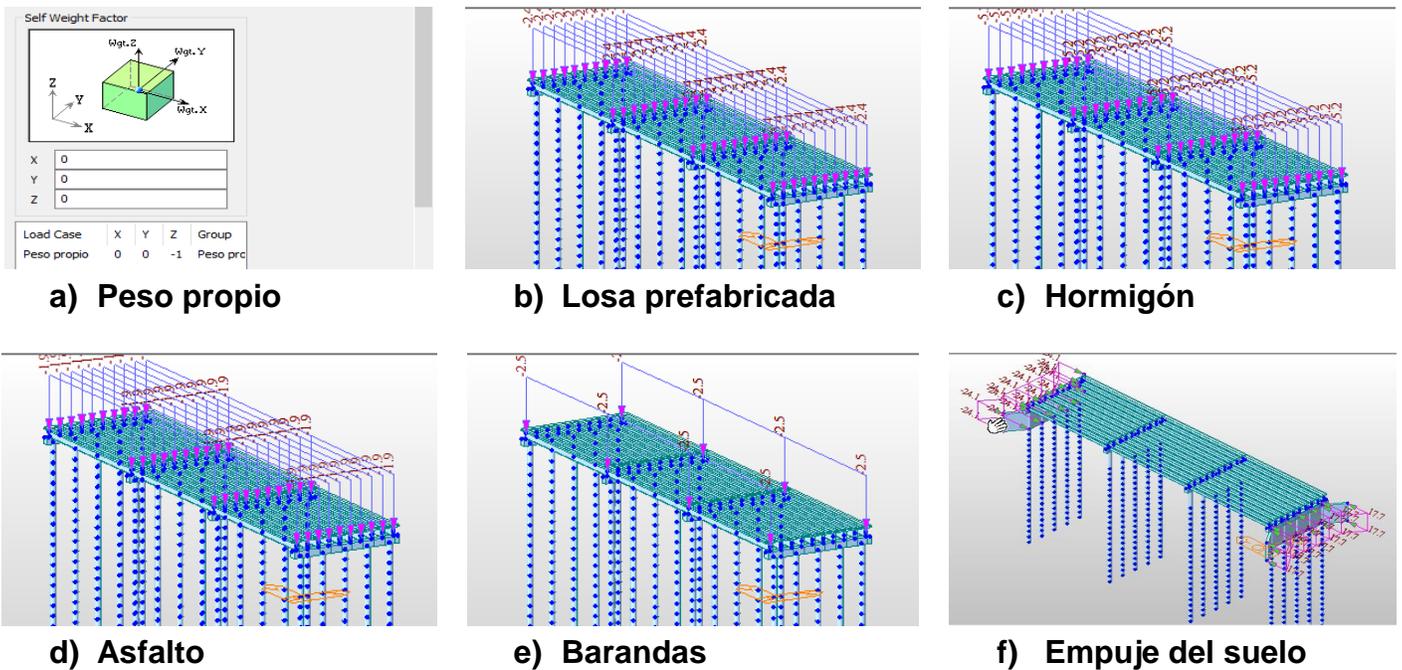
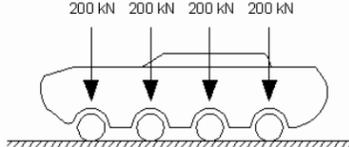
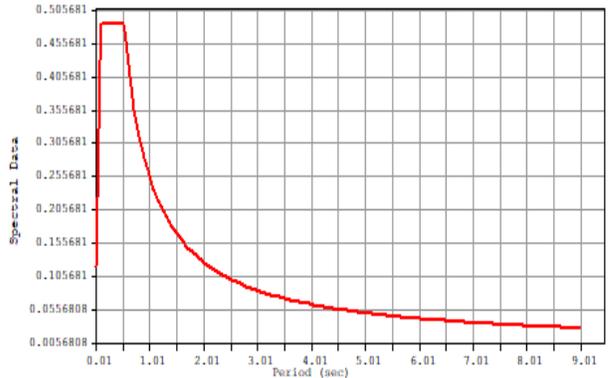


Figura 2.20 Aplicación de cargas

Una vez modelada la estructura del puente se exporta el proyecto como un archivo con extensión .mxt, para garantizar su fusión con el Midas GTS NX.

Tabla 2.4 Cargas

Tipos de carga	Cargas	Procedimiento	Resultados
Muerta	Peso propio	Calculado por el programa	Calculado por el programa
	Losas prefabricadas	$\gamma_{esp} \cdot e \cdot b$ $= 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,08 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m}$	2,4 kN/m
	Hormigón	$\gamma_{esp} \cdot e \cdot b$ $= 24 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m}$	5,184 kN/m
	Asfalto	$\gamma_{esp} \cdot e \cdot b$ $= 20 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,08 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m}$	1,92 kN/m
	Barandas	$(\gamma_{bar} \cdot e \cdot b) + (\gamma_{col} \cdot e \cdot b)$ $= (15 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m})$ $+(15 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 0,72 \text{ m})$	2,535 kN/m
Viva	Vehicular	Vehículo NK-80	 <p>Disposición longitudinal de la carga NK-80. Fuente: Fuente especificada no válida.</p>
Empuje del suelo	Empuje del suelo	Empleo de las ecuaciones de Mononobe – Okabe, Fuente especificada no válida.	Estribo derecho: 17,71 kN/m ² Estribo izquierdo: 24,15 kN/m ²
Sísmica	Espectro	Suelo: C $S_0 (g) = 0,227$ $S_s (g) = 0,404$ $S_1 (g) = 0,156$ $T_{\text{máx}} (s) = 9$ $T_0 (s) = 0,129$	

2.2.2. Modelo del suelo en Midas GTS NX

Para comenzar la modelación del suelo en el Midas GTS NX, se definen las unidades de trabajo y se crean los distintos estratos (Ver figura 2.21), según el perfil ingeniero – geológico (Ver Anexo 2). Este procedimiento se realiza a través de la herramienta *Bedding plane* (Planos de estratos).

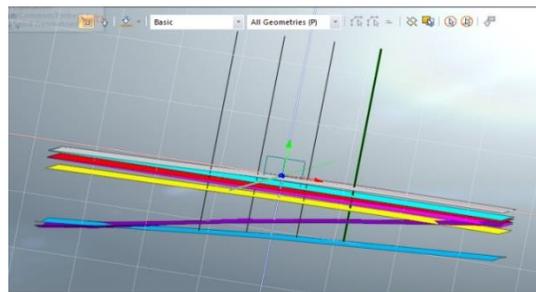
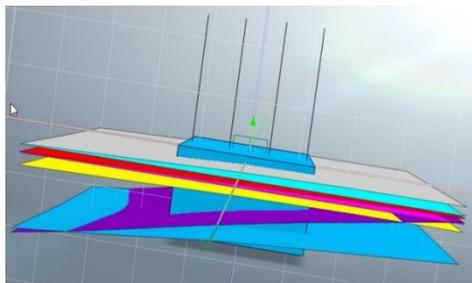
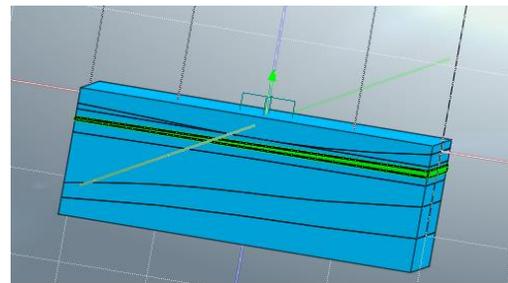


Figura 2.21 Modelación de estratos

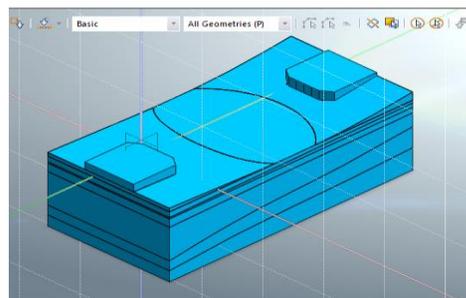
Se modela el suelo con las distintas herramientas de dibujo. Luego se colocan los estribos teniendo en cuenta la distancia a la que va a estar emplazado el puente (Ver figura 2.22). Por último, se exporta el proyecto como un archivo CAD, para importarlo más adelante y analizar la estructura y el suelo como un conjunto.



a) Herramienta *Surface and solid*



b) Herramienta *Divide*



c) Estribos

Figura 2.22 Modelación del suelo

2.2.3. Análisis de la incidencia de la interacción suelo – estructura

Para comenzar el análisis, se importa el archivo del puente a través del Midas GTS NX (Ver figura 2.23) y se definen los materiales y propiedades del suelo (Ver figura 2.24).

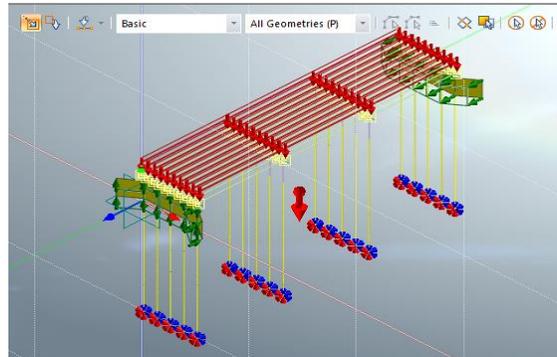
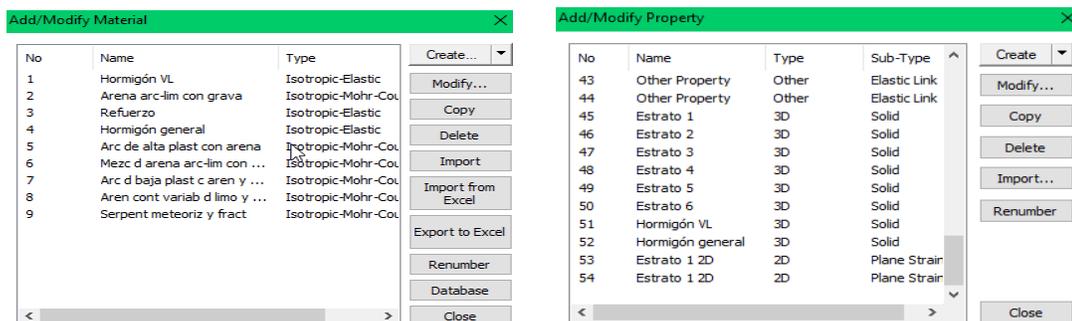


Figura 2.23 Archivo importado desde el Midas Gen



a) Materiales

b) Herramienta *Divide*

Figura 2.24 Definición de los materiales

Se importa el archivo CAD exportado anteriormente desde el programa. Luego se procede a mallar los estribos y los diferentes estratos, esto se hace para establecer la conexión entre el puente y las capas del suelo (Ver figura 2.25).

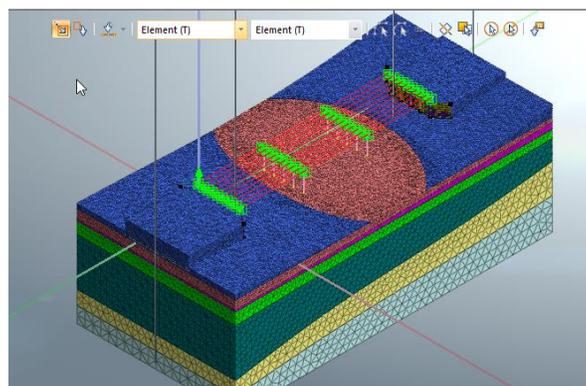


Figura 2.25 Mallado del suelo

Se establecen las condiciones de borde del suelo y de los pilotes, que garantizan un correcto análisis por parte del programa (Ver figuras 2.26).

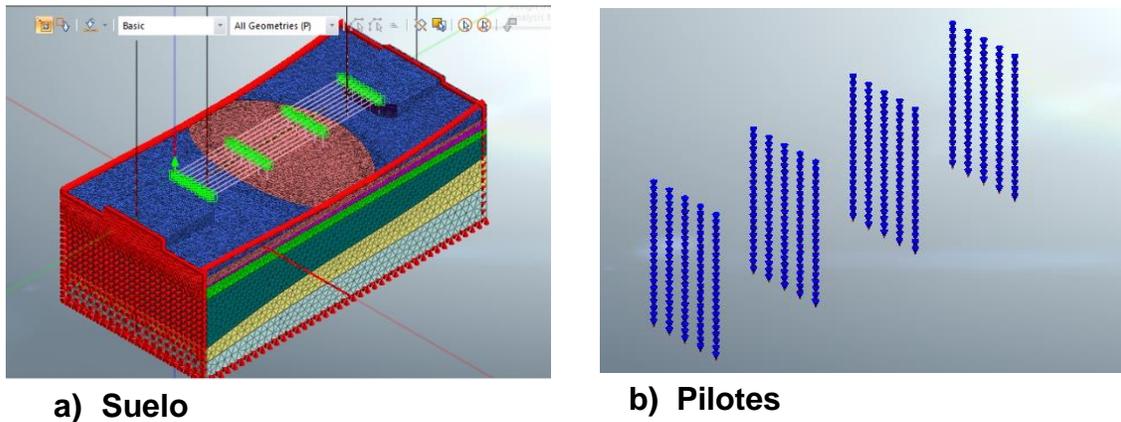


Figura 2.26 Condiciones de borde

Por último, se define el caso de análisis. Se pueden configurar varios tipos, como el Análisis del Espectro de Respuesta, el Análisis Tiempo Historia, el Análisis de las Etapas Constructivas, entre otros (Ver figura 2.27).

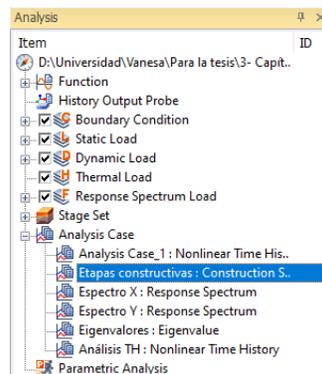
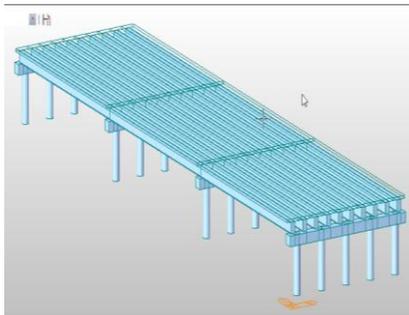


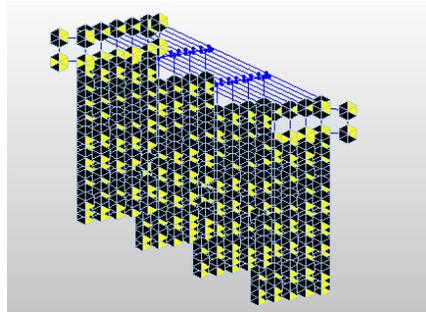
Figura 2.27 Definición de casos de análisis.

2.2.4. Resultados y análisis de los resultados

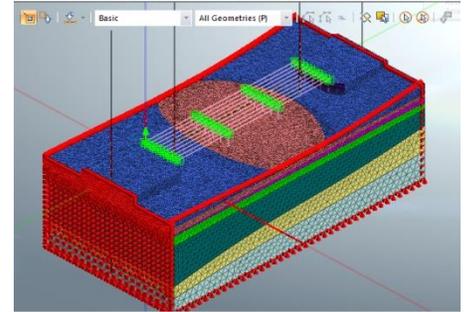
Una vez ejecutado el programa, se procede a analizar a través de la comparación los resultados de la Respuesta del Espectro de Diseño. En lo adelante se denomina como Modelo 1, el que no considera la interacción suelo – estructura; como Modelo 2, el que tiene en cuenta esta relación, con base en el Método del Coeficiente de Balasto; y como Modelo 3, el que se basa en el Método de Elementos Finitos y considera el emplazamiento como un todo integrado. Estos se muestran a continuación (Ver figura 2.28)



1) Análisis sin considerar la ISE



2) Análisis considerando la ISE mediante el MCB



3) Análisis considerando la ISE mediante el MEF

Figura 2.28 Modelos de análisis

• Análisis de las solicitaciones para el Espectro de Diseño

Con los datos obtenidos se analizan los valores de axial, cortante y momento para cada caso de estudio. Para ello se representan mediante gráficos las solicitaciones máximas considerando el espectro en ambas direcciones (Ver gráficos 2.1; 2.2 y 2.3).

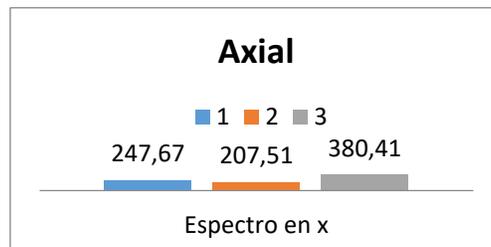


Gráfico 2.1 Axial máximo espectro en x



Gráfico 2.2 Cortante máximo espectro en x



Gráfico 2.3 Momento máximo espectro en x

Para el Espectro en x, la carga axial reporta mayores solicitaciones cuando se emplea el Método de Elementos Finitos que en los demás casos. Se puede observar que el Modelo 3 tiene un aumento del 54% con respecto al 2 y de un 83 % sobre el tradicional.

Los valores de cortante en el sentido de la dirección x, son superiores en el Modelo con base en el Método de Elementos Finitos con relación al Modelo tradicional, sin embargo, con respecto al Modelo con resortes son inferiores; mientras que para el cortante en el eje y, se acrecienta en ambos casos. En el sentido del eje x se observa un aumento de 3195 % en el Modelo 3 con respecto al 1; mientras que con respecto al 2, tiene una disminución del 11 %. En el sentido del eje y, el cortante se incrementa en un 18 % para el tercer Modelo con respecto al primero, y en un 50 % con relación al segundo.

El momento experimenta un aumento en las tres direcciones. En el eje x, tiene una acentuación considerable de 33683,3 % en el Modelo 3 con respecto al 1, mientras que con relación al 2 se acrecienta en un 83 %. En el eje y, existe un aumento de un 53 % el tercer Modelo con relación al primero y de un 80 % con respecto al segundo. En z, hay un aumento de 3292,4 % en el Modelo 3 con respecto al 1 y de un 183 % con relación al 2.



Gráfico 2.4 Axial máximo espectro en y

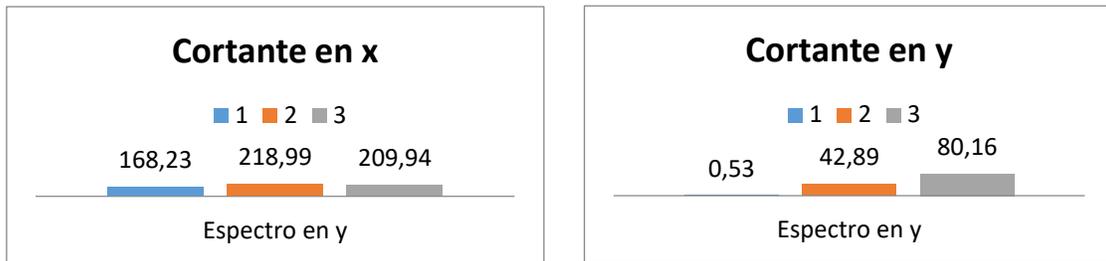


Gráfico 2.5 Cortante máximo espectro en y



Gráfico 2.6 Momento máximo espectro en y

Para el Espectro en y, la carga axial reporta mayores solicitaciones cuando se emplea el Método de Elementos Finitos que en los demás casos. Se puede observar que el Modelo 3 tiene un aumento de 54 % con respecto al 2 y de un 42 % sobre el tradicional.

Los valores de cortante en el sentido de la dirección x, son superiores en el Modelo con base en el Método de Elementos Finitos con relación al Modelo tradicional, sin embargo, con respecto al Modelo con resortes son inferiores; mientras que para el cortante en el eje y, se acrecienta en ambos casos. El cortante en el sentido del eje x se observa un aumento de 25 % en el Modelo 3 con respecto al 1; mientras que con respecto al 2, tiene una disminución del 4 %. En el sentido del eje y, el cortante se incrementa en un 15024,5 % para el tercer Modelo con respecto al primero, y en un 87 % con relación al segundo.

El momento en x, experimenta un aumento en el Modelo con base en el Método de Elementos Finitos, con respecto al Modelo tradicional, y una disminución con respecto al Modelo que emplea el coeficiente de Balasto; en y, existe un acrecentamiento con relación a los otros dos y en z un decrecimiento. En la dirección x, tiene un aumento de 93 % en el Modelo 3 con respecto al 1, mientras que con relación al 2 disminuye en un 30 %. En el eje y existe un

aumento de un 1490 % el tercer Modelo con relación al primero y de un 144 % con respecto al segundo. En z, hay una disminución de 72 % en el Modelo 3 con respecto al 1 y de un 72 % con relación al 2.

- Análisis de los desplazamientos y las rotaciones para el Espectro de Diseño**

Se realiza un estudio de los desplazamientos y rotaciones máximas para cada Espectro de Diseño (Ver figura 2.29). Estos valores se representan en gráficos a continuación.

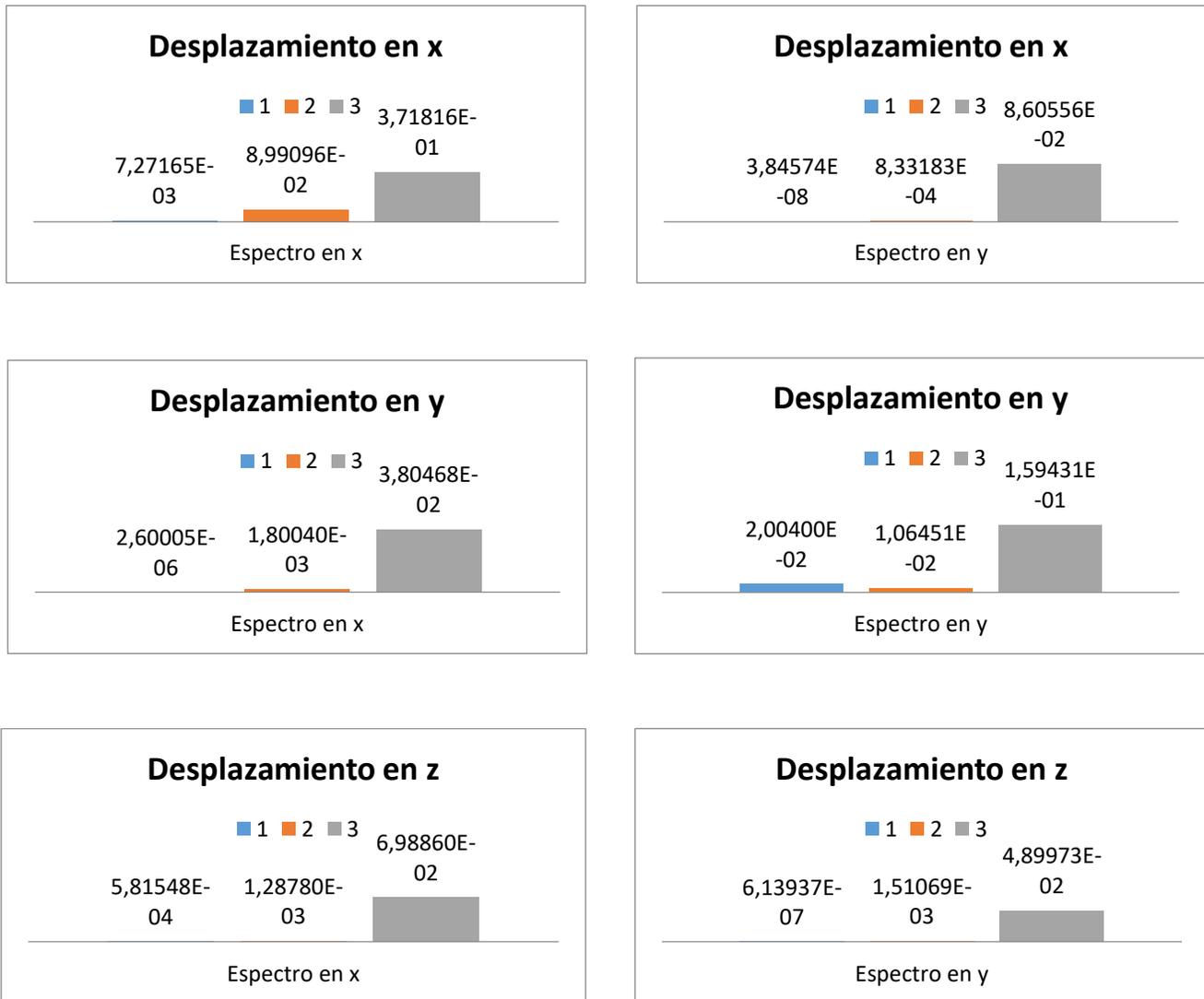


Gráfico 2.7 Desplazamiento máximo para ambas direcciones del espectro

Se puede apreciar que los desplazamientos son superiores cuando se analizan el suelo y la estructura como un todo. Esto demuestra la importancia de considerar en los modelos la

interacción de la obra con el emplazamiento donde va a ser construida, pues nos permite obtener resultados más cercanos a la realidad.

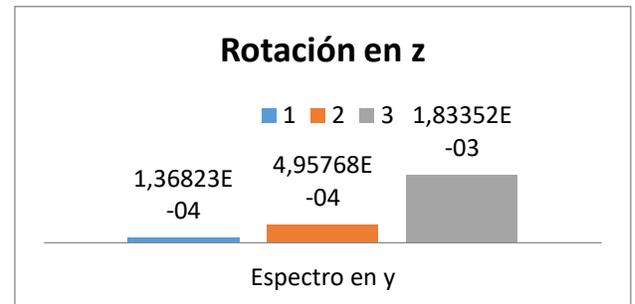
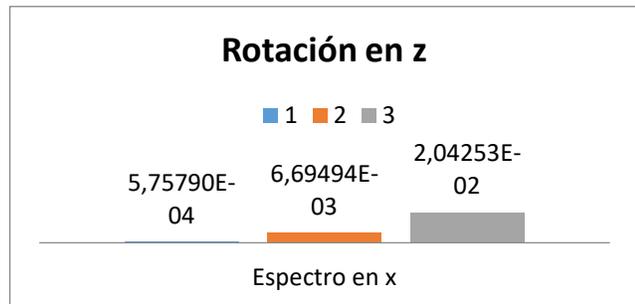
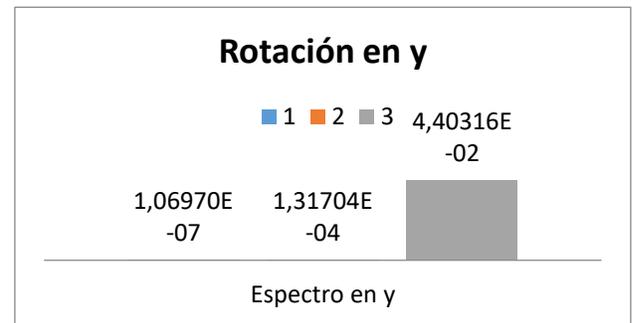
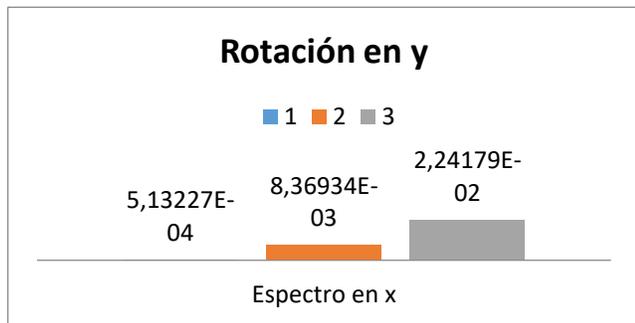
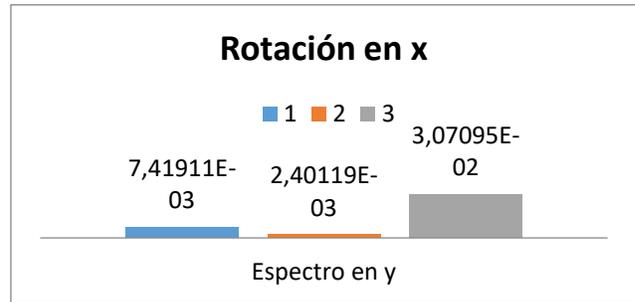
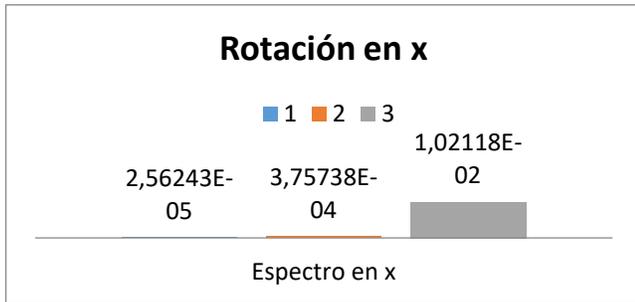


Gráfico 2.9 Rotación máxima para ambas direcciones del espectro

En las rotaciones, se observa un acrecentamiento cuando se emplea el análisis mediante el Método de Elementos Finitos con respecto a los demás. Es por ello que el mismo presenta grandes ventajas, ya que nos ofrece valores que describen más acertadamente el verdadero comportamiento del suelo y la estructura en su conjunto.

Conclusiones del capítulo

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

- La modelación del puente sobre el río Cabañas para la inclusión de la interacción suelo – estructura, con la integración de los softwares Midas Civil y Midas GTS NX, permitió analizar la incidencia de este fenómeno en condiciones más reales.
- Al evaluar el comportamiento del puente ante la respuesta del Espectro de Diseño, mediante la comparación entre la estructura sin tener en cuenta el suelo y considerando el mismo mediante el Método del Coeficiente de Balasto y el Método de Elementos Finitos, se pudo apreciar un aumento en la fuerza axial y variaciones en el momento y el cortante, para este último.
- En cuanto al desplazamiento y la rotación, se observa un incremento significativo cuando se emplea el Método de Elementos Finitos, lo cual demuestra la necesidad de analizar el suelo y la estructura como un todo.

CONCLUSIONES

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

1. El análisis bibliográfico de la literatura especializada confirmó la existencia de una base teórica, metodológica y práctica sobre incidencia de la interacción dinámica suelo – estructura y su influencia en puentes de hormigón, que en la mayoría de los enfoques estudiados ha sido tratada con base en el Método del Coeficiente de Balasto, el cual se limita al análisis estático lineal; lo que evidencia carencias en este sentido.
2. El procedimiento para el estudio de la interacción suelo - estructura basado en el Método de Elementos Finitos, constituye una herramienta metodológica que garantiza un diseño más favorable, ya que permite el análisis desde el punto de vista de un modelo real (comportamiento no lineal dinámico).
3. La aplicación del procedimiento permitió realizar la modelación del sistema integral puente – cimentación – estructura, mediante la integración de los softwares Midas Civil y Midas GTS NX.
4. En el análisis dinámico lineal, mediante la comparación entre las solicitaciones de la estructura sin tener en cuenta el suelo, y considerándolo con base en el Método del Coeficiente de Balasto y en el Método de Elementos Finitos, se puede apreciar un aumento de la carga axial de este último con respecto a los demás, así como variaciones significativas en el cortante y el momento.
5. Los desplazamientos y rotaciones sufren un incremento cuando se emplea el Método de Elementos Finitos, demostrando así la necesidad de tener en cuenta en el análisis la modelación del suelo y la estructura como un todo, y corroborando por tanto la hipótesis planteada.

RECOMENDACIONES

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

1. Incorporar los resultados de la modelación para el diseño sismorresistente de puentes en las empresas de proyecto.
2. Continuar profundizando la incidencia de la interacción suelo – estructura a partir del análisis no lineal en el tiempo.
3. Extender el análisis a otros puentes ubicados en zonas sísmicas y con condiciones geotécnicas desfavorables.

BIBLIOGRAFÍA

- Abril Ronderos, A. E. (2019). *Estudio y modelación por elementos finitos de la interacción acero - concreto de las tuberías embebidas en concreto*. Bogotá D.C.
- Alfaro Quispe, G. L., & Copello Muñante, R. M. (2017). *Comparativo de análisis estructural considerando la ISE vs. empotrado*. Lima.
- Arzuaga Turro, C. L. (2018). *Evaluación de la interacción sísmica suelo - estructura en edificio Forsa. Caso de estudio 3D pantalla modificado*. Holguín, Cuba.
- Avilés, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias para la interacción dinámica suelo - estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica*.
- Bautista García, D. A. (2010). *Estudio de las afecciones al entorno de un túnel urbano*. Cataluña.
- Candebat Sánchez, D., & Godínez Melgares, G. (2013). Retos del diseño sísmico en puentes de hormigón en Cuba. *Ciencia en su PC*.
- Clero Jiménez, B., López Martín, D., & Rodríguez Plasencia, G. (2020). Estudio de la interacción suelo estructura de una cimentación aislada mediante simulación numérica. *Universidad y ciencia*, 160-172.
- Cortés Mena, J. G. (2010). *Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de Balasto*. Costa Rica.
- Danna, J. A. (2017). *Caracterización y evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes*. San Miguel de Tucumán.
- de Zayas Nuñez, P. M. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad estructural y geotécnica con interacción dinámica suelo - estructura en el Puente sobre el río Cabañas, Moa*. Holguín, Cuba.
- Delgado, P. A. (2014). *Diseño alternativo de cimentaciones superficiales por estado límite*. Matanzas: Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas.
- García Solano, J. (2012). *Evaluación de daño en edificios considerando los efectos de la interacción suelo - estructura*. México D.F.

- Grand Barros, J. P. (2019). *Estudio de la interacción suelo - estructura de un puente carretero de Chile central considerando los efectos de sitio*. Santiago de Chile.
- Gutiérrez Martínez, L. F. (2019). *Efectos de la interacción suelo - estructura estática en los elementos mecánicos de las estructuras*. México D.F.
- Kant Mittal, R., Rawat, A., & Rawat, S. (2016). Soil Structure Interaction in Indian Seismic code: Recommendations for inclusion of potencial factors. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 124-130.
- León Alvarado, J. P. (2011). *Interacción estática suelo - estructura análisis con el Método de Elementos Finitos*. Cuenca, Ecuador.
- López López, D. S. (2020). *Análisis de la respuesta dinámica estructural considerando los efectos de la interacción suelo estructura*. Universidad.
- Marín Guillén, F. (2019). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos*. Lima, Perú.
- Martínez Sánchez, J. (2014). *Influencia de la interacción suelo estructura en el comportamiento dinámico de estructuras sometidas al paso de cargas móviles*. Sevilla.
- Mejías Bahamón, N. A. (2018). *Análisis de la interacción suelo - estructura en conjunto con un análisis push over en una edificación de 10 pisos*. Bogotá D. C., Colombia .
- Mercedes, P. (2019). *Interaccion suelo estructura* . Holguin, Cuba: Cuba.
- Moreno de Luca, L. (2010). *Efectos asociados con la Interacción suelo - estructura en el diseño de edificaciones de concreto reforzado en bucaramanga*. Bucaramanga.
- Paico Amaya, E. J. (2021). *Influencia de la Interacción suelo - estructura en edificaciones regulares e irregulares*. Piura, Perú.
- Palacios, E. C. (2010). *Estudio comparativo de cimentaciones aisladas en la ciudad de Cuenca diseñadas por el método de la presión admisible con los obtenidos aplicando el método de los estados límites*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

- Parra Chamorro, C. A. (2016). *Aplicaciones de Abaqus a la mecánica de fractura en estructuras portantes de mampostería*. Valparaíso.
- Puma Álvarez, E. E. (2017). *Efectos de la interacción suelo - estructura en la cimentación compartida por bloques independizados con junta sísmica*. Lima, Perú.
- Ramos Wendehake, R. (2017). *Interacción suelo - estructura, comparación entre el Método del Coeficiente de Balasto y el Método de Elementos Finitos*. Barcelona.
- Rodríguez Ordóñez, J. A. (2005). *Análisis de la Interacción suelo - estructura para refuerzo de suelos fisurados*. Bogotá, Colombia.
- Rojas, K., Lehmann, L., & Cerrolaza, M. (2008). *Un método de acople para MEF - MEC para interacción suelo - estructura*. Venezuela.
- Soriano, A. (1989). *Física de la tierra*. Madrid.

ANEXOS

Anexo 1. Características estructurales del Puente sobre el río Cabañas

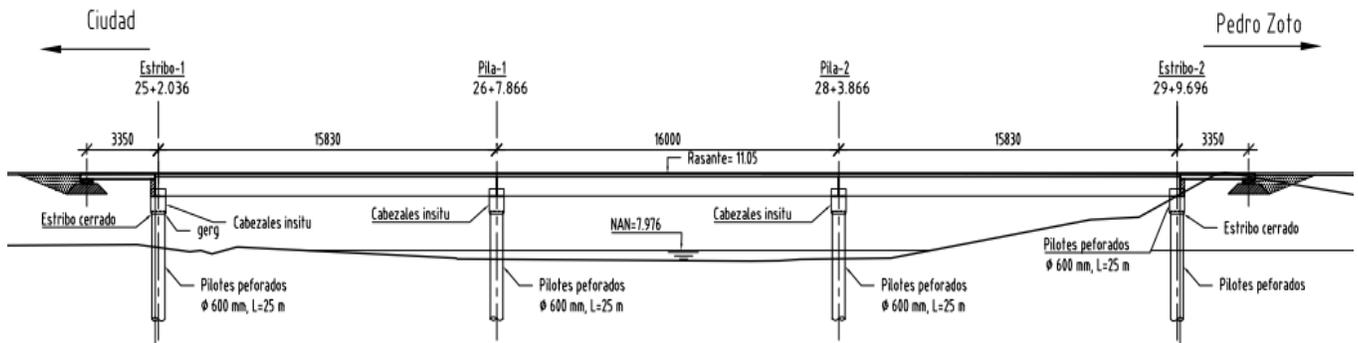


Figura 31. Elevación longitudinal del puente

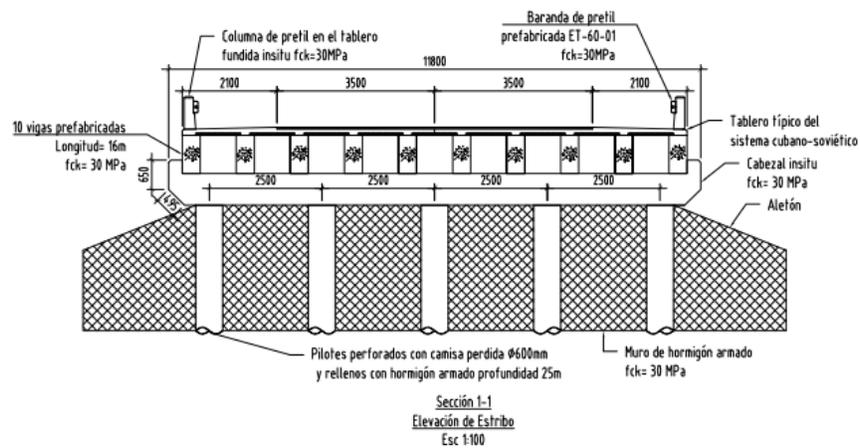


Figura 32. Elevación transversal estribo

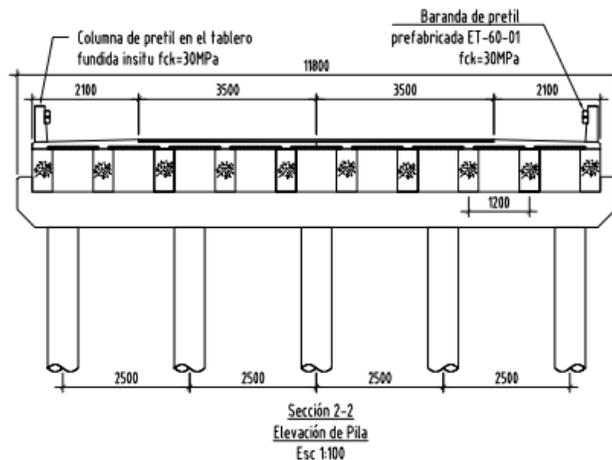


Figura 33. Elevación transversal pila

Anexo 2. Perfil ingeniero – geológico del suelo

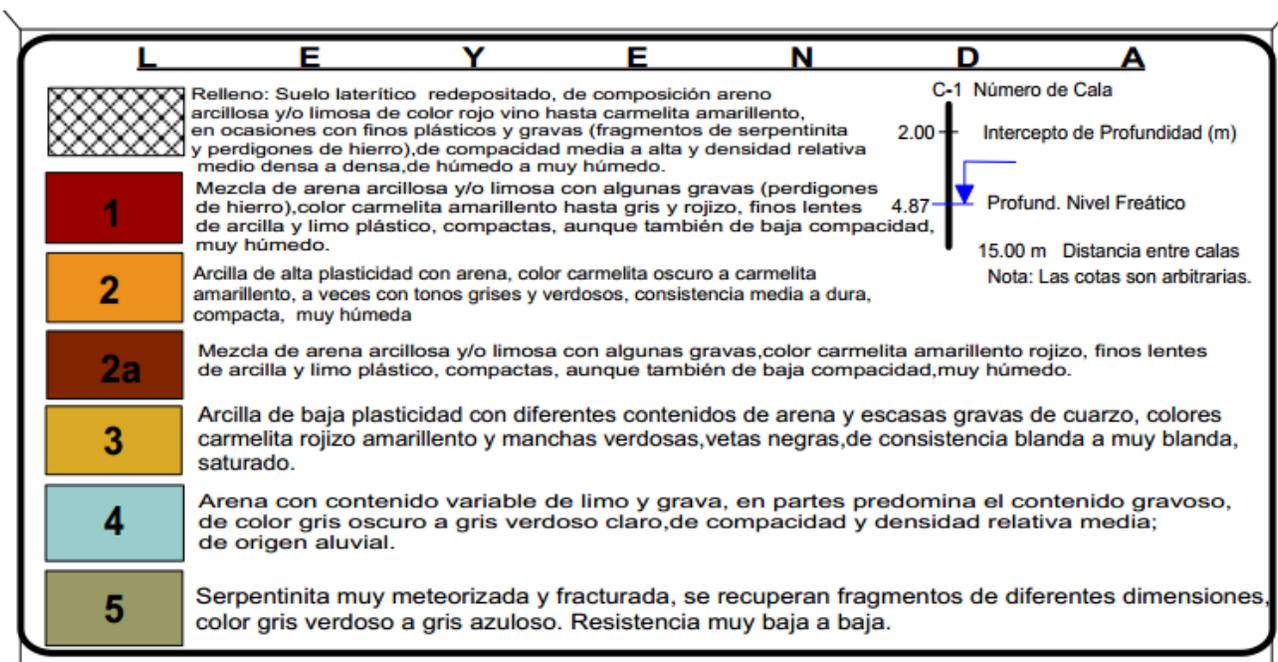
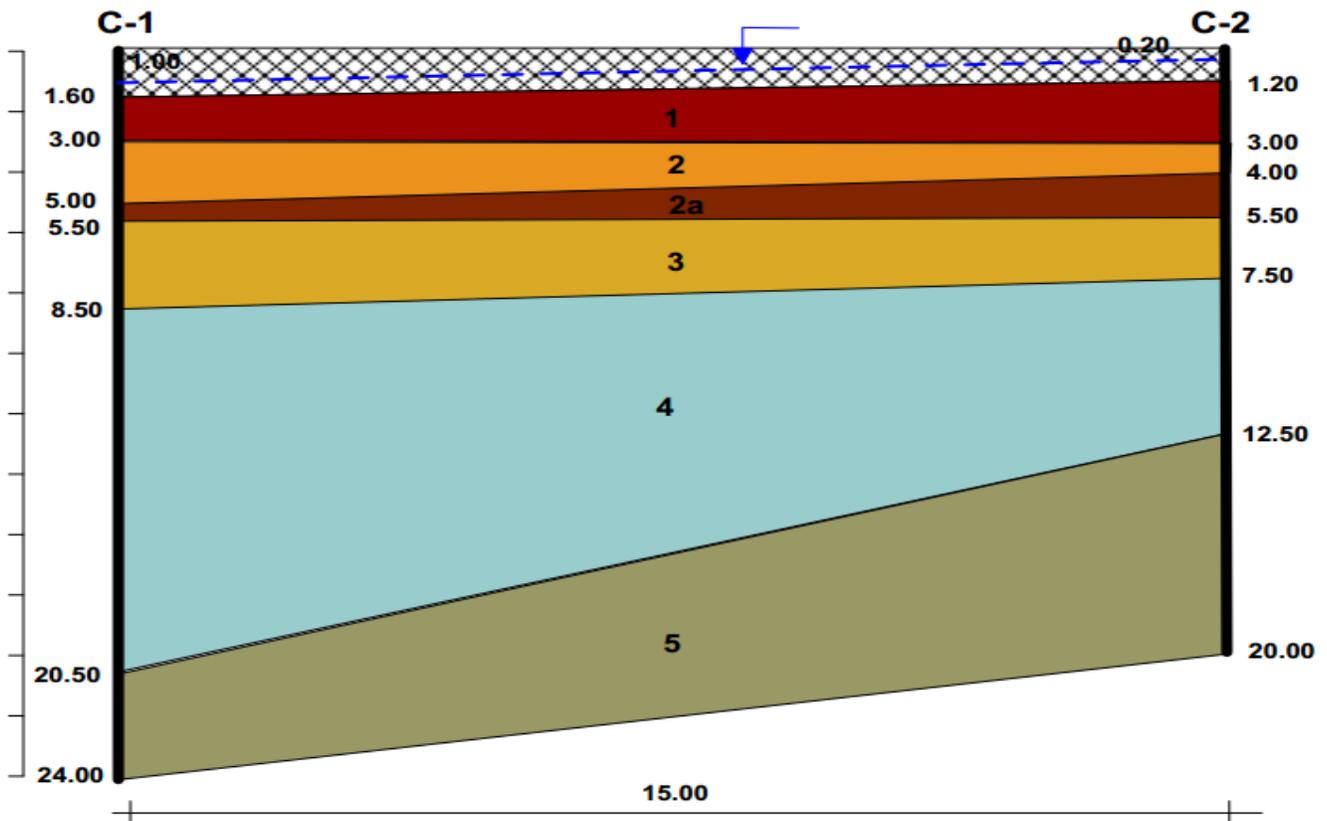


Figura 34. Estratos del suelo

Anexo 3. Detalles de elementos estructurales del puente

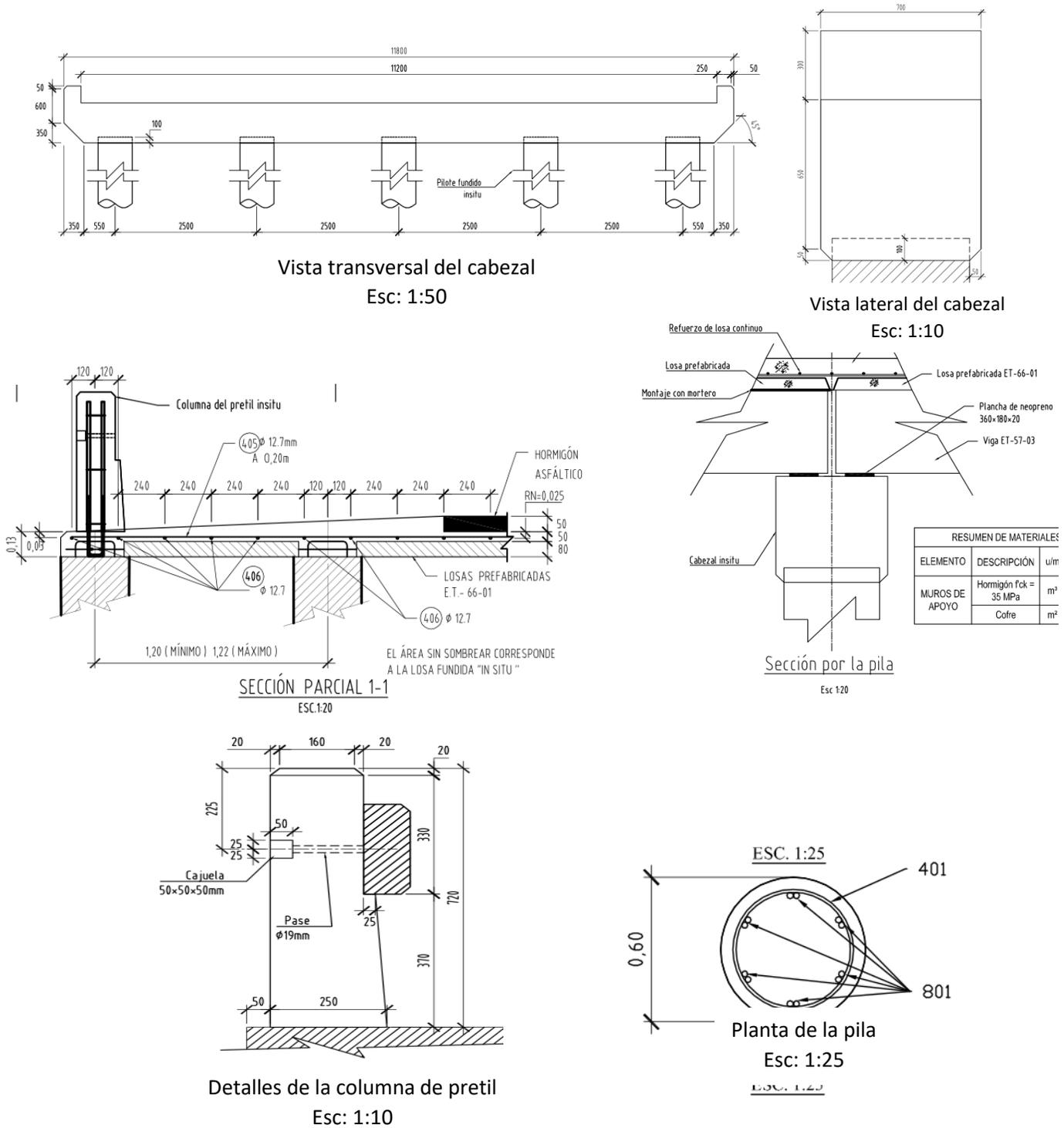


Figura 35. Elementos estructurales

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

Anexo 4. Diagramas de solicitaciones en el eje x para el espectro en la dirección x

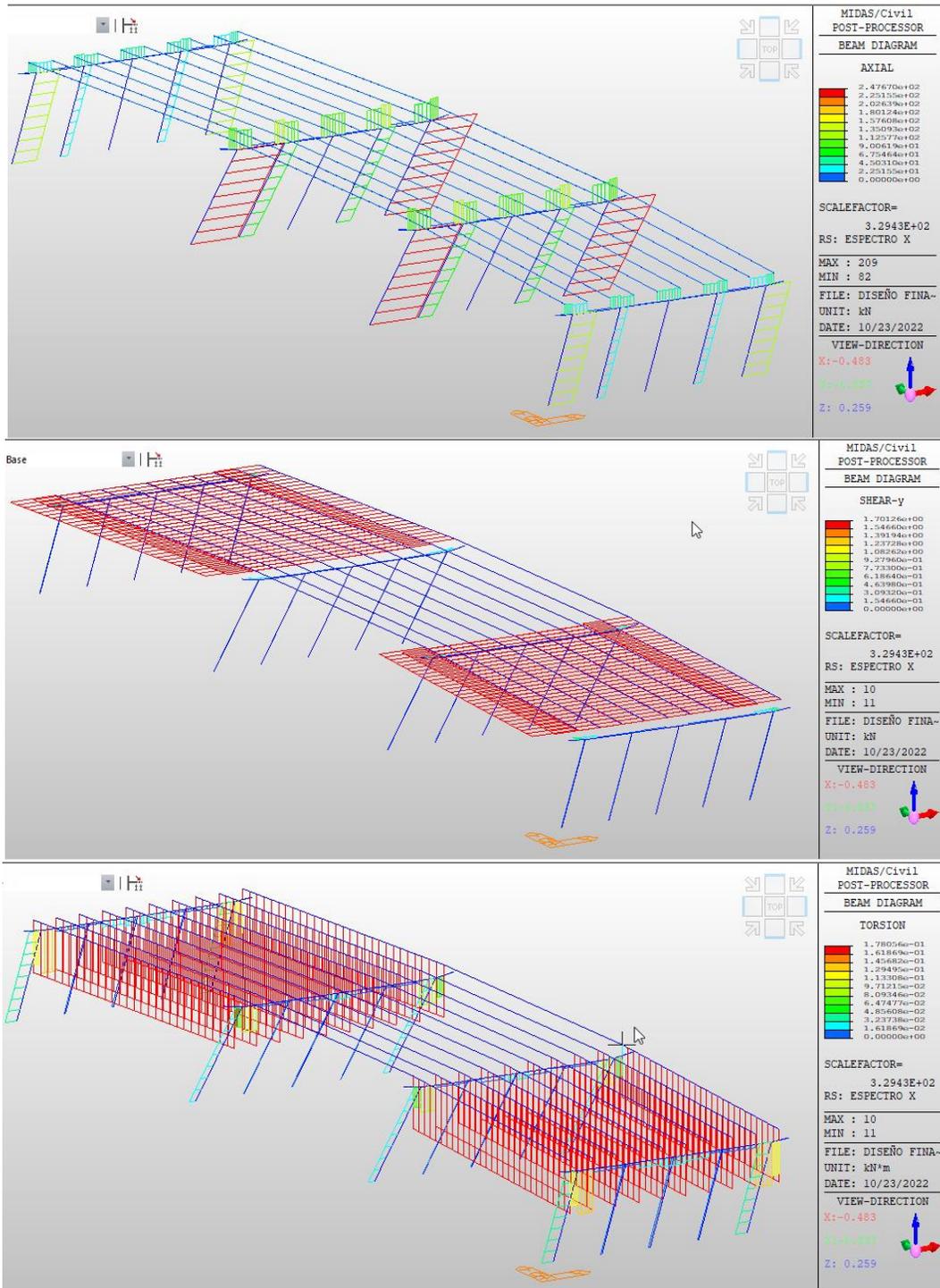


Figura 36. Diagramas de solicitaciones en puente sin ISE

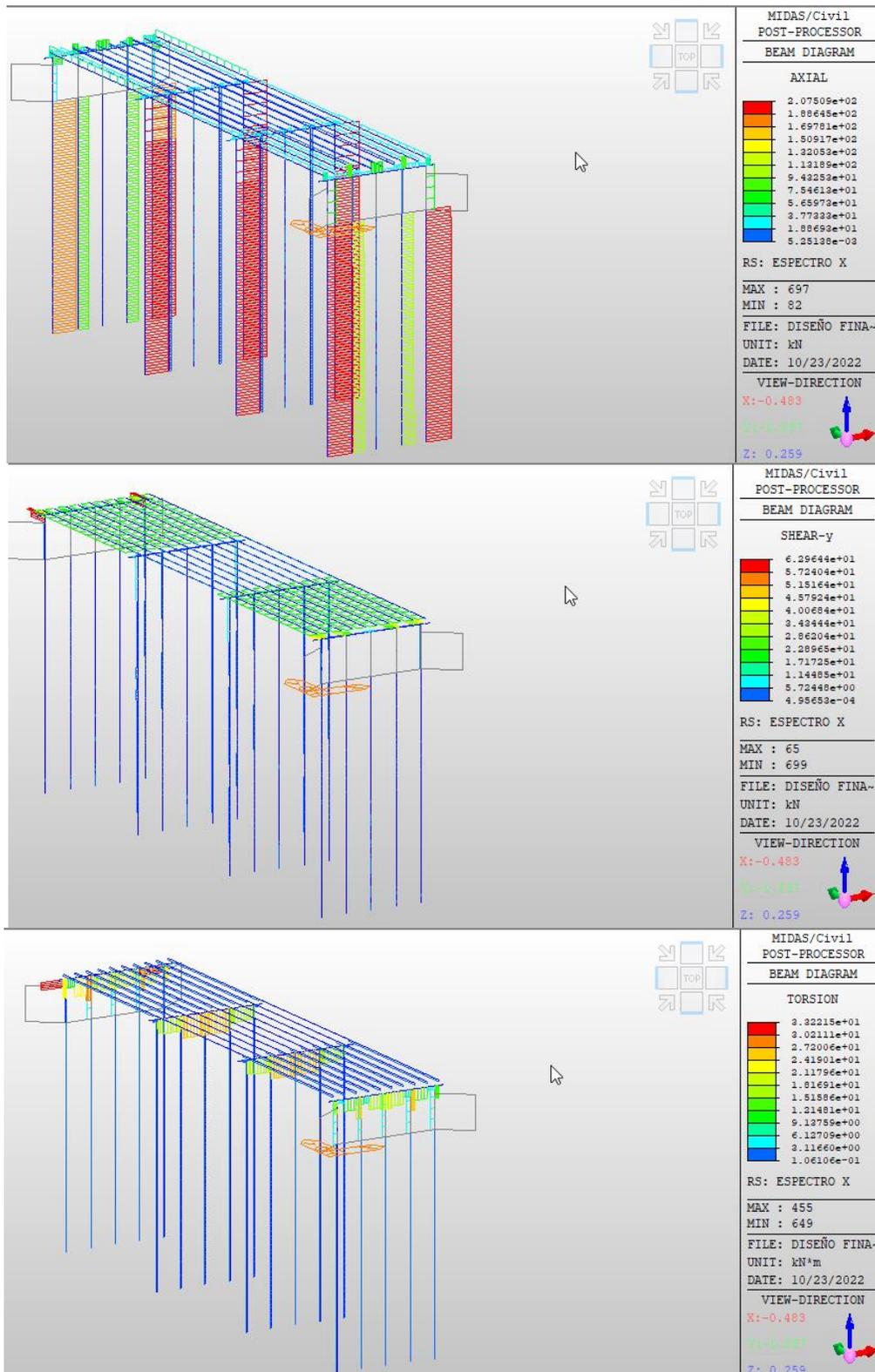


Figura 37. Diagramas de solicitaciones en puente considerando el suelo como resortes

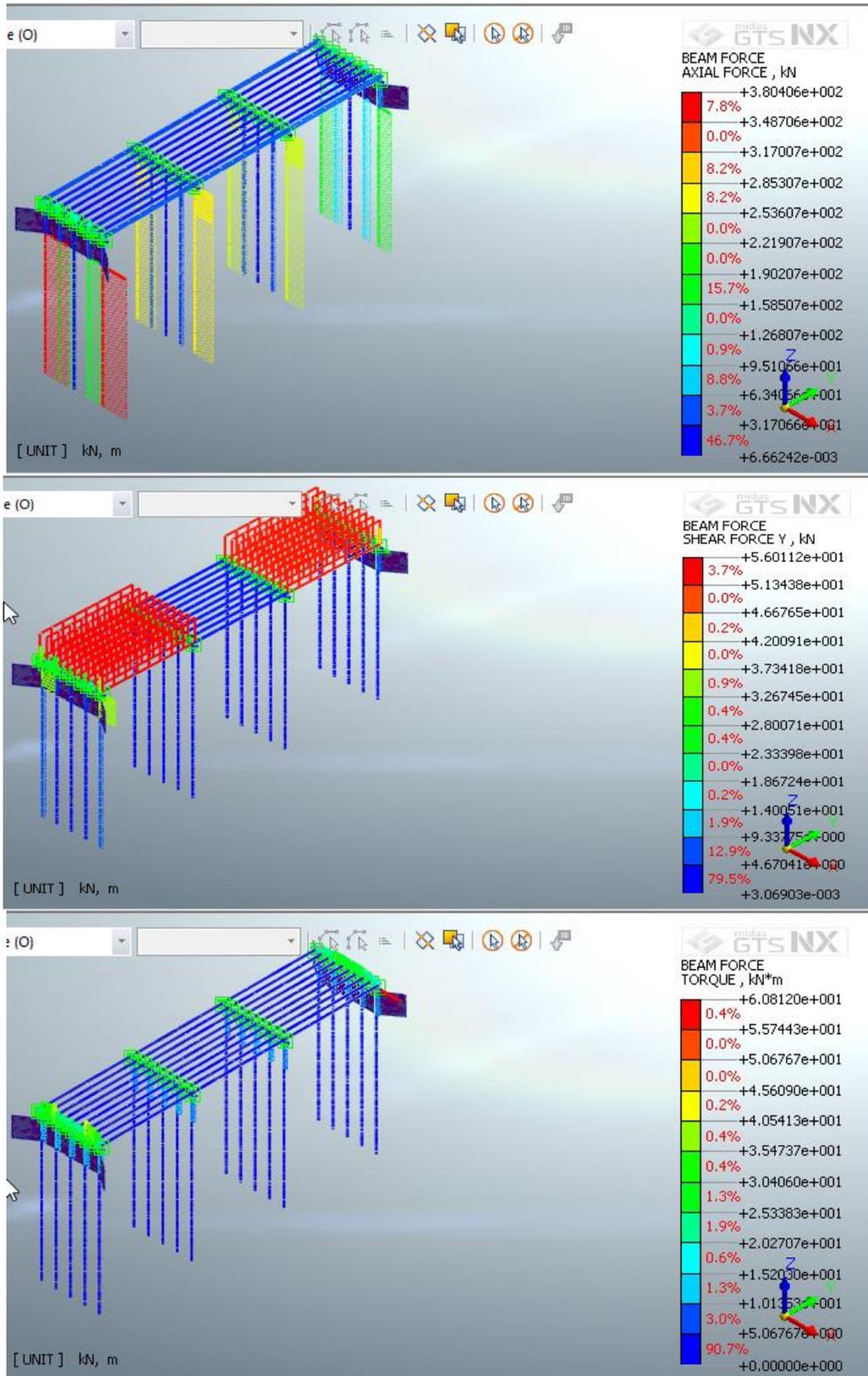


Figura 38. Diagramas de solicitaciones en puente modelado en conjunto con el suelo

Anexo 4. Desplazamientos y rotaciones en el eje x para el espectro en la dirección x

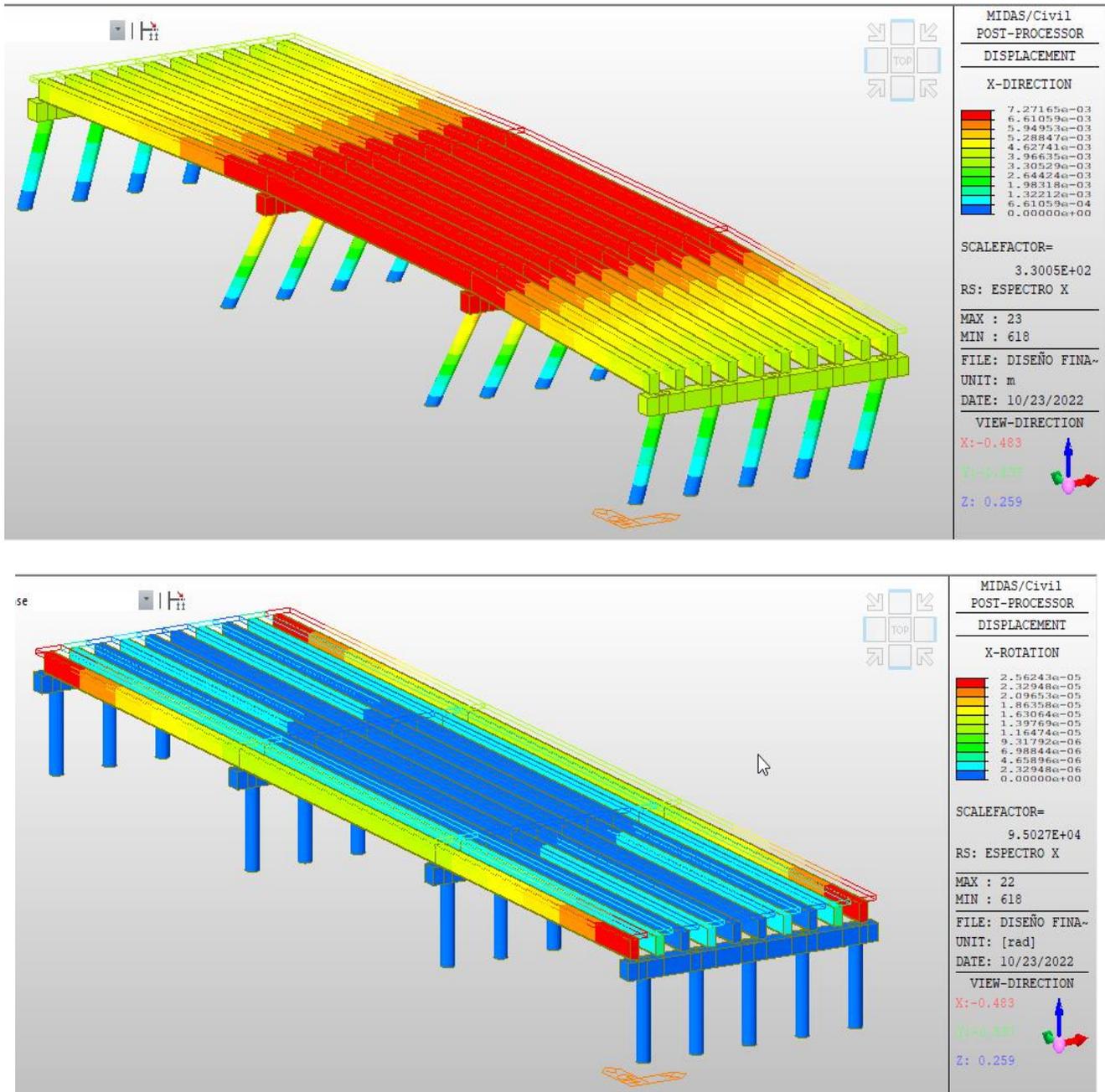


Figura 39. Diagramas de desplazamientos y rotaciones en puente sin ISE

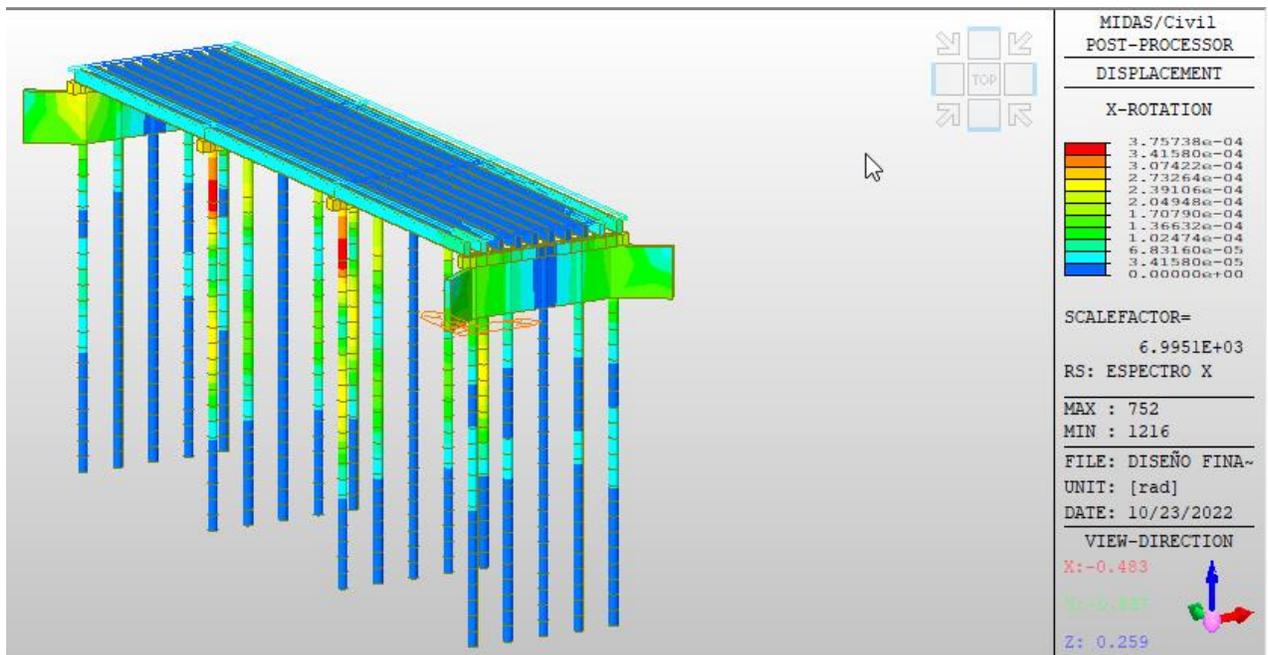
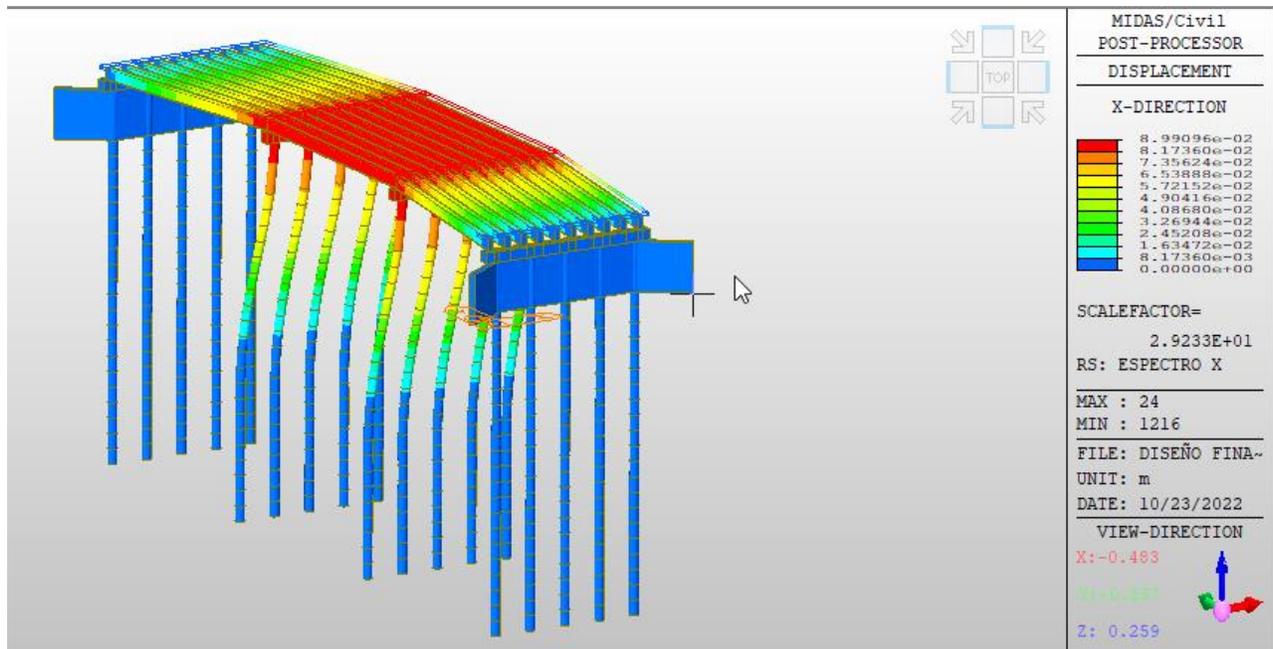


Figura 40. Diagramas desplazamientos y rotaciones en puente considerando el suelo como resortes

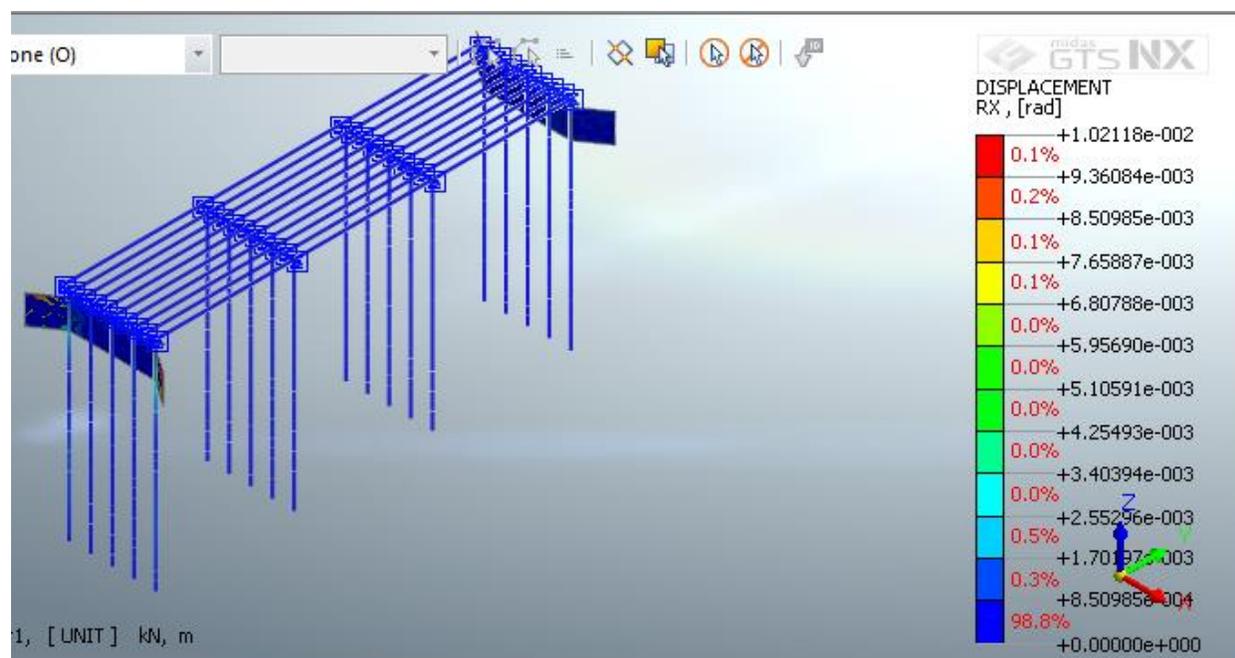
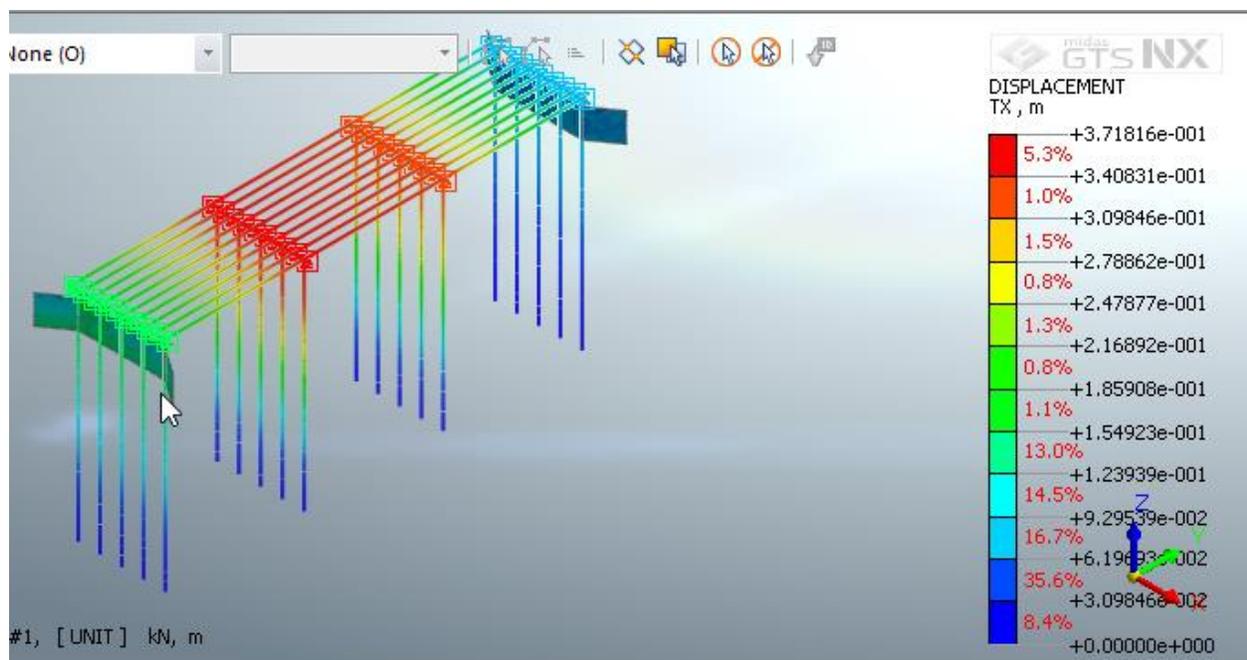


Figura 41. Diagramas de desplazamientos y rotaciones en puente modelado en conjunto con el suelo (puente solo)

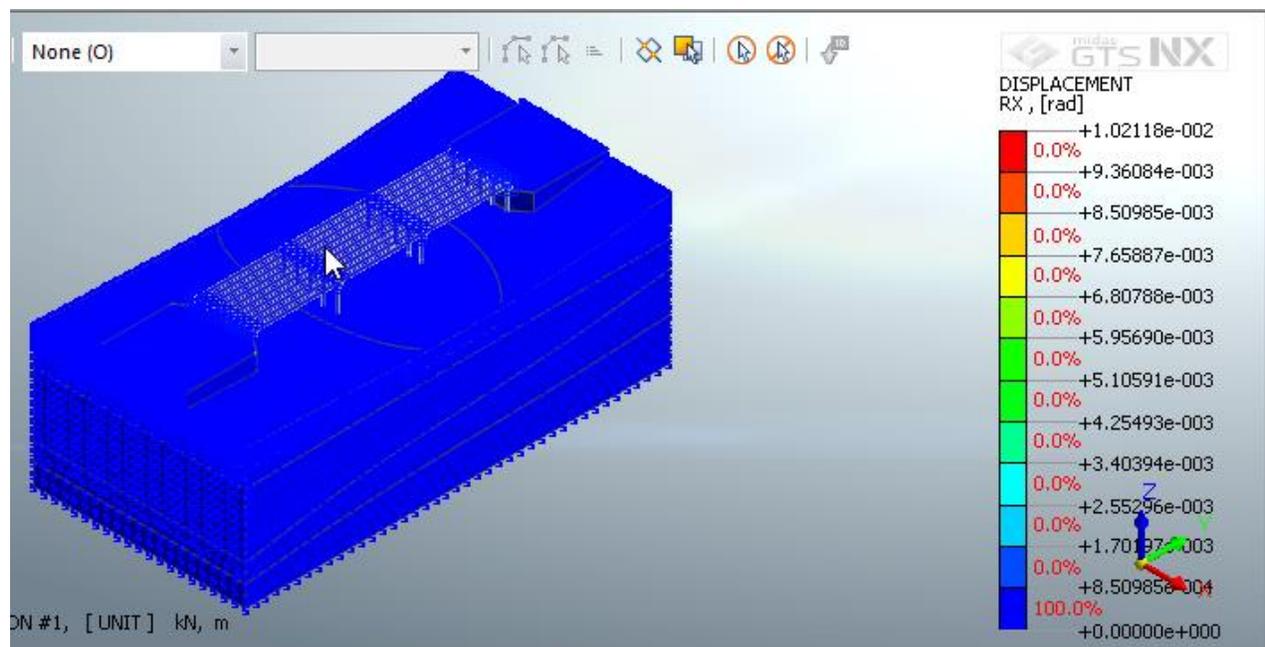
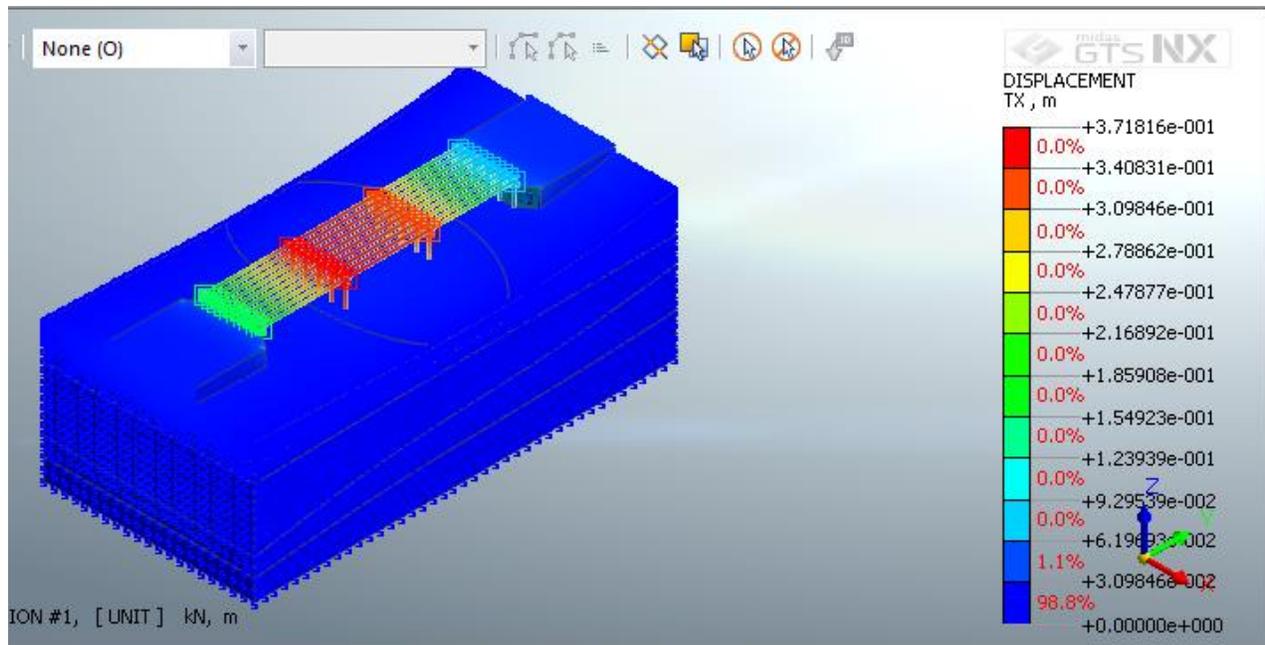


Figura 42. Diagramas de desplazamientos y rotaciones en puente modelado en conjunto con el suelo