



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MODELACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA AUTOELEVABLE CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS
P R E S E N T A :

CARLOS VILLASEÑOR MEJÍA

TUTOR:

DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ

MÉXCO D.F., OCTUBRE DE 2010



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Luis Esteva Maraboto
Secretario:	Dr. Roberto Meli Piralla
Vocal:	Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez
1 ^{er} . Suplente:	M. en I. Octavio García Domínguez
2 ^{do} . Suplente:	Dr. Francisco Leonel Silva González

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ

El fracaso sólo significa esto: ¡que no sois lo suficientemente fuertes en vuestras resoluciones para hacer esto o no hacer aquello!

*A mi esposa, un mujer fuerte, noble y perseverante,
quien siempre me ha acompañado en esta
y en todas nuestras aventuras.*

*A Doña Carmelita, por su apoyo para seguir
adelante con mi empresa y con mi maestría.*

Uno puede pedir comprensión, puede pedir en sus plegarias que le sea posible ayudar a los otros, porque al ayudar a otros uno se ayuda a sí mismo, al enseñar a otros se enseña a sí mismo y al salvar a otros se salva a sí mismo. Uno tiene que dar antes de que pueda recibir. Tiene que dar de sí mismo, de su comprensión, de su misericordia. Hasta que uno puede dar de sí mismo no puede recibir de otros. No puede obtener misericordia si antes no muestra misericordia, no puede obtener comprensión si antes no ha comprendido los problemas de los demás.

Agradecimientos:

- A mi maestra y directora de tesis la Dra. Sonia E. Ruiz G., por haberme brindado la oportunidad de participar en este proyecto, por su fe en mí, por su paciencia y apoyo durante los días interminables de trabajo e investigación y con quien espero permanecer en contacto.
- Al Dr. Francisco Silva G. por su valiosos consejos y el tiempo que me dedicó para el desarrollo de esta tesis.
- Al M. en I. José Luis Luna por su ayuda y apoyo en el aprendizaje del programa SACS y en el desarrollo de los modelos matemáticos.
- A mi maestro el M. en I. Octavio García D., una persona valiosa, por creer en mí desde el comienzo de la maestría y a quien considero mi amigo.
- A mis compañeros de maestría y en especial a nuestro estupendo grupo de amigos, con quienes compartí muchísimos momentos inolvidables de autodescubrimiento, de aprendizaje y de trabajo.

ÍNDICE

1	OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	CONCEPTOS BÁSICOS	4
1.2.1	Partes y Funciones de una Plataforma Autoelevable.	5
1.2.2	Proceso de Posicionamiento, Instalación y Operación.	10
1.2.3	Cargas Ambientales Básicas y Análisis Estructural.	14
1.2.4	Análisis estructural.	18
1.2.5	Posibles Condiciones de Falla.	19
1.3	HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS	21
2	DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS TRIDIMENSIONALES	23
2.1	MODELOS MATEMÁTICOS DE LA SUPERESTRUCTURA Y DEL SUELO MARINO CONSIDERANDO LA ESTRATIGRAFÍA	23
2.1.1	Modelo matemático tridimensional de la Plataforma Autoelevable con el programa SACS®.	23
2.1.2	Modelo tridimensional de elementos finitos del suelo marino con el programa PLAXIS®.	37
2.2	ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE REACCIÓN DEL SUELO	41
2.3	MODELO MATEMÁTICO TRIDIMENSIONAL DEL MAT CON EL PROGRAMA SAFE® 8.1	45
3	APLICACIÓN DE TRES MÉTODOS DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	46
3.1	MÉTODO ITERATIVO: ITERACIÓN CON EL MODELO DE SACS® Y MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (CON PLAXIS®)	47
3.1.1	Ajustes de valores sesgados y singulares en los resortes	51
3.2	MÉTODO EMPÍRICO: DETERMINACIÓN DIRECTA DE LA RIGIDEZ DE LOS RESORTES CON EL MÓDULO DE REACCIÓN Y ÁREAS TRIBUTARIAS.	61
3.3	MÉTODO SEMI-EMPÍRICO: MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO EL MÓDULO DE REACCIÓN.	62
3.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	64
3.4.1	Primer Método (Método iterativo (SACS® - PLAXIS®)) vs Segundo Método (Método empírico (Módulo de reacción y áreas tributarias)).	64
3.4.2	Primer Método (Método iterativo (SACS® - PLAXIS®)) vs Tercer Método (Método semi-empírico (Módulo de reacción - SAFE®)).	66
4	CONCLUSIONES	68

5	APÉNDICE I	70
6	APÉNDICE II	72
7	APÉNDICE III	75
8	APÉNDICE IV	76
	BIBLIOGRAFÍA	82

MODELACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA AUTOELEVABLE CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA



Resumen

Esta tesis tiene como finalidad proporcionar los elementos para el análisis de la respuesta de una plataforma autoelevable en su configuración elevada, en particular la determinación de los elementos que faciliten el análisis de interacción entre el suelo y la estructura. Para tales efectos, se realiza la revisión de tres métodos con los que se pretende estimar las rigideces de los resortes utilizados para modelar el suelo, el primer método realiza iteraciones con la retroalimentación de los datos proporcionados por dos modelos (uno de ellos el de elementos finitos que incluye la estratigrafía del sitio), hasta lograr una cierta convergencia en sus variaciones. El segundo, es un método empírico que estima las rigideces de los resortes en forma directa por medio del módulo de reacción y áreas tributarias, en este método los resortes están desacoplados; y el tercer método simplifica las propiedades del medio continuo integrando directamente el módulo de reacción en un modelo de elementos finitos, donde se logra un sistema acoplado de manera similar al primer método.

Abstract

This document provides the elements to analyze the Jack Up structural response on the elevated mode defining particularly the factors that make easier the soil-structure interaction analysis. To reach this target, three methods are reviewed, each of them trying to estimate the spring rigidity on each MAT support node. The first method makes iterations with data feed-backed between two models (one of them including the soil stratigraphy in a finite element analysis model). The second is an empirical method that estimates springs with technical specifications like soil subgrade properties and tributary node areas, on this method the system is uncoupled. The third method tries to get the springs properties with a finite element model analysis that includes the soil subgrade modulus directly, like the first method it can get a coupled system.

1 OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo de esta tesis es proporcionar los elementos de análisis de la respuesta de una Plataforma Auto Elevable para el análisis de interacción entre el suelo y la estructura. Para tales efectos, se revisan tres métodos donde se estiman las rigideces de resortes, el primer método realiza iteraciones retroalimentando los datos arrojados entre dos modelos (uno de ellos de elementos finitos que incluye la estratigrafía del sitio). El segundo, estima las rigideces de los resortes directamente por medio del módulo de reacción y áreas tributarias; y el tercer método integra directamente el módulo de reacción en un modelo de elementos finitos.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Desde hace algunos años el aumento de la demanda de los energéticos ha llevado al desarrollo de sistemas de exploración y producción cada vez más eficaces y seguros, debido a la disminución de la reservas de gas y petróleo sobre tierra. Dicha exploración se ha visto en la necesidad de realizarse en zonas costeras con tirantes de agua hasta de 100m de profundidad (1) (2), llamándose a este tipo "exploración y producción en aguas someras", como respuesta a dicha demanda desde los años 50 se ha venido desarrollando, entre otras tecnologías, un sistema que ha logrado buenos resultados llamado "Plataformas Marina Autoelevables" (en inglés: Jack Up Rigs), las plataformas autoelevables son estructuras complejas con diseños específicos para los trabajos fuera de la costa (del inglés offshore) en diferentes modos de operación. Estas estructuras son usadas por lo general en perforación, producción, montaje y/o trabajos de mantenimiento de las plataformas fijas o piloteadas (1).

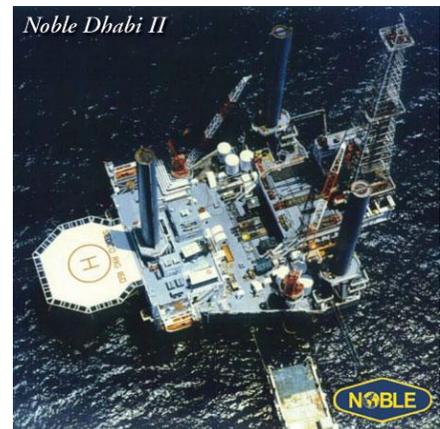


FIGURA 1.2-1 PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

Como cualquier otra embarcación o estructura marina, las plataformas autoelevables son diseñadas y construidas cumpliendo normas de seguridad, confiabilidad y deben someterse a la aprobación y clasificación de organismos y compañías certificadoras internacionales, tales como ABS (American Bureau of Shipping), DNV (Det Norske Veritas), LR (Lloyds Register). Dichas certificaciones aseguran que la unidad cumple con los requisitos mínimos internacionales de seguridad y funcionalidad los cuales consideran en general:

- Materiales de fabricación
- Integridad estructural
- Estabilidad en modo de flotación
- Protección contra incendio y medios de evacuación
- Maquinaria y sistemas
- Inspecciones periódicas

En el contexto estructural el alcance de dichas certificaciones contempla la resistencia a esfuerzos, soldaduras, materiales, fabricación, protección anticorrosiva, los criterios de resistencia última en diferentes modos de operación como condiciones de carga bajo tormenta, tránsito, operaciones de elevación, precarga y modo elevado. También se examinan posibles condiciones accidentales y fatiga.

El propietario tiene la responsabilidad de operar la plataforma autoelevable bajo las condiciones especificadas y aprobadas por las compañías certificadoras, y de confirmar que la unidad está operando en forma segura en el sitio de obra. En el manual de operación de la plataforma deben estar especificados parámetros tales como el peso del casco, el tirante máximo de operación, condiciones ambientales que deben monitorearse en el sistema de apoyo sobre el lecho marino, etc.

Como las plataformas autoelevables son estructuras móviles y pueden operar en cualquier parte del mundo, su diseño no está sujeto a las condiciones ambientales, geotécnicas y operacionales de un lugar específico. Cuando una empresa decide invertir en construir una plataforma autoelevable, debe determinar, junto con los diseñadores, las características que tendrá la estructura en cuanto a respuesta a ciertas condiciones ambientales y ciertos modos de operación, de tal forma que deban cumplir con los requisitos correspondientes de una clasificación (1).

La clasificación requiere del análisis general de la estructura en los modos de operación de flotación y elevado. Esto incluye la respuesta durante los traslados bajo condiciones normales y de tormenta, adicionalmente deben revisarse las condiciones de fatiga, estabilidad en el modo elevado, las condiciones de operación temporales como el extendido parcial de las piernas. La maquinaria y las instalaciones se clasifican de la misma manera que otras embarcaciones, exceptuando los equipos especiales como son los de elevado y manejo de riesgo en las operaciones de perforación.

La clasificación y certificación de una plataforma autoelevable significa que cumple con los estándares mínimos, pero no implica que una unidad sea adecuada para operar las actividades de una obra en un sitio específico; es un hecho que en cada obra, el propietario de la unidad debe determinar si la plataforma autoelevable se ajusta a la necesidades, o bien realizar las modificaciones pertinentes tomando en cuenta el tirante, condiciones ambientales, geotécnicas, sísmicas y climáticas del sitio de obra.

La operación de una plataforma autoelevable, por lo general, está regulada por la legislación local de un sitio.

1.2.1 Partes y Funciones de una Plataforma Autoelevable.

1.2.1.1 Casco

El casco (Figura 1.2-2) es una estructura hermética que proporciona soporte a las instalaciones, equipos, sistemas, tripulación, camarotes, puente de mando y las piernas.

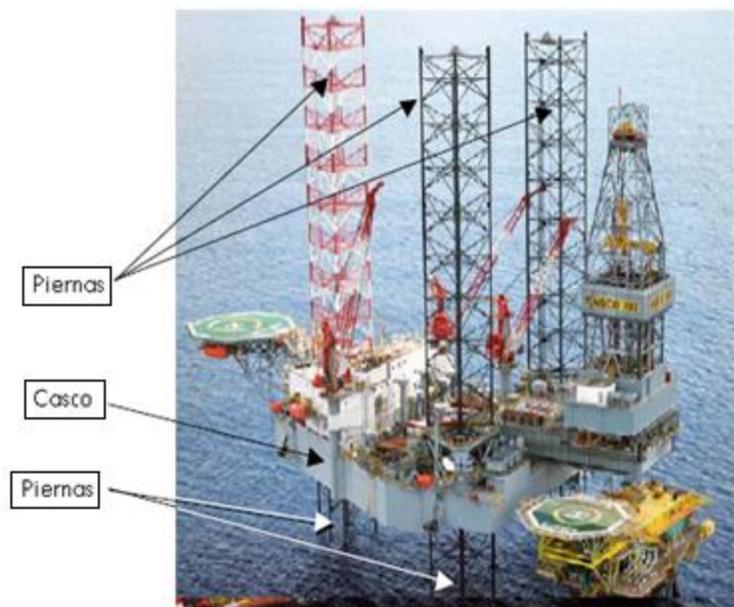


FIGURA 1.2-2 PARTES PPRINCIPALES DE UN JACK-UP

Cuando la plataforma autoelevable se traslada, el casco provee el sistema de flotación en conjunto con el MAT (si lo hay) (1).

En general hay varios parámetros que en la configuración del casco afectan de manera importante el modo de operación de la plataforma autoelevable, éste se dimensiona de acuerdo al equipo de transporte, los espacios de almacenamiento de los equipos de terceras partes, materiales y tuberías, también se toma en cuenta el espacio de trabajo para maniobras.

El peso y las dimensiones del casco afectan de manera importante el comportamiento bajo solicitaciones y combinaciones de solicitaciones como viento, oleaje y corriente; por otro lado también se requiere de un sistema de soporte con mayor capacidad de carga para elevar y sostener el sistema. El peso de la plataforma autoelevable afecta directamente el periodo natural de vibrar del sistema cuando se encuentra en configuración elevada.

Al igual que en otros tipos de embarcaciones, la distancia entre la línea de flotación y el piso de maniobras, determina el peso de los equipos, los materiales que puede transportar y la estabilidad de una plataforma autoelevable.

1.2.1.2 Piernas y Sistema de Apoyo Sobre el Lecho Marino

Las piernas y el sistema de apoyo de una plataforma autoelevable forman un sistema estructural de acero, éste sistema soporta el casco cuando se encuentra en configuración elevada y provee estabilidad y resistencia para las cargas laterales (Figura 1.2-3). El sistema de apoyo sobre el lecho marino tiene la función de distribuir las cargas de modo de no rebasar la capacidad de carga del suelo marino. Las piernas y el sistema de apoyo tienen gran influencia en el comportamiento tanto en el modo elevado como en el de flotación.

Hay muchos componentes que son comunes en las plataformas autoelevables, pero independientemente del diseño y el tipo de operaciones destinadas, hay una diferencia básica, la cual involucra la configuración del sistema de apoyo sobre el lecho marino que es:

- El MAT, que es otro casco que une las tres piernas, éste es lastrado para bajar al fondo marino y formar de esa manera un sistema de apoyo (Figura 1.2-3).
 - Ventajas (1) (3):
 - Debido a la amplia área de apoyo, distribuye en forma uniforme las cargas que bajan de las piernas de la plataforma autoelevable reduciendo en gran medida el riesgo de sobrecarga sobre lecho marino.
 - El MAT sirve como complemento en el sistema de flotación, permitiendo transportar mayores cargas.

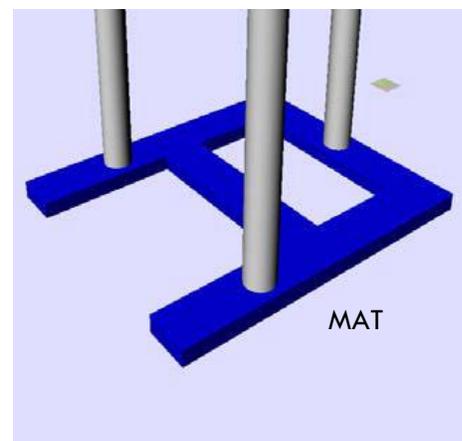


FIGURA 1.2-3 SISTEMA DE APOYO EN EL LECHO MARINO CON MAT

○ Desventajas (1) (3):

- Los MAT no pueden asentarse en lechos accidentados, irregulares o con pendientes grandes ya que éstas condiciones inducen grandes momentos en el MAT y las piernas, un sistema construido para soportar grandes momentos resulta en una estructura relativamente muy pesada.
- Tampoco se pueden usar MATs en lechos donde crucen tuberías o haya escombros u otra clase de objetos en el fondo.

Durante el proceso de transición del modo flotación al modo elevado, el MAT debe ser lastrado para sumergirlo hasta el fondo. Este proceso es largo y delicado de modo de evitar inestabilidad de flotación por momentos inducidos por escorado (inclinación). El sistema de lastrado del MAT implica transportar equipo adicional en comparación con las plataformas autoelevables con piernas independientes.

- Spud-Cans, que hacen que las piernas operen en forma independiente. Este sistema consiste en estructuras cónicas, en la parte inferior y superior, de modo de facilitar tanto la penetración como extracción de la pierna en el lecho marino (Figura 1.2-4).

○ Ventajas (1):

- La mayor ventaja es que este tipo de apoyo puede usarse en una gran variedad de condiciones de lecho marino, las plataformas autoelevables equipados con spud-cans pueden operar en suelos blandos y duros, pendientes grandes o pequeñas, y en áreas donde haya congestión de tuberías u otras estructuras que puedan interferir.
- No es necesario lastrar, por lo que no se necesita equipo adicional.

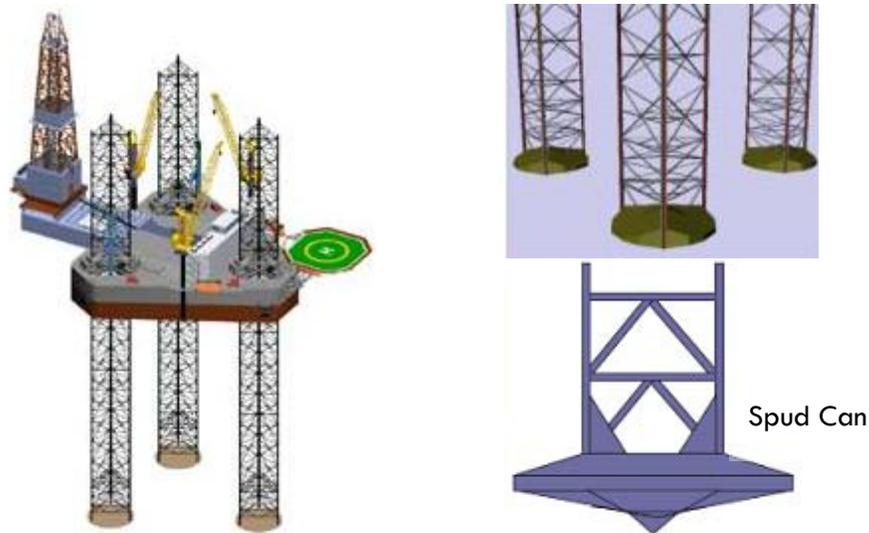


FIGURA 1.2-4 SISTEMA DE APOYO CON SPUD CANS

○ Desventajas (1):

- Se tienen altas concentraciones de esfuerzo sobre las pequeñas áreas que abarca el sistema, lo que resulta en profundas penetraciones comparado con lo que pasa con los MATs.

- Al retraer las piernas, quedan las depresiones, que resultan profundas en suelos blandos. Cuando otra plataforma autoelevable se aproxima para posicionarse y realizar otros trabajos, se debe tener cuidado de no apoyar los spud-cans en las depresiones antiguas, ya que se puede provocar asentamiento o deslizamientos repentinos y/o fuerzas laterales no deseables.

La longitud de las piernas determina la profundidad máxima de operación de la plataforma autoelevable, teniéndose intervalos entre los 100 m y 120 m. El tamaño de la sección transversal y la longitud de las piernas tienen un efecto importante en la estabilidad de flotación; esto es, a mayor área expuesta el viento y el peso afectan el centro de gravedad.

El propósito principal de las piernas es proveer elevación del casco sobre las crestas de oleaje por tormenta, soportar el oleaje, las cargas por corriente y viento, y transmitir las cargas de operación, ambientales y gravitacionales entre la cubierta y el sistema de apoyo.

Existen dos tipos principales de piernas:

- **Cilíndricas:** cuya estructura es tubular que puede contener atiesadores, los dientes de engranaje u hoyos sobre la placa que permiten sujetar el casco en la configuración elevada. Las piernas cilíndricas pertenecen a plataformas autoelevables que operan en tirantes de agua menores que 90m, las unidades que operan en tirantes mayores tienen piernas estructuradas con armaduras. La razón de esto es que las piernas cilíndricas necesitan más acero para lograr la misma respuesta que las de armadura en la configuración elevada.
 - La ventaja principal de las piernas cilíndricas es que ocupan menor espacio junto con el sistema de elevación y sujeción del casco. También, que requieren menor esfuerzo de diseño.
- **Armadura:** consiste en elementos diagonales, horizontales y cuerdas. En general las resistencias a la fuerza cortante lo proporcionan los elementos diagonales y horizontales, mientras que las cuerdas proveen la resistencia a la flexión. Como en todas las armaduras, se usa menor cantidad de material para una resistencia máxima a las solicitaciones.

En unidades con la misma configuración del casco, la unidad que tiene mayor longitud de piernas es la de menor estabilidad de flotación.

En la configuración elevada, la magnitud y proporción de las cargas debido al viento, corriente y el oleaje, dependen del tirante de agua, de las partes expuestas al aire y de la profundidad de penetración del sistema de apoyo en el lecho marino.

La rigidez lateral de la plataforma es función de la configuración de la sección transversal de las piernas e inversamente proporcional al tirante de agua en el que va a operar y a la sobrecarga variable del casco.

1.2.1.3 Equipo (1).

Una plataforma autoelevable contiene en el casco, básicamente, tres grupos de equipos (Figura 1.2-5):

Equipo marino, se refiere al equipamiento y sistemas que no están relacionados directamente con la misión de trabajo, éstos pueden ser motores diesel, tuberías de combustible, instalaciones eléctricas, sistema contra incendio, posicionamiento, telecomunicaciones, procesamiento, cocina, lavandería, etc.

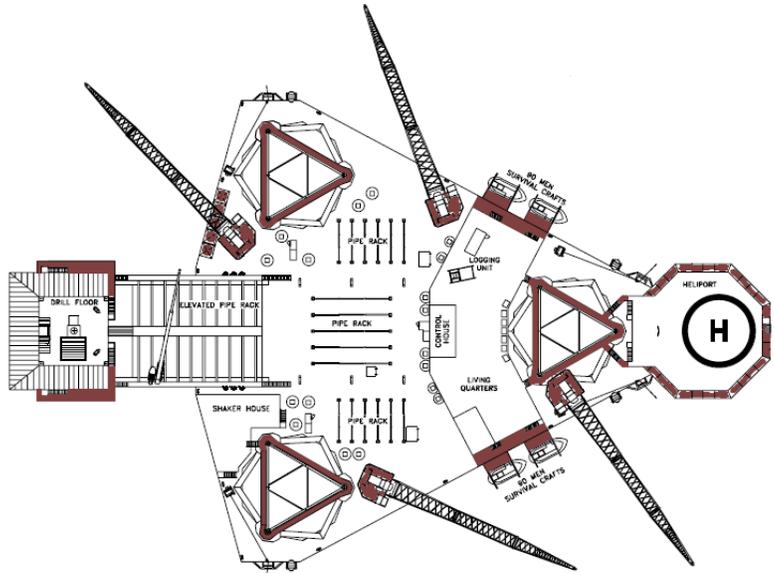


FIGURA 1.2-5 CUBIERTA DEL CASCO DE JACK-UP

- **Equipo de misión de trabajos**, estos equipos pueden ser de exploración, producción, mantenimiento. Incluso dos Plataformas Autoelevables destinadas para exploración y/o producción pueden tener variantes de equipos, según la tarea específica. El diseño de una plataforma autoelevable debe preverse de modo de proporcionar ciertos usos en los campos de exploración y producción.
- **Equipo de elevación**, está contenido dentro del casco y realiza las acciones de extensión y retracción de piernas, y con esto la precarga, elevado, sujeción y bajado del casco. Estos sistemas pueden ser eléctricos o hidráulicos, ambos pueden balancear las cargas entre las piernas. Los sistemas hidráulicos logran dicho balance manteniendo la misma presión en cada unidad que sujeta cada pierna. En los sistemas de elevación eléctricos, la relación velocidad/carga en los motores eléctricos, es la que permite el balance de las cargas (Figura 1.2-6).
 - Otro elemento importante del sistema de elevación son las guías que mantienen alineadas las piernas dentro del casco de modo de proteger el sistema de engranaje de sujeción. Éstas a su vez, pueden transferir cierta cantidad de momentos al casco en la configuración elevada, esto lo hace mediante fuerzas pares y quedan determinadas de acuerdo a la rigidez relativa de las guías respecto a los engranajes de sujeción (Figura 1.2-7).



Motores del Sistema de Elevación

FIGURA 1.2-6 SISTEMA DE ELEVACIÓN DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

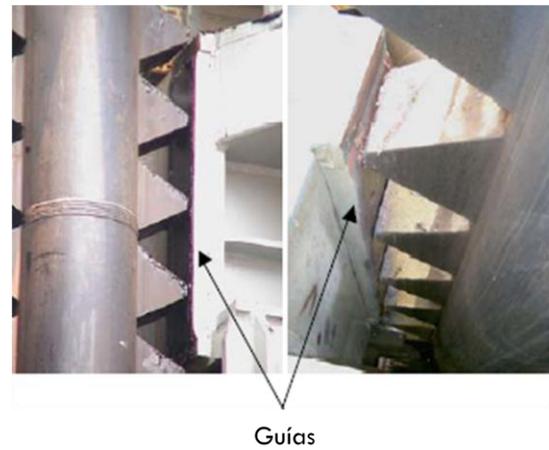
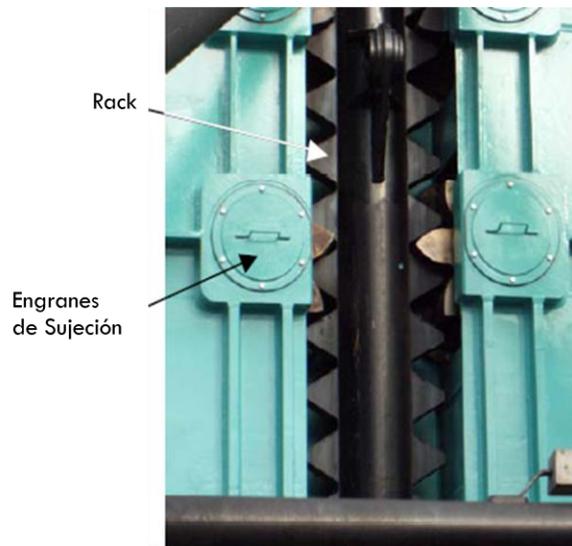


FIGURA 1.2-7 SISTEMA DE FIJACIÓN Y APOYO DENTRO DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN

1.2.2 Proceso de Posicionamiento, Instalación y Operación.

La configuración de modo de flotación o modo de tránsito de una plataforma autoelevable ocurre cuando la estructura es transportada de un lugar otro. Durante este lapso, la plataforma autoelevable flota usando su propio casco. Se clasifican cuatro tipos de operaciones de traslado llamados arrastre o remolcado húmedo (Figura 1.2-8) (4) (5) (6):



FIGURA 1.2-8 ARRASTRE O REMOLCADO HUMEDO

- **Arrastre o remolcado (húmedo) de campo:** se refiere al traslado en un intervalo relativamente corto, esta operación no toma más de 12 hrs, y las condiciones climáticas no son de gran relevancia, dada su naturaleza relativamente segura. Las piernas son retraídas hasta en un 80%, esto es, para economizar las operaciones posicionamiento y mejorar el comportamiento de la estructura en el modo de flotación. El remolcado se realiza de modo que las cargas inducidas a la inercia de las piernas y el sistema de sujeción no sobrepase ciertos límites.
- **Arrastre o remolcado (húmedo) de campo extendido:** el traslado es de 12 h a varios días, la configuración de modo de flotación implica que las piernas sean completamente retraídas dentro del casco. Los criterios de traslado son los mismos usados que en el remolcado de campo. Se debe tomar en cuenta las condiciones climáticas durante la dicha operación.
- **Arrastre o remolcado (húmedo) oceánico:** que se refiere a las operaciones de traslado que no satisfacen a las condiciones para remolcado de campo extendido. La configuración en esta fase implica que las piernas sean retraídas al mismo nivel que en los traslados cortos, pero deben

tomarse precauciones adicionales ya que las condiciones de navegación son mucho más severas. Las preparaciones constan de la instalación de soportes adicionales para las piernas, operaciones de retracción o extensión de las piernas por debajo del casco como respuesta del monitoreo de las condiciones de traslado, y la instalación de seguros marinos para los equipos de cubierta (partes para mantenimiento, grúas, etc.).

- **Arrastre o remolcado (seco) oceánico:** que es definido como el transporte de la plataforma autoelevable sobre la cubierta de otra embarcación. En esta condición la plataforma autoelevable se encuentra apoyada sobre sus piernas y éstas a su vez están sujetas mediante seguros marinos a la cubierta de la embarcación que lo transporta (Figura 1.2-9).



FIGURA 1.2-9 ARRASTRE O REMOLCADO SECO

Una vez que la plataforma autoelevable se aproxima al sitio se realizan las siguientes operaciones de posicionamiento e instalación:

- Se posiciona y se sostiene en sitio la plataforma autoelevable mediante remolcadores.
- Se retiran los mecanismos para asegurar las piernas. Luego éstas se extienden, esto se hace mediante el sistema de elevadores internos alojado en el casco, hasta hacer contacto con el lecho marino.
 - En Plataformas Autoelevables con MAT, esta operación se realiza en conjunto con el lastrando del casco del MAT, hasta lograr un primer asentamiento sobre el fondo.

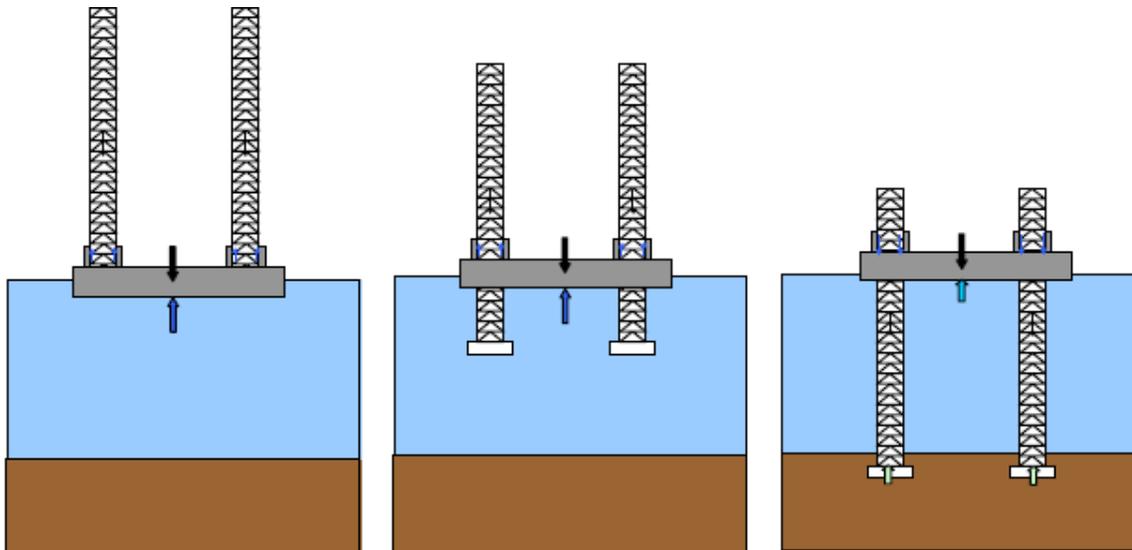


FIGURA 1.2-10 SECUANCIA DE POSICIONAMIENTO DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

- En Plataformas Autoelevables con Spud-Cans, las piernas son extendidas hasta hacer contacto con el suelo marino (Figura 1.2-10).

- Se aplica una precarga (Figura 1.2-11) para asegurar que el lecho marino es capaz de desarrollar la reacción máxima esperada, tanto para condiciones extremas de tormenta, como

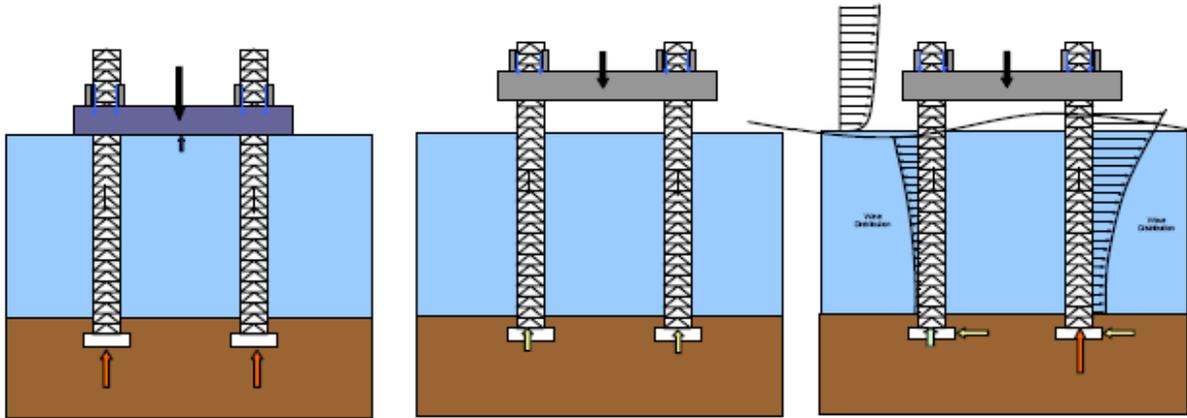


FIGURA 1.2-11 SECUENCIA DE PRECARGA, ELEVACIÓN HASTA LA ALTURA DE OPERACIÓN

para las condiciones normales de trabajo, sin penetración adicional de las piernas (piernas con Spud Cans) o falla del suelo (sistema de apoyo con MAT). La precarga consiste en bombear agua en tanques al interior del casco, una vez que se han llenado los tanques al nivel de precarga, ésta debe dejarse actuar durante un tiempo hasta que se logra un nivel de asentamiento nulo. La magnitud de la precarga depende de las cargas ambientales y del tipo de plataforma autoelevable, una plataforma autoelevable con MAT requiere poca precarga en comparación con los de spud-cans.

- La magnitud del asentamiento general en el lecho marino está determinada por las características del suelo, las cargas que bajan las piernas y el área que conforma el apoyo.
- Hay varias técnicas de precargado como por ejemplo en las Plataformas Autoelevables con Spud Cans, el precargado se realiza con una sola pierna, con una pequeña elevación resultante, esto es para evitar los riesgos de asentamiento repentinos. El proceso de precargado es monitoreado y comparado con las curvas de precarga y penetración de análisis previos.
- Durante la primera fase de precargado, la posibilidad de falla del suelo, o de deslizamiento o penetración repentinos de los spud-cans, se reduce manteniendo el casco, hasta donde sea posible, en su línea de flotación. Cuando ocurre una falla, se experimenta una pérdida de capacidad de carga sobre las piernas, y si el asentamiento es grande, éste es detenido porque

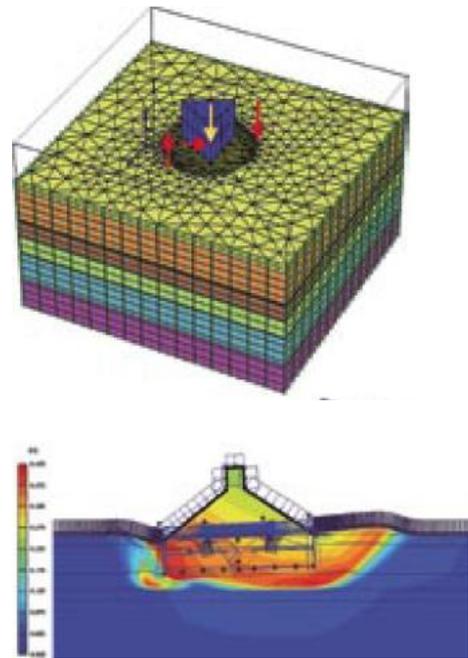


FIGURA 1.2-12 ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO PARA LAS CONDICIONES DE APOYO CON SPUD CANS

el casco provee el soporte necesario por flotación.

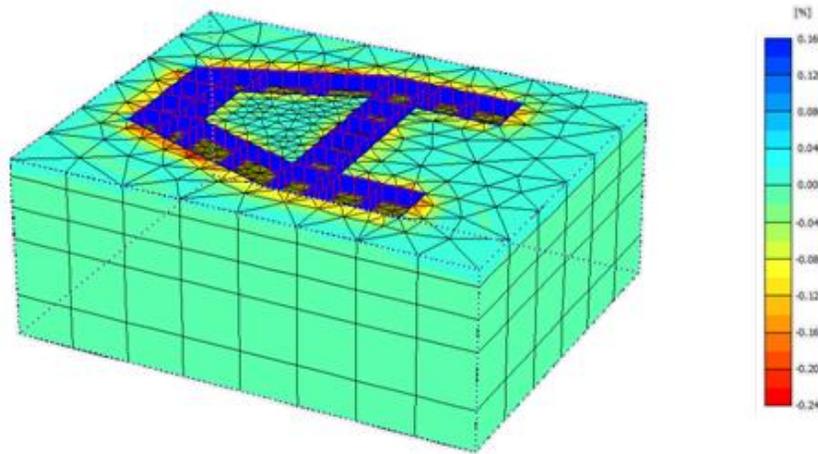


FIGURA 1.2-13 ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO EN SISTEMA DE APOYO CON MAT

- Durante las operaciones de precargado es importante mantener el peso del casco, el peso de los equipos y materiales de cubierta lo mejor distribuidos posible, de modo que las cargas entre las piernas sea uniforme.
- Después de la primera fase de precarga, el casco se eleva y mantiene durante intervalos de tiempo a diferentes alturas hasta llegar a la elevación de precarga, esta última fase se mantiene durante un periodo de tiempo determinado, dependiendo de las características de la plataforma autoelevable y del suelo marino.
- Una vez que las operaciones de precargado se concluyen, esto es que no se registran más asentamientos, y el nivel de esfuerzos en el o los apoyos han sido completamente desarrollados, se desaloja el agua contenida en los tanques de precarga y la estructura está lista para ser elevado a la altura de operación.
 - La magnitud de la precarga requerida, depende de las características de la plataforma autoelevable, de las fuerzas y las reacciones ambientales requeridas.
- Durante las operaciones de elevado, la estructura se monitorea para mantener los diversos parámetros dentro de los rangos de diseño de operación. Una vez que se alcanza la altura de operación, el sistema de elevado se detiene y se activan los seguros de las piernas. Entonces, la plataforma autoelevable estará lista para realizar los trabajos.
- Cuando la unidad se encuentra en el modo de operación de trabajos, en especial cuando el cantiliver es extendido en su totalidad y/o las cargas sobre esta parte de la estructura son grandes, se debe tener especial cuidado de que los esfuerzos inducidos al sistema de apoyo estén dentro del intervalo de seguridad, que se especifica como un porcentaje de los esfuerzos inducidos durante las operaciones de precarga.
- En el caso de mal tiempo o tormenta, la plataforma autoelevable debe configurarse en el modo de resistencia a tormentas, en esta configuración las operaciones deben suspenderse, los equipos y materiales asegurarse, y cerrar las escotillas verificando que

estén herméticas. En los casos de tormentas severas o huracanes, el personal y la tripulación deben ser evacuados de la unidad.

1.2.3 Cargas Ambientales Básicas y Análisis Estructural.

1.2.3.1 Cargas por Viento.

Resultan del efecto inducido sobre el área expuesta a la atmósfera de los elementos estructurales (Figura 1.2-14). Estas cargas son función de la velocidad del viento, la proyección del área de los elementos estructurales, los coeficientes de presión y la altura a la que está elevada la estructura. Las áreas proyectadas por el casco y los demás elementos expuestos, y los coeficientes de presión tienen un efecto directamente proporcional sobre las cargas.

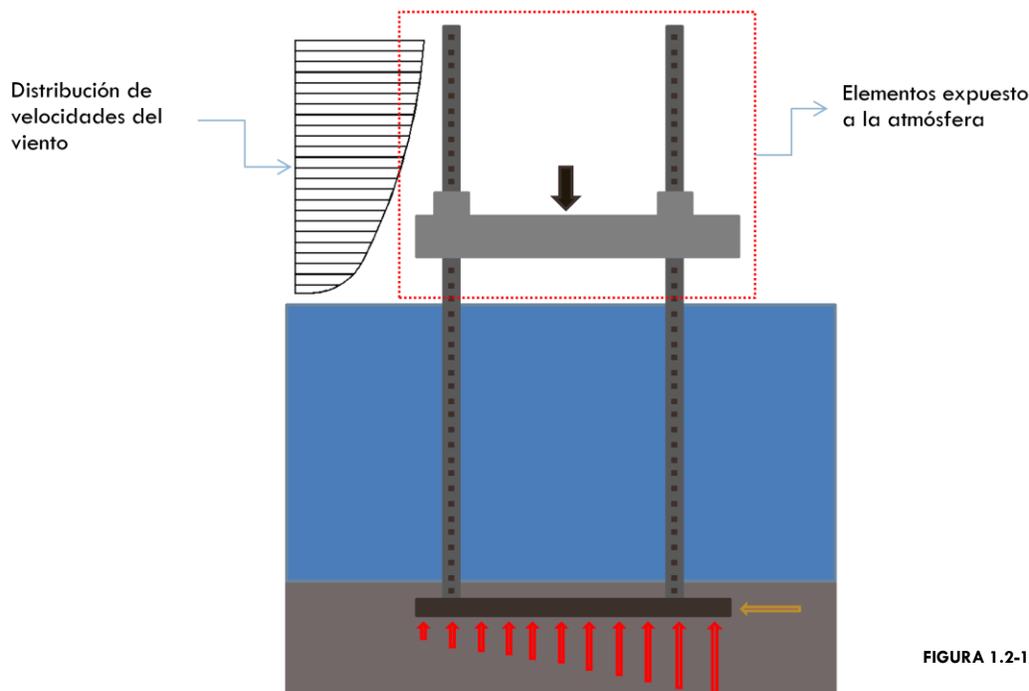


FIGURA 1.2-14 CARGA POR VIENTO

El viento es de naturaleza aleatoria y tiene grandes variaciones en su rapidez y dirección tanto en el espacio como en el tiempo. Para el diseño de estructuras costa fuera es conveniente considerar la velocidad del viento $\bar{v}(\bar{x}, t)$, generado en una tormenta en un instante t , en una dirección horizontal dada θ , y en un punto con vector de posición \bar{x} , como la suma de dos términos, tal como se muestra enseguida (7):

$$\bar{v}(\bar{x}, t) = \bar{u}(\bar{x}) + \bar{u}_g(\bar{x}, t)$$

donde $\bar{u}(\bar{x})$ es la componente estable del viento, igual a la velocidad media durante la tormenta y $\bar{u}_g(\bar{x}, t)$ es la componente fluctuante conocida como ráfaga de viento. La velocidad media del viento se utiliza para calcular la fuerza estática en estructuras marinas. Las ráfagas generan fuerzas dinámicas que llegan a ser importantes en estructuras con características dinámicas tales que entren en resonancia

en algunos modos de vibrar. Generalmente, la componente estable del viento se usa para calcular las cargas globales de viento en un sistema estructural, y las ráfagas se usan en el diseño de elementos estructurales individuales.

La componente estable del viento, promediada en un intervalo adecuado de tiempo, a diferentes alturas z sobre el nivel del terreno o superficie tranquila del mar está dada por leyes deterministas como la siguiente (7):

$$u(z, t) = u^*(t)\chi(z)$$

donde $u^*(t)$ es la rapidez media del viento a una altura de referencia z^* , $\chi(z)$ es un factor que toma en cuenta la variación de la rapidez del viento con la altura debida a la rugosidad de la superficie. Por ejemplo, para calcular la rapidez media horaria $u(z)$ en ft/s a una altura z (ft), el API (8) recomienda la fórmula:

$$u(z) = u_0 \left(1 + C \ln \left(\frac{z}{32.8} \right) \right)$$

donde:

$$C = 5.73 \times 10^{-2} (1 + 0.0457 u_0)^{1/2}$$

donde u_0 es la rapidez de viento media horaria a 32.8ft de altura.

En general los intervalos de tiempo de referencia en el cual se promedia la rapidez de viento medida en un sitio en particular y a una altura determinada, son los siguientes (9):

- Rapidez de ráfaga del viento: Promedio de la rapidez del viento durante un intervalo de tiempo de 3s
- Rapidez horaria del viento: Promedio de la rapidez del viento durante un intervalo de tiempo de una hora.
- Rapidez sostenida del viento: La rapidez del viento promedio durante un intervalo de tiempo de 1 minuto

1.2.3.2 Cargas por oleaje y corriente.

Resultan por el efecto sobre la parte de las piernas que están por debajo del tirante de agua en la configuración elevada. Estas cargas son función directa de la altura y el periodo del oleaje, la velocidad de la corriente, los coeficientes de arrastre e inercia y la proyección de las áreas de las piernas. El casco no participa ya que la plataforma

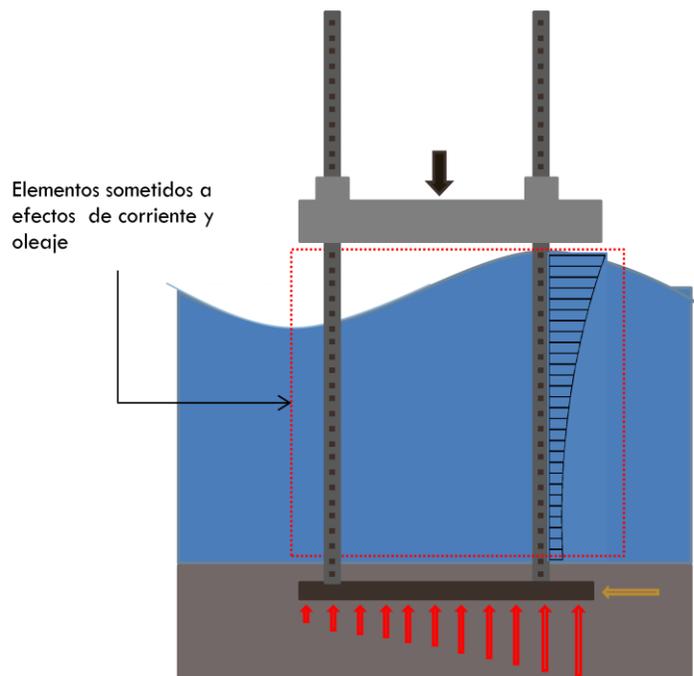


FIGURA 1.2-15 CARGA POR OLEAJE Y CORRIENTE

autoelevable debe lograr la elevación suficiente para librar el oleaje en tormenta. Las cargas inducidas son el resultado de los efectos combinados tanto del oleaje como de la corriente, por ejemplo las cargas máximas de una ola a una velocidad de corriente dadas, es la suma de las cargas debido a la ola y las de la corriente en el pico de la ola (Figura 1.2-15).

- **Oleaje:**

- Se pueden mencionar tres formas básicas de olas:
 - olas sinusoidales,
 - olas cnoidales y
 - olas solitarias.
- Cada forma de la ola se puede analizar con teorías de orden inferior y superior. Para calcular las fuerzas que el oleaje induce en una estructura es necesario primero seleccionar una teoría de oleaje adecuada para calcular las velocidades y aceleraciones de las partículas del agua, por ejemplo: para oleaje en aguas profundas, la teoría de ola sinusoidal puede ser adecuada, mientras que para aguas someras la teoría de ola cnoidal es la recomendada. En aguas extremadamente someras, se recomienda el uso de la teoría de ola solitaria. Cuando las fuerzas de arrastre son importantes, debe considerarse una teoría de orden superior, mientras que si las fuerzas de inercia son las predominantes el uso de una teoría de orden inferior es suficiente (10).
- Las fuerzas inducidas por oleaje involucran el cálculo de los campos de velocidad y aceleración de las partículas del agua que rodean a los elementos estructurales mediante alguna de las teorías de oleaje que se describen a continuación. Luego, las velocidades y aceleraciones se utilizan para calcular las fuerzas mediante la consideración de diferentes procesos físicos que afectan la interacción entre el fluido y la estructura:
 - **Teoría de oleaje lineal:** ésta teoría es la base para la descripción espectral probabilística de las olas. Se supone que la elevación de la superficie del mar es sinusoidal y que las órbitas de las partículas son circulares. El potencial de velocidad, la ecuación de Laplace, de Bernoulli junto con las condiciones de frontera apropiadas proporcionan la información necesaria para derivar las expresiones analíticas que definen la velocidad, la aceleración, la presión dinámica, etc.
 - **Teoría no lineal (trocoidal):** donde las órbitas de las partículas son circulares, lo cual, junto con otras hipótesis, conduce a la solución exacta para olas de amplitud finita con una elevación trocoidal de la superficie del mar.
 - **Teoría no lineal (Stokes):** donde el fluido se considera irrotacional. Las ecuaciones gobernantes se formulan de manera similar a las de la teoría lineal de oleaje y su solución se formula usando series de términos de orden ascendente. Esta teoría falla en aguas someras, esto es cuando el tirante de agua es menor que $1/8$ de la longitud de ola. Las teorías de la ola solitaria, de la ola cnoidal y de la función de corriente vienen a compensar esta deficiencia.
 - **Teoría no lineal de función de corriente "Stream Function":** que se basa en el hecho de que el problema de olas de gravedad para influjo bidimensional irrotacional puede formularse en términos de la función de corriente. Para

reducir el problema a uno de flujo permanente se considera que el sistema de referencia, inicialmente colocado en el nivel medio de la superficie del mar, se mueve con una velocidad constante igual a la celeridad de las partículas. Se supone que la solución a la ecuación de continuidad es la función de corriente representada por una serie de orden n de funciones senos y cosenos.

Cada una de las teorías antes mencionadas está basada en ciertas hipótesis, lo cual lleva a que cada teoría de oleaje es aplicable a un tipo particular de problema. Para la selección de la teoría de oleaje adecuada, esta tesis se basa en las recomendaciones del API-RP-2A, 20^A (8) (11). Aquí se determinó la teoría de oleaje en función de la altura de ola, tirante de agua (incluyendo marea de tormenta y marea astronómica) y el periodo de ola aparente. El periodo aparente de la ola considera el efecto de Doppler de la corriente sobre el oleaje.

Las teorías de oleaje, como la de Stokes o la de función de corriente (en inglés, stream function) no toman en cuenta la irregularidad de la dirección de las olas. Estas características se pueden tomar en cuenta multiplicando las velocidades y aceleraciones horizontales de las partículas del agua por el factor de cinemática de la ola. Para tormentas tropicales se ha visto que este factor es entre 0.85 y 0.95; y entre 0.95 y 1.00 para tormentas extratropicales.

- **Corriente:**

- Las fuerzas que las corrientes inducen sobre los elementos que se encuentran debajo de la superficie del mar, se calculan de la misma manera que las fuerzas del viento. Existen algunas diferencias como que las fuerzas de corriente no exhiben fluctuaciones como las del viento, las velocidades son mucho menores ($< 2.5\text{m/s}$), y la densidad del agua es mayor que la del viento.
- Existen diferentes tipos de corrientes y las más comunes son: la originada por mareas (astronómicas), la generada por el viento (por tormentas) y las relacionadas con la circulación oceánica. La suma vectorial de estos tipos de corriente es igual a la corriente total y su rapidez y dirección varían con la profundidad y éstas quedan definidas por un perfil de corriente.
- En general la rapidez de la corriente disminuye con la profundidad, por ejemplo en algunos casos el perfil de velocidad de la corriente originada por el viento se considera lineal con la profundidad con valor máximo en la superficie del mar y un valor nulo en el fondo marino. La velocidad de corriente originada por viento en la superficie del mar llega a ser del orden de 2% a 3% de la rapidez de viento horaria de tormentas tropicales, y de hasta 1% de la rapidez de viento horaria durante tormentas de invierno.

1.2.3.3 Hielo y nieve.

Afectan el peso de la estructura por acumulación en las zonas expuestas a la atmósfera y las que están en la zona de salpicadura.

1.2.4 Análisis estructural.

En el análisis estructural típico para la configuración elevada para un tirante de agua, altura expuesta a la atmósfera, y condiciones de viento, oleaje y corriente dados, es común suponer que las cargas inducidas por las condiciones ambientales sean horizontales y se supone que actúan en una dirección a la vez. Mientras que el efecto del viento y la corriente generalmente se consideran estacionarios, el oleaje tiene naturaleza cíclica, por lo tanto bajo esta última condición es común efectuar un análisis dinámico, no obstante, en condiciones prácticas, el oleaje se puede tratar como una sollicitación casi estática, tomando en cuenta la ola crítica en posición de modo tal que la cresta induzca la mayor efecto (cortante basal, momento de volteo, etc.), afectada a su vez por un factor de amplificación para considerar los efectos dinámicos.

Las cargas ambientales deben aplicarse en diferentes direcciones discretas como condiciones de carga. Los desplazamientos laterales de la parte superior (el casco) suelen ser relativamente pequeños. Debido a la magnitud de las cargas gravitacionales, los desplazamientos laterales, aunque son pequeños, pueden inducir un efecto importante en las cargas que bajan las piernas al sistema de apoyo (MAT o Spud-Cans). Los efectos P-delta se deben tomar en cuenta en el análisis de la configuración elevada.

Las Plataformas Autoelevables en el modo elevado tienen cierto periodo natural de vibración. Dicho periodo suele ser relativamente bajo en comparación cuando la embarcación está en modo de tránsito (configuración en modo de flotación). Los siguientes factores afectan el periodo natural en el modo elevado:

- Factores que aumentan el periodo:
 - La profundidad del tirante de agua, la altura de la parte expuesta a la atmósfera.
 - El peso del casco y de los equipos en la cubierta.
- Factores que disminuyen el periodo:
 - La resistencia al volteo en el caso de MATs o la fijación de los Spud-Cans en el lecho marino.
 - La sección transversal de las piernas, si la sección es más robusta ofrecerán mayor rigidez lateral.

Si bien las Plataformas Autoelevables son estructuras complejas, dentro del contexto del análisis dinámico, su modelación puede hacerse mediante un sistema resorte-masa-amortiguador, más aún, un sistema de un solo grado de libertad es razonablemente aproximado.

En las condiciones de tormenta comúnmente el oleaje tiene un periodo entre 12 y 17 segundos mientras que en condiciones de operación normal se tienen periodos entre 5.5 y 8 segundos. Las Plataformas Autoelevables en el modo elevado operando en tirantes de agua grandes, tienen periodos naturales entre 5 y 12 segundos. Esto último indica que se pueden tener problemas de resonancia bajo condiciones de operación normales, en tales casos debe realizarse un análisis dinámico. Para tirantes de agua relativamente cortos (alrededor de 24m) un análisis estático por cargas equivalentes arroja resultados razonables.

1.2.5 Posibles Condiciones de Falla.

Cada plataforma autoelevable tiene condiciones de daño y/o falla particulares, esto es como resultado del contexto de diseño que atiende diferentes aspectos de operación. Es de gran importancia comprender y tener en observación dichas fases de riesgo de una plataforma autoelevable para evitar posibles problemas durante las fases de operación o tormenta. En general las fases de riesgo más comunes que se deben observar son (1) (3) (4) (6):

- Arrastre o Remolcado: durante esta operación se han presentado accidentes frecuentes debido a varias razones: existe la tendencia a sobrecargar la plataforma autoelevable durante el tránsito para llevar el mayor número de equipos y materiales. El problema principal es que la forma del casco no es muy eficiente en cuanto a maniobrabilidad, aún cuando se cuente con autopropulsión. El problema de la sobrecarga hace que el margen que existe entre la cubierta y la línea de flotación disminuya, lo que hace que el agua pase sobre la cubierta, y si no se tienen las precauciones necesarias para evitar que penetre dentro del casco, puede hacer que la embarcación zozobre.
- Operaciones de Posicionamiento y Extendido de Piernas: adicionalmente a los problemas de presencia de escombros y tuberías en el fondo marino en el sitio de obra, es importante hacer notar que las piernas de diferentes unidades se diseñan bajo diferentes condiciones de estado límites de falla. En la etapa final de extendido de las piernas cuando hacen contacto con el fondo marino, hay cargas que pueden estar presentes por impacto con el fondo, entonces puede ocurrir lo siguiente:
 - Periodo de oscilación: a pesar de que periodos pequeños de oleaje inducen relativamente pequeñas amplitudes de oscilación, los periodos bajos pueden inducir velocidades y aceleraciones altas; incluso marejadas (periodos largos de oleaje) pueden inducir repuestas casi de uno a uno.
 - Rigidez del suelo: lechos marinos duros pueden ocasionar impactos grandes en las piernas.
 - Forma y calado del casco: le forma y el calado del casco afectan la respuesta al oleaje de diferentes periodos y en diferentes direcciones.
 - Depresiones de Spud-Cans de otras Plataformas Autoelevables: se debe tener especial cuidado de evitar colocar las piernas sobre depresiones hechas por otros Plataformas Autoelevables, ya que éstas pueden causar que las piernas se desvíen causando momentos inducidos en las piernas que pueden dañarlas. Existen varia técnicas para controlar estos tipos de problemas en las operaciones de posicionamiento (Fig. 1.1-17).



FIGURA 1.2-16 COLAPSO DE JACP-UP POR FALLA DEL SISTEMA DE APOYO

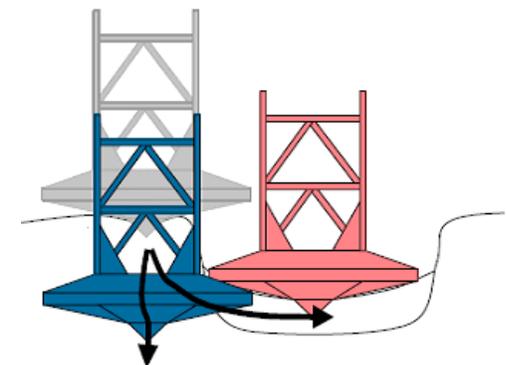


FIGURA 1.2-17 FALLA POR PENETRACIÓN POR COINCIDENCIA DEL SPUD-CAN SOBRE OTRA HUELLA DE OTRA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

- Operaciones de precarga y elevado:
 - Plataformas Autoelevables con Spud-Cans: se deben tener las precauciones necesarias para actuar en el caso de asentamientos repentinos, esto es por penetración en el lecho marino de una o más piernas. Estos riesgos de falla en el lecho marino se han incrementado con el aumento en la demanda de las Plataformas Autoelevables en aguas más profundas y en condiciones ambientales más severas, lo que resulta en la necesidad de aplicar mayores pesos de precarga. Cuando un evento de esto ocurre el asentamiento repentino induce momentos flexionantes importantes, causando la falla por pandeo local de los elementos estructurales que conforman las piernas (Figura 1.2-18).
 - Plataformas Autoelevables con MAT: el problema principal que se puede presentar es por asentamiento diferenciales causados por socavación del fondo marino debido a las corrientes grandes adyacentes al fondo marino arenosos, cuando existen escombros, zonas rocosas o de mayor capacidad de carga en la zona de apoyo del MAT. Estas condiciones de asentamiento inducen también momentos flexionantes que resultan en fallas de las piernas. Esto es especialmente peligroso cuando la plataforma se encuentra en el modo elevado (Figura 1.2-19).
- Modo elevado y operaciones de obra en sitio a largo plazo:
 - Las condiciones de asentamiento diferencial señaladas anteriormente tienen mayor relevancia en operaciones en sitio a largo plazo.
 - La actividad sísmica y sus efectos en el lecho marino deben considerarse en ciertos sitios de trabajo. El efecto más severo inducido por un sismo es la licuación de lechos arenosos.

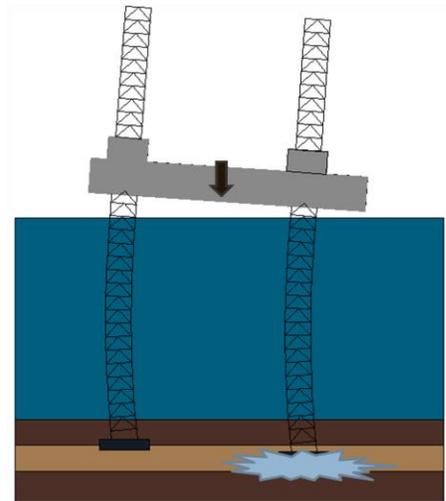


FIGURA 1.2-18 FALLA POR SOBRECARGA DEL LECHO MARINO

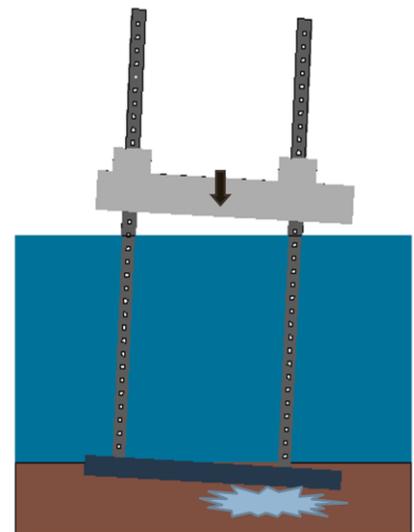


FIGURA 1.2-19 FALLA POR SOBRECARGA

FIGURA 1.2-20 ACCIDENTE DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE USUMACINTA (SONDA DE CAMPECHE, GOLFO MÉXICO)



1.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS

Para simular el comportamiento suelo-estructura de la plataforma autoelevable se desarrollará un modelo matemático tridimensional apoyado en un sistema de resortes calibrados por iteraciones. La respuesta de este modelo se verificará comparando los asentamientos en el sistema de apoyo MAT con los resultados obtenidos con otros modelos.

Los programas de cómputo usados para el desarrollo de los modelos son:

- SACS® versión 5.2. Éste es el programa de uso común para el análisis y diseño de plataformas marinas, entre sus múltiples características, tiene la capacidad de modelar las cargas para las condiciones metaoceánicas (oleaje, viento y corriente). En este programa se modelará la plataforma autoelevable incluyendo los resortes como sistema de apoyo para el MAT.
- PLAXIS 3D Foundation®: es un programa especializado para modelar por elementos finitos las cimentaciones, en este caso el MAT, junto con las características de la estratigrafía del suelo. Tiene la capacidad de modelar el suelo marino especificando un tirante de agua por encima del lecho.
- SAFE® 12.0: es un programa similar al PLAXIS® con el que se desarrolla modelos de elementos finitos de la cimentación. La diferencia principal con el PLAXIS® consiste en que el suelo lo simula como un medio continuo cuya única característica es su módulo de reacción considerado constante.

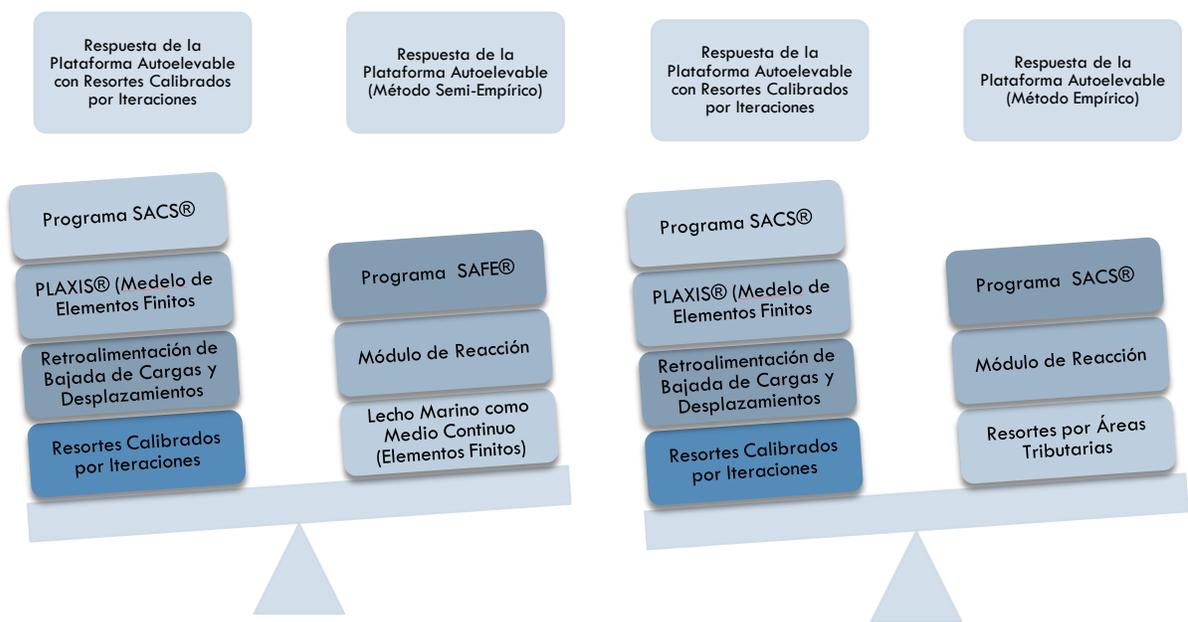
En la primera etapa de la tesis se analizan las condiciones para el desarrollo de los modelos matemáticos tridimensionales:

1. Modelo en SACS® de la plataforma autoelevable con los resortes calibrados: dados los objetivos de la tesis no es necesario modelar a detalle todos los elementos que conforman la estructura de la plataforma, básicamente se requiere de un modelo simplificado con las siguientes características:
 - Transmisión de cargas gravitacionales: dichas cargas están compuestas por el peso propio del casco, equipos y accesorios sobre la cubierta, para este caso de análisis, no es necesario modelar a detalle el casco, por lo que solo se considera como un cuerpo infinitamente rígido conectado a las piernas y aplicando las cargas en los nudos correspondientes en la cubierta.
 - Transmisión de cargas laterales: el casco, equipos y accesorios sobre cubierta, y las piernas de la plataforma autoelevable aportan áreas expuestas a la atmósfera, y a las corrientes, en el caso de las piernas, a lo largo del tirante. En el modelo se especifican dichas áreas como “pantallas” conectadas a los nudos correspondientes del modelo.
 - Sistema de rigidez lateral: durante la fase de operación (la fase elevada), las piernas son los elementos de soporte de la plataforma autoelevable ante al diferentes condiciones de carga, por lo que dada su importancia, estos elementos se modelan de forma detallada de modo de incluir todas las características geométricas, conexiones y de materiales que las componen.
 - Sistema de apoyo sobre el lecho marino (MAT y resortes): al igual que el casco, no son de interés los elementos mecánicos desarrollados dentro de la estructura del MAT, por otro lado en la realidad, este elemento es un sistema estructural muy rígido, por lo tanto para efectos de este análisis es suficiente modelar el MAT como otro cuerpo infinitamente rígido en cuyos nudos de soporte se especifican las características de rigidez de los resortes.

2. Modelo en PLAXIS®: el MAT y el suelo marino se modelan con elementos finitos incluyendo las características del MAT y la estratigrafía del sitio donde se posiciona la plataforma autoelevable. Este modelo recibe las cargas de las columnas a través del MAT, de este modo se obtienen los desplazamientos que servirán para realizar las iteraciones en la calibración de los resortes.
3. Modelo en SAFE®: de forma similar al PLAXIS®, se desarrollará un modelo de elementos finitos que incluye el MAT y el suelo marino, la mayor diferencia subyace en que las características y propiedades del suelo quedan definidas sólo por el módulo de reacción obtenido en forma empírica (12), este modelo se utiliza para comparar las respuesta con el modelo de los resortes calibrados.
4. Copia del Modelo matemático tridimensional en SACS®. En este modelo la rigidez de los resortes en el MAT son calculados en forma directa considerando el módulo de reacción y las áreas tributarias de los nudos de apoyo. Este modelo se utilizará también para comparar con la respuesta del modelo de resortes calibrados.

En la segunda etapa de la tesis se presentan los resultados de la calibración de las rigideces de resortes obtenidas de las iteraciones entre los modelos de SACS® y PLAXIS®. Dado que la respuesta de la plataforma se analiza con resortes elásticos, adicionalmente se presenta en el APÉNDICE IV, el análisis de la respuesta con resortes inelásticos, mismos que son calculados a partir de las rigideces ya calibradas por el método iterativo. En este apéndice presentan las gráficas de comparación de respuesta de la plataforma bajo diferentes condiciones de fluencia de los resortes.

Finalmente, la respuesta de la estructura con los resortes elásticos calibrados, se compara con las repuestas de los modelos cuyas características consideran el módulo de reacción, que como ya se mencionó anteriormente, se obtuvo en forma empírica (12), en las gráficas se puede apreciar las diferencias entre las respuestas de los diferentes modelos considerados en la tesis. (Figura 1.3-1)



2

FIGURA 1.3-1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

2 DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS TRIDIMENSIONALES

En esta sección se analizan los parámetros que definen las condiciones para el desarrollo de los modelos matemáticos, estos parámetros se utilizarán para los procesos de cálculo que se realizará en la sección 3.1. En la sección 2.1 se analizan las condiciones para la definición de los modelos tridimensionales de SACS® y PLAXIS® que se utilizan en el proceso que corresponde al método iterativo. En la sección 2.2 se revisarán los parámetros para resumir las características del suelo marino con el módulo de reacción (12), éste parámetro se utilizará en las secciones 3.2 y 3.3; y por último en la sección 2.3 se revisarán la geometría y los datos que se necesitan para definir otro modelo tridimensional que se utiliza en el método alternativo de la sección 3.3, éste modelo utiliza exclusivamente el módulo de reacción como propiedad del suelo (medio continuo) determinado en la sección 2.2.

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA SUPERESTRUCTURA Y DEL SUELO MARINO CONSIDERANDO LA ESTRATIGRAFÍA

2.1.1 Modelo matemático tridimensional de la Plataforma Autoelevable con el programa SACS®.

Para desarrollar el modelo es necesario contar con la información acerca de la ubicación del sitio de posicionamiento de la plataforma autoelevable, en este caso se utilizan los datos típicos de las condiciones ambientales del área de Rebomero en la Sonda de Campeche, (Figura 2.1.1-1)

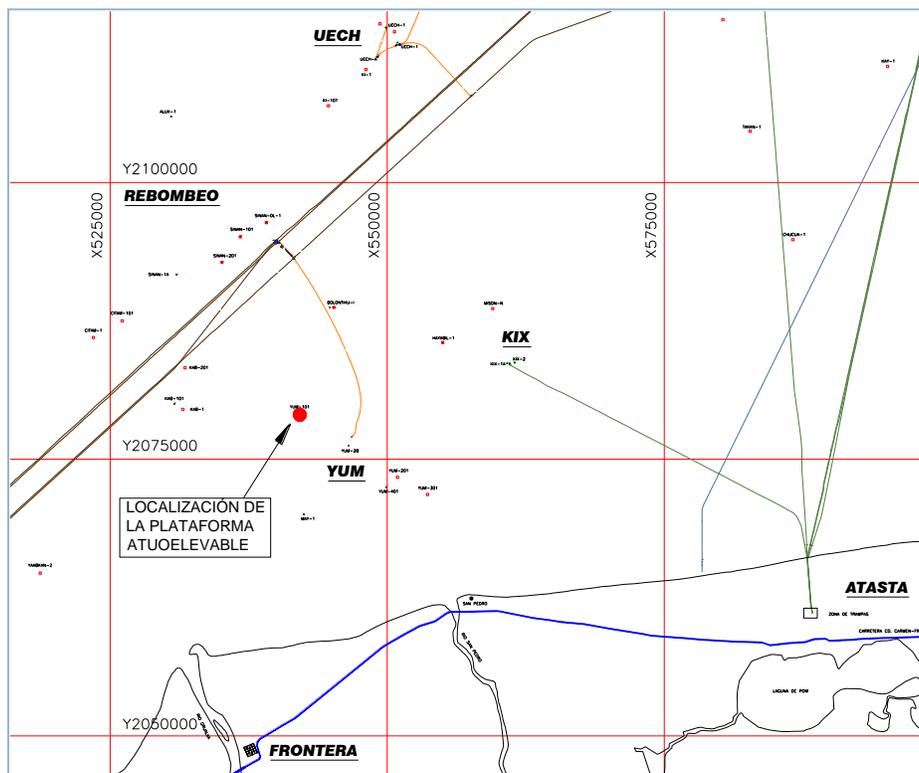


FIGURA 2.1.1-1 LOCALIZACIÓN DE LA PLATAFORMA AUTOELEVABLE

En el sitio, de acuerdo a lo indicado en las NRF-003-PEMEX-2000 (11), se obtienen los parámetros de los extremos meteorológicos y oceanográficos para condiciones de operación en las áreas indicadas.

TABLA 2.1.1-1 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LAS FUERZAS DE OLAJE

Periodo de la ola	$T = 12.7 \text{ s}$
Tirante de agua incluyendo mareas	$d = 24 \text{ m}$
Velocidad promedio del perfil de la corriente.	$V_1 = (140+100+80)/3 = 106 \text{ cm/s}$
Aceleración de la gravedad	$g = 981 \text{ cm/s}$

TABLA 2.1.1-2 PERFIL DE LA CORRIENTE

Profundidad	Dirección	Rapidez (cm/s)
0	Dirección del oleaje	140
50%	Dirección del oleaje	100
95%	Dirección del oleaje	80

2.1.1.1 Datos geométricos de la Plataforma Autoelevable en un modelo matemático tridimensional.

El modelo que se analiza es el de una estructura semejante a la plataforma autoelevable "Hércules Drilling 30" (2) cuyo sistema de apoyo en el lecho marino consiste en un MAT que une las tres piernas (Figuras 2.1.1-2 y 2.1.1-3).



FIGURA 2.1.1-2 PLATAFORMA AUTOELEVABLE HERCULES EQUIPADA CON MAT

A continuación se presenta en forma esquemática los componentes más importantes en el modelo realizado con el programa SACS® (13) (14).

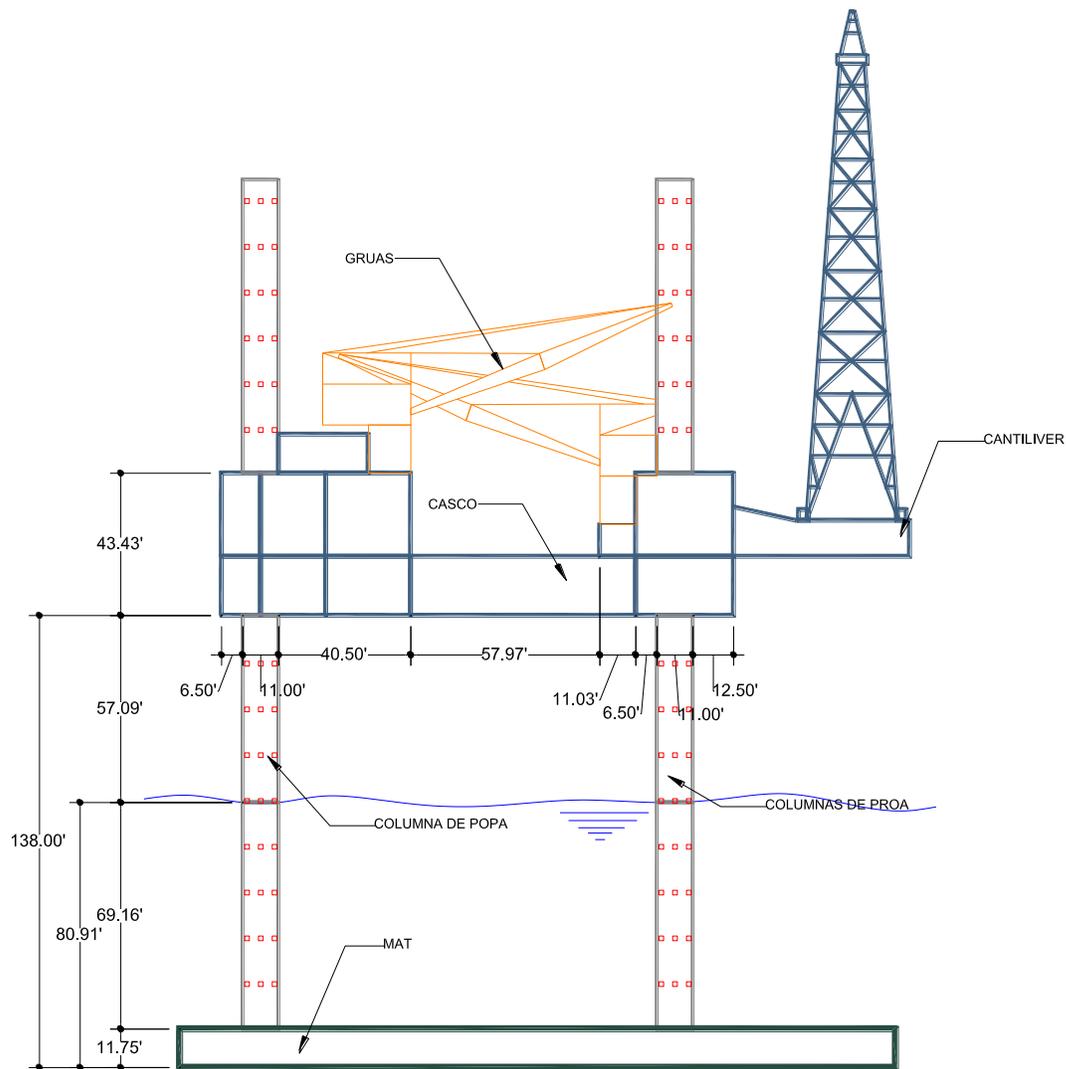


FIGURA 2.1.1-3 ELEVACIÓN ESTRIBOR DE LA PLATAFORMA AUTOELEVABLE

Dado que en el ámbito de análisis y diseño de proyectos costa fuera así como en el software de análisis estructural, se manejan unidades inglesas, las figuras que aquí muestran la geometría de la estructura están en pies y kips. En la planta que se muestra en la figura 2.1.1-4 se representa la cubierta (Deck) del casco y la localización de la cargas permanentes sobre la cubierta, en este caso son las cargas debidas a los equipos y tanques. Estos deben estar distribuidos de tal manera que el centro de gravedad coincida con el del MAT.

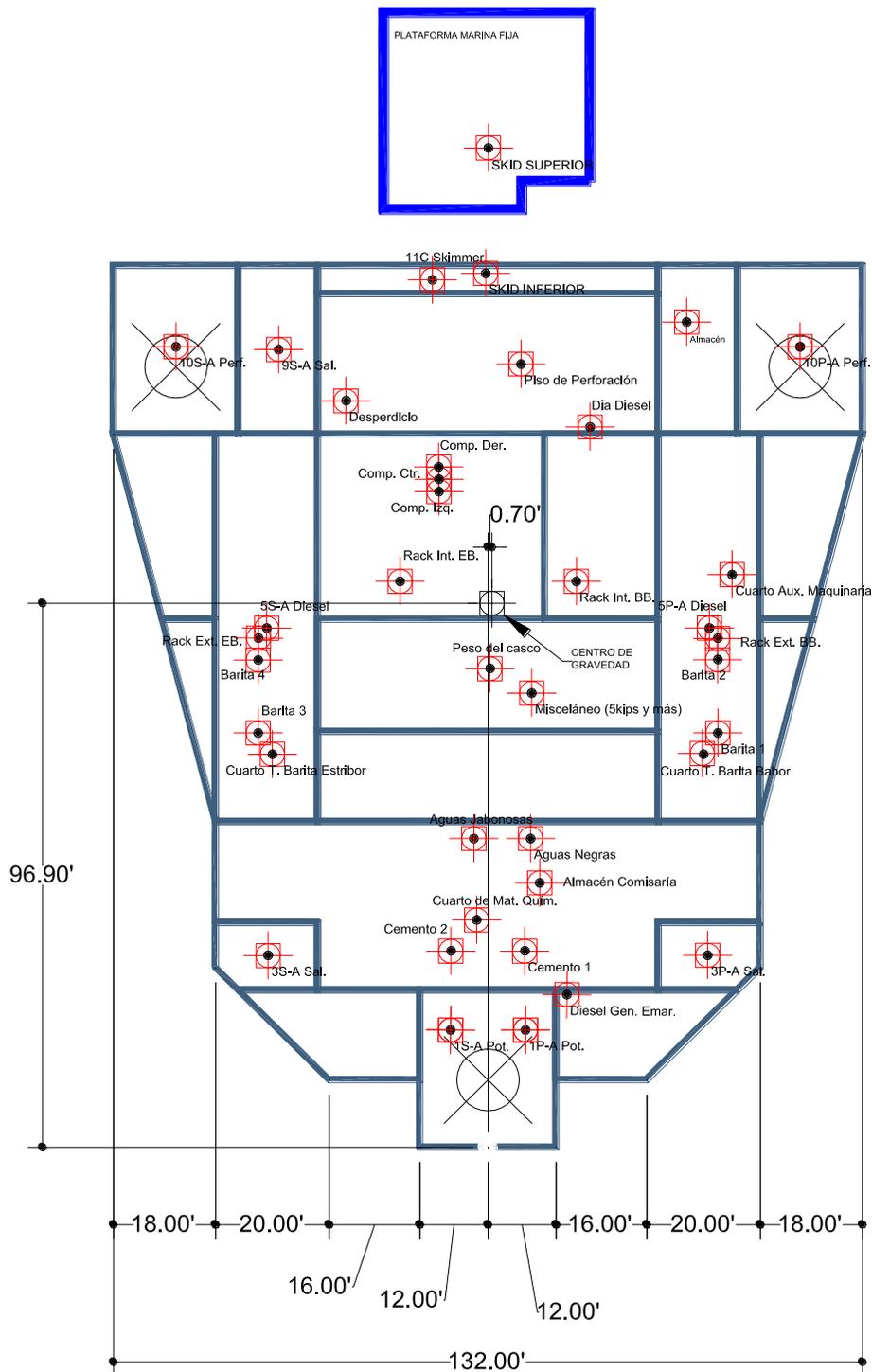
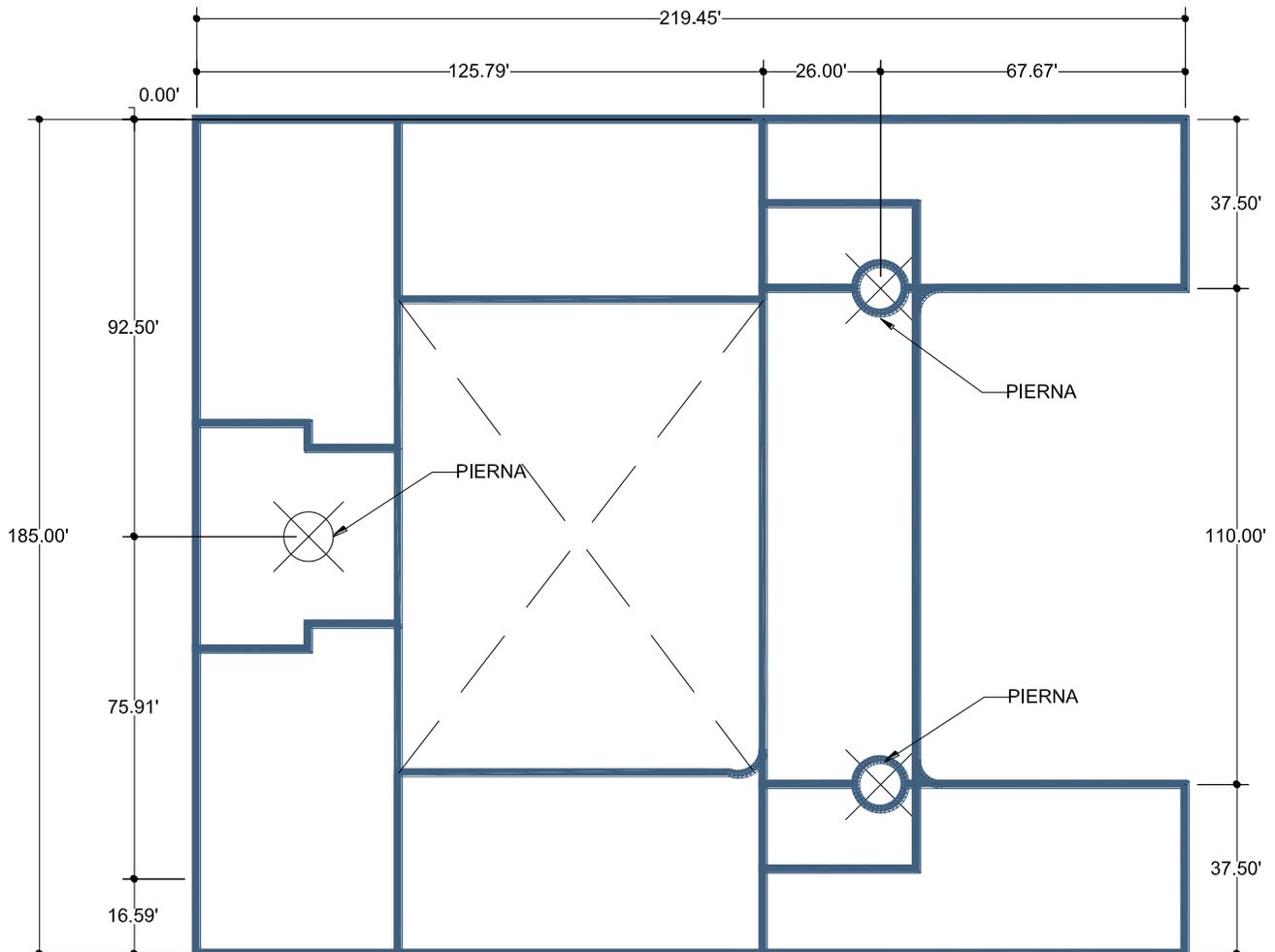


FIGURA 2.1.1-4 VISTA EN PLANTA DEL CASCO (DECK)

La vista en planta del MAT (figura 2.1.1-5) muestra los puntos de apoyo de las piernas de la plataforma autoelevable. El MAT está estructurado en cámaras divididas por una serie de placas (Figura 2.1.1-5 solo se muestra de forma esquemática), las cuales proporcionan rigidez al sistema. El Mat debe lastrarse para poder bajarlo al lecho marino.



2.1.1-5 VISTA EN PLANTA DEL MAT

2.1.1.2 Análisis de cargas.

En lo que sigue se realiza el análisis de cargas considerando en el modelo las condiciones de carga debidas al oleaje, viento y corriente.

Como se mencionó anteriormente, por naturaleza, las cargas de oleaje viento y corriente son de carácter dinámico, sin embargo en aguas poco profundas, como en este caso de análisis (tirante de 24m), dichas cargas pueden aproximarse razonablemente por cargas estáticas equivalentes, dicha aproximación se obtiene con la teoría de oleaje adecuada. Siguiendo las recomendaciones del API-RP-2A (8), la gráfica de la figura 2.1.1-7, de acuerdo con los parámetros del sitio, se obtiene la teoría de oleaje que aplica para este caso de análisis.

Debido a que el tirante es corto se espera que el periodo de la plataforma autoelevable (considerando la interacción con el suelo) sea alrededor de 2s [Sección 1.2.4] (1) (2) mientras que el periodo de las olas es de 12.7s (8) (11), por lo que es suficiente realizar un análisis estático ante las cargas de oleaje, viento y corriente.

En este caso de análisis, como las dimensiones estructurales son pequeñas con relación a la longitud de la ola ($D/L < 0.2$) y la estructura no afecta al campo de velocidades del flujo, por lo que las fuerzas hidrodinámicas se pueden determinar utilizando la ecuación de Morison (8). En este caso las propiedades de la ola no se afectan por la presencia de la estructura y las fuerzas de oleaje se expresan como la suma de fuerzas de inercia (debida a la aceleración del fluido) y la fuerza de arrastre (debida a la velocidad del fluido). Para un cilindro de diámetro D normal a la dirección de la propagación de la ola, la fuerza total por unidad de longitud del cilindro es igual a:

$$F = C_D A_D |u|u + C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t}$$

donde C_M es el coeficiente de inercia, C_D es el coeficiente de arrastre, u es la velocidad horizontal de las partículas de agua, y:

$$A_I = \frac{\pi}{4} \rho D^2, \quad A_D = \frac{1}{2} \rho D$$

donde:

A_I = factor que incluye el volumen desplazado de un cilindro por unidad de longitud para el efecto de inercia del elemento,

A_D = factor que incluye la proyección del área normal al eje del cilindro por unidad de longitud para el efecto de arrastre.

El coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds. Para propósitos de diseño $C_D = 0.65$ es razonable para elementos tubulares. Por otra parte se ha encontrado teóricamente que para cilindros cuyos diámetros son pequeños en comparación con la longitud de ola, $C_D = 2.0$.

Entonces de acuerdo a los parámetros obtenidos de la tabla 2.1.1-1:

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{2400}{981(12.7)^2} = 1.51 \times 10^{-2} \quad \text{y} \quad \frac{V_1}{gT} = \frac{106}{981(12.7)} = 8.51 \times 10^{-3}$$

Con estos valores se obtiene el periodo aparente T_{app}/T a partir de la figura 2.1.1-6 (8):

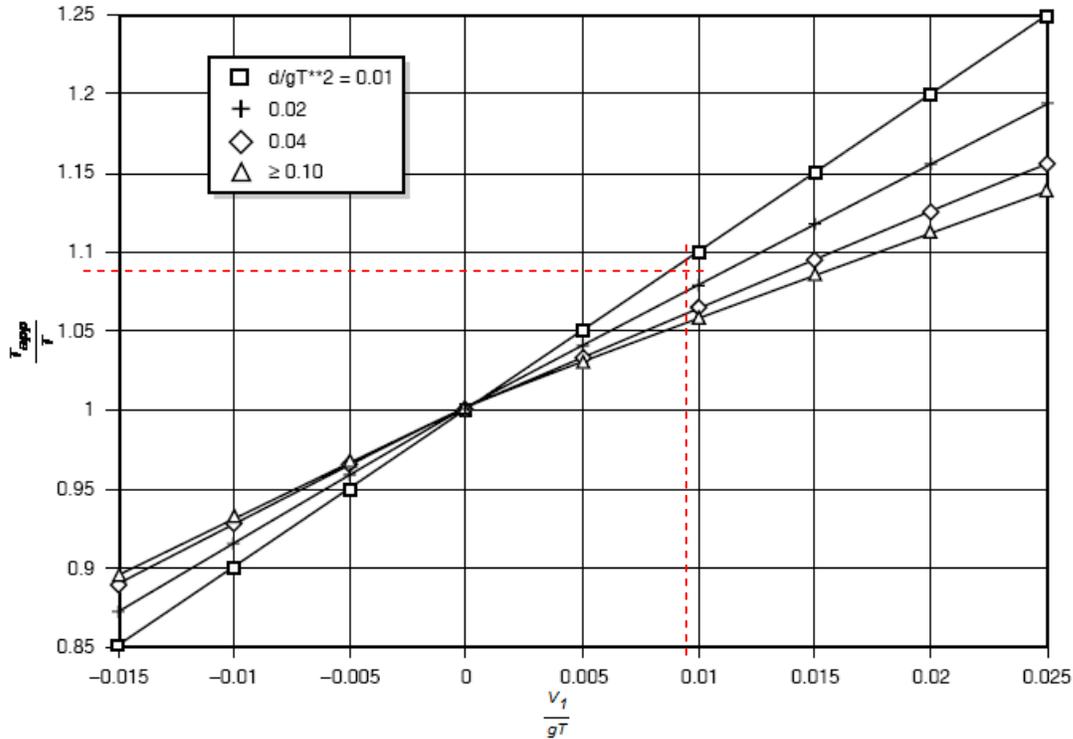


FIGURA 2.1.1-6 GRÁFICA PARA OBTENER EL PERIODO APARENTE API-RP-2A-20^A (8) [API 2.3.1-2]

$$T_{app} = 1.074(12.7) = 13.64s$$

Con el valor del periodo aparente se obtienen los valores de los siguientes parámetros:

$$\frac{H}{gT_{app}^2} = \frac{900}{981(13.64)^2} = 4.93 \times 10^{-3} \quad \frac{d}{gT_{app}^2} = \frac{2400}{981(13.64)^2} = 1.31 \times 10^{-2}$$

y de la figura 2.1.1-7 (8) [API 2.3.1-3] se obtiene que la teoría del oleaje aplicable es: **STREAM FUNCTION de orden 5**. Este conjunto de valores se utilizan en el archivo de datos del modelo de SACS® para la generación del oleaje.

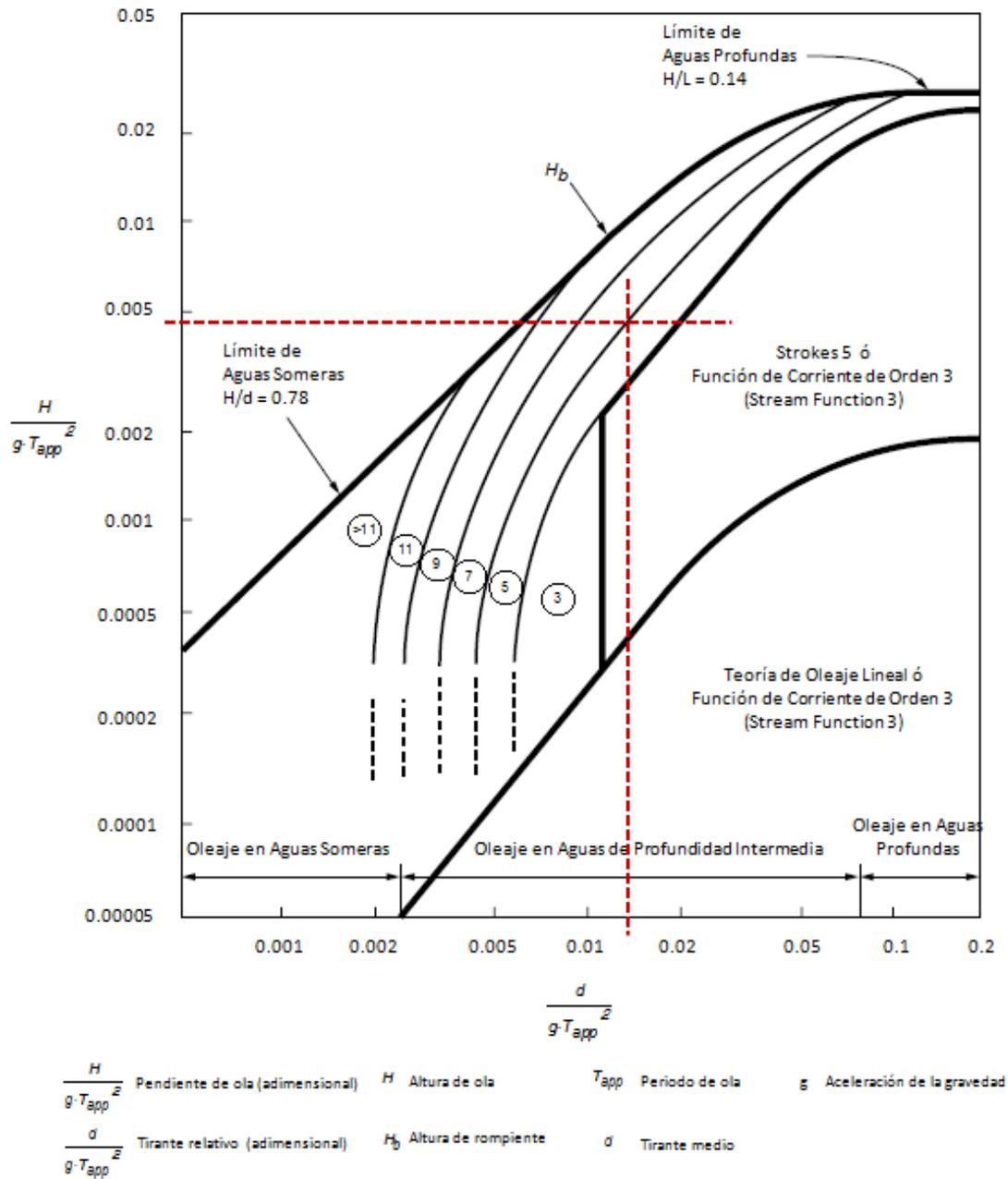


FIGURA 2.1.1-7 GRÁFICA PARA DETERMINAR LA TERIA DE OLEAJE (API-RP-2A-20^A)

El factor de cinemática de ola utilizado se muestra en la tabla 2.1.1-3.

TABLA 2.1.1-3. FACTOR DE CINEMÁTICA DE LA OLA

CONDICIÓN AMBIENTAL	FACTOR DE CINEMÁTICA DE LA OLA (8)
Extrema (tormenta)	0.85

Cálculo de la fuerza inducida por oleaje

Para determinar si la ecuación de Morison es adecuada para éste análisis, se considera que D es igual al diámetro de una columna, es decir: $D=11\text{ft}=3.35\text{m}$. Debido a que la altura de la ola máxima que se presenta en el sitio durante la tormenta de invierno es relativamente pequeña $H=9\text{m}$ (8), la longitud de ola se aproxima a partir de la siguiente relación (10):

$$\frac{d}{L} = \alpha \left(\frac{d}{L_0} \right)^m$$

donde d es el tirante de agua, $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$ y α y m son constantes que dependen de la magnitud de d/L_0 (10). En este caso: $T = 12.7\text{s}$ y $d = 24\text{m}$, por lo que $d/L_0=0.095$. Para el valor de d/L_0 obtenido, $m=0.58$ y $\alpha=0.54$ (10), por lo tanto $L = 173\text{m}$, entonces:

$$d/L = 0.019 < 0.2$$

por lo tanto la ecuación de Morison es aplicable para el cálculo de las fuerzas de oleaje de esta plataforma autoelevable.

Los coeficientes de inercia y arrastre que se usan en el análisis son los que recomienda el API (8):

TABLA 2.1.1-4. COEFICIENTES DE ARRASTRE E INERCIA PARA CILINDROS CON SUPERFICIE LIMPIA

COEFICIENTES	FACTOR
Arrastre (C_d)	0.65
Inercia (C_m)	1.60

- **Fuerzas inducidas por viento:** la plataforma autoelevable se encuentra expuesta al viento en la condición elevada de operación, y como toda estructura que se coloca frente a la corriente del viento, éste se detiene o se desvía, y toda o parte de la energía cinética se transforma en energía potencial de presión. Por lo tanto, las fuerzas inducidas por el viento se deben a las presiones causadas por la obstrucción del flujo libre del viento.

Cálculo de las fuerzas inducidas por el viento

El cálculo de la fuerzas de viento es un problema dinámico; sin embargo, generalmente éste se resuelve considerando presiones estáticas equivalentes. La fuerza de arrastre sobre un objeto se calcula como (8):

$$F = C_s q A$$

donde C_s es un coeficiente que depende de la forma del objeto, A es el área expuesta y q es la presión dinámica inducida por el viento:

$$q = \frac{\rho V^2}{2}$$

donde ρ es la densidad de masa del aire y V es la velocidad del viento.

Parámetros para el cálculo de las fuerzas de viento en la plataforma autoelevable

Para determinar las cargas de viento en la plataforma autoelevable se consideró que la rapidez de viento a una altura de 10m sobre el nivel medio del mar es de 22 m/s. El perfil de viento que se define con por la expresión 1.8 del API (8). Los coeficientes de forma son los recomendados por el API (8), los cuales se muestran en la tabla 2.1.1-5.

TABLA 2.1.1-5. COEFICIENTES DE FORMA

ELEMENTOS	FACTOR
Vigas	1.5
Paredes de construcciones	1.5
Secciones cilíndricas	0.5

En la figuras 2.1.1-8, 2.1.1-9, 2.1.1-10 y en la tabla 2.1.1-6 se muestra la proyección y los valores de las áreas en las dos direcciones perpendiculares (al eje X y al eje Y respectivamente) de las pantallas expuestas a la acción del viento.

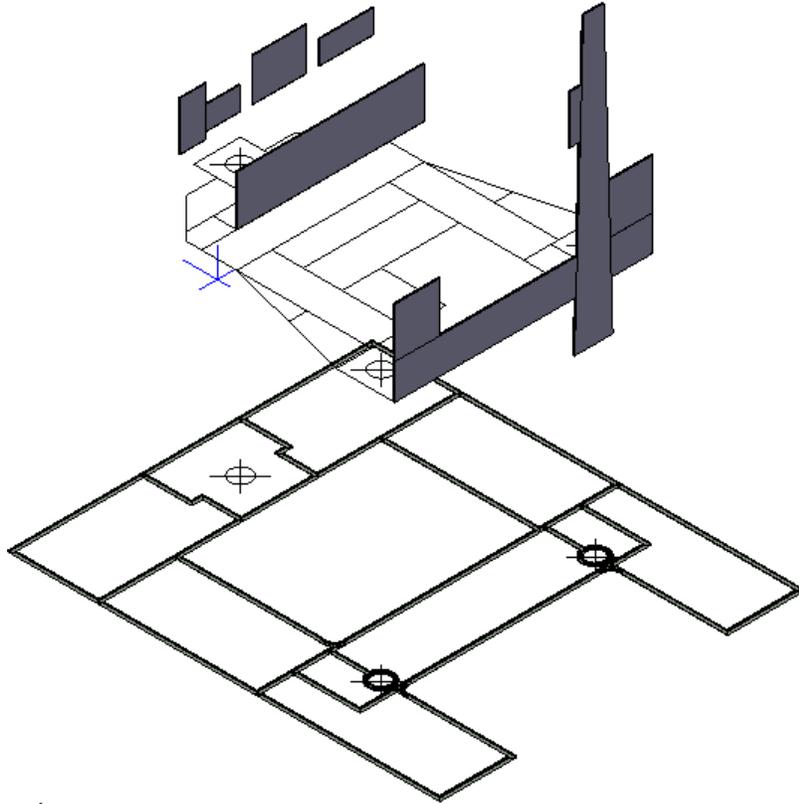


FIGURA 2.1.1-8 PROYECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE GLOBAL "X" DEL MODELO DE PANTALLAS EXPUESTAS A L VIENTO

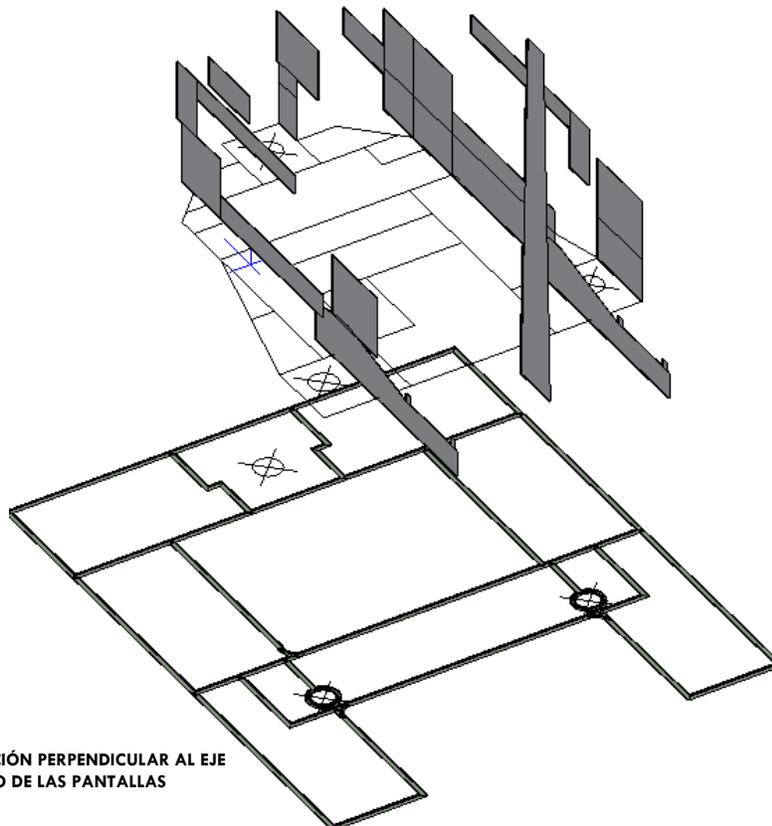


FIGURA 2.1.1-9 PROYECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE GLOBAL "Y" DEL MODELO DE LAS PANTALLAS EXPUESTAS AL VIENTO

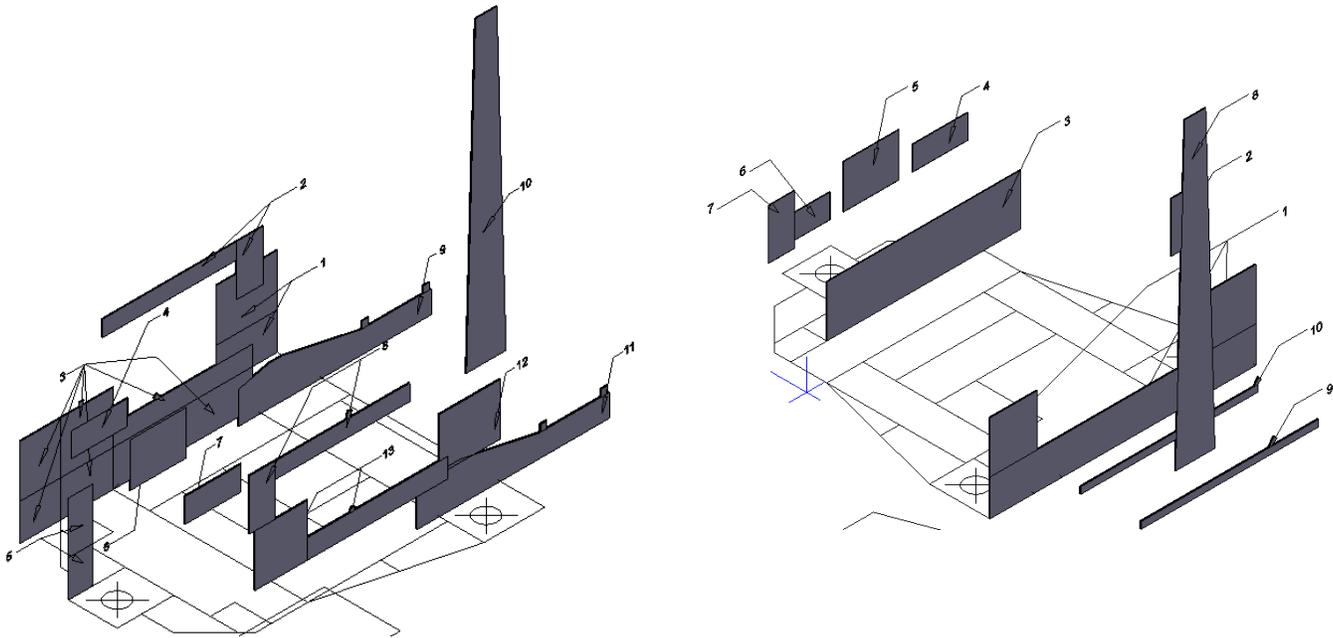


FIGURA 2.1.1-10 NUMERACIÓN DE PANTALLAS

TABLA 2.1.1-6 ÁREAS DE LAS PANTALLAS EXPUESTAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO Y SU LOCALIZACIÓN CON RESPECTO A LOS NUDOS DEL MODELO MATEMÁTICO TRIDIMENSIONAL

Pantalla	Area [m ²]	Centroide [m]			Area [ft ²]	Centroide [ft]			Nodos relacionados				
		x [m]	y [m]	z [m]		x [ft]	y [ft]	z [ft]					
PANTALLAS PERPENDICULARES AL EJE Y													
1	121.043	43.282	20.117	24.019	1302.9	142.0	66.0	78.8	359	35I			
2	78.267	32.915	16.764	36.002	842.5	108.0	55.0	118.1	357	34Y			
3	362.675	19.225	14.630	22.843	3903.8	63.1	48.0	74.9	357	34Y	34R	34K	
4	30.275	9.525	8.534	32.444	325.9	31.3	28.0	106.4	34I				
5	48.417	1.829	3.658	24.019	521.2	6.0	12.0	78.8	349	34B			
6	55.106	9.754		33.925	593.2	32.0		111.3	262	36O			
7	30.275	9.525	-8.534	32.444	325.9	31.3	-28.0	106.4	34J				
8	78.267	18.292	-14.630	36.002	842.5	60.0	-48.0	118.1	34L	34S			
9	127.935	48.286	13.411	19.709	1377.1	158.4	44.0	64.7	355	35E			
10	207.799	58.970		41.128	2236.7	193.5		134.9	35C	35B	35D		
11	127.935	48.286	-13.411	19.709	1377.1	158.4	-44.0	64.7	356	35F			
12	70.876	43.282	-13.411	26.762	762.9	142.0	-44.0	87.8	358	35H			
13	123.116	20.971	-14.630	25.555	1325.2	68.8	-48.0	83.8	34L	34S	34Z	358	
PANTALLAS PERPENDICULARES AL EJE X													
1	330.914	47.854		22.347	3562.0	157.0		73.3	35F	35D	35B	35C	35E
2	29.893	40.386	16.764	34.410	321.8	132.5	55.0	112.9	34P				
3	226.802	17.678		26.762	2441.3	58.0		87.8	34Q	34O	34M	34N	34P
4	30.275	9.754	10.439	32.444	325.9	32.0	34.3	106.4	34I	34K			
5	55.106	9.754		33.925	593.2	32.0		111.3	34H	34F	34G		
6	30.275	9.754	-10.439	32.444	325.9	32.0	-34.3	106.4	34L	34J			
7	29.893	10.820	-14.630	34.410	321.8	35.5	-48.0	112.9	34L				
8	207.799	58.970		41.128	2236.7	193.5		134.9	35C	35B	35D		
9	26.822	64.000		21.253	288.7	210.0		69.7	35F	35D	35B	35C	35E
10	26.822	54.856		21.253	288.7	180.0		69.7	35F	35D	35B	35C	35E

- **Fuerzas inducidas por la corriente:**

Cálculo de las fuerzas inducidas por la corriente

Si la velocidad de corriente se considera estable, la corriente no genera fuerzas de inercia y la fuerza de arrastre por unidad de longitud actuando en un cilindro de diámetro D resulta:

$$F = \frac{C_D}{2} \rho D |u| u$$

- **Factor de bloqueo de corriente.**

En las proximidades de la plataforma la velocidad de la corriente se reduce debido al bloqueo que se genera por los elementos inmersos en el agua que se oponen al flujo medio continuo de la corriente.

Parámetros para el cálculo de las fuerzas de corriente en la plataforma autoelevable

Para determinar las cargas que la corriente induce en la plataforma autoelevable se consideró una velocidad de corriente en la superficie de 1.4 m/s. El perfil de velocidades de corriente se muestra en la tabla 2.1.1-2

El coeficiente de arrastre se muestra en la tabla 2.1.1-4. El factor de bloqueo que recomienda el API RP2A (8) no se usa debido a que las columnas de la plataforma están separadas una distancia considerable (42m).

2.1.1.3 Resumen de cargas ambientales del modelo matemático tridimensional en SACS®.

De acuerdo a los datos, y los valores de los parámetros obtenidos en las secciones anteriores, con el fin de determinar las condiciones ambientales más severas a las que la plataforma se vería expuesta, se realizaron análisis estructurales con diferentes condiciones de carga ambiental. En la figura 2.1.1-11 se muestra esquemáticamente las condiciones ambientales consideradas en el modelo, la corriente está representada por las flechas gruesas a 70° y 85° respecto a la línea del norte en sentido horario, las cargas debidas a oleaje y

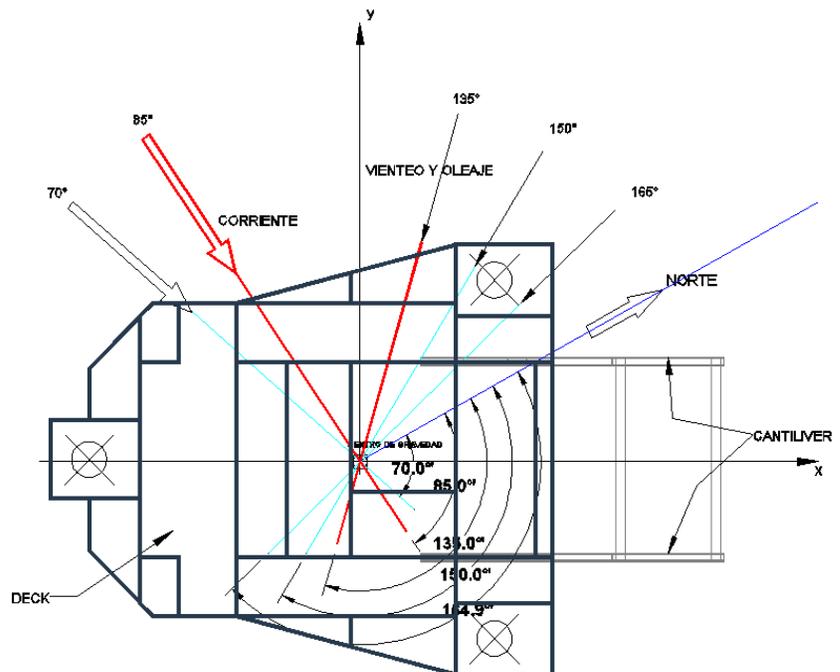


FIGURA 2.1.1-11 VISTA ESQUEMÁTICA DE LAS CONDICIONES DE CARGA ENSAYADAS EN EL MODELO DE SACS®, SE RESALTAN CON LÍNEA MÁS GRUESA LAS CONDICIONES AMBIENTALES MÁS DESFAVORABLES

viento están representadas por la flechas delgadas entre 135° y 165° . La condición de cargas más desfavorable, en cuanto a transmisión de esfuerzos al lecho marino, resultó ser con la corriente a 85° con oleaje y viento a 135° .

Los detalles de las cargas ambientales más desfavorables se resumen en el modelo matemático tridimensional desarrollado en el programa SACS® (Figura 2.1.1-12), las mismas direcciones de las cargas mostradas anteriormente (Figura 2.1.1-11) aparecen ahora con respecto a los ejes globales del modelo.

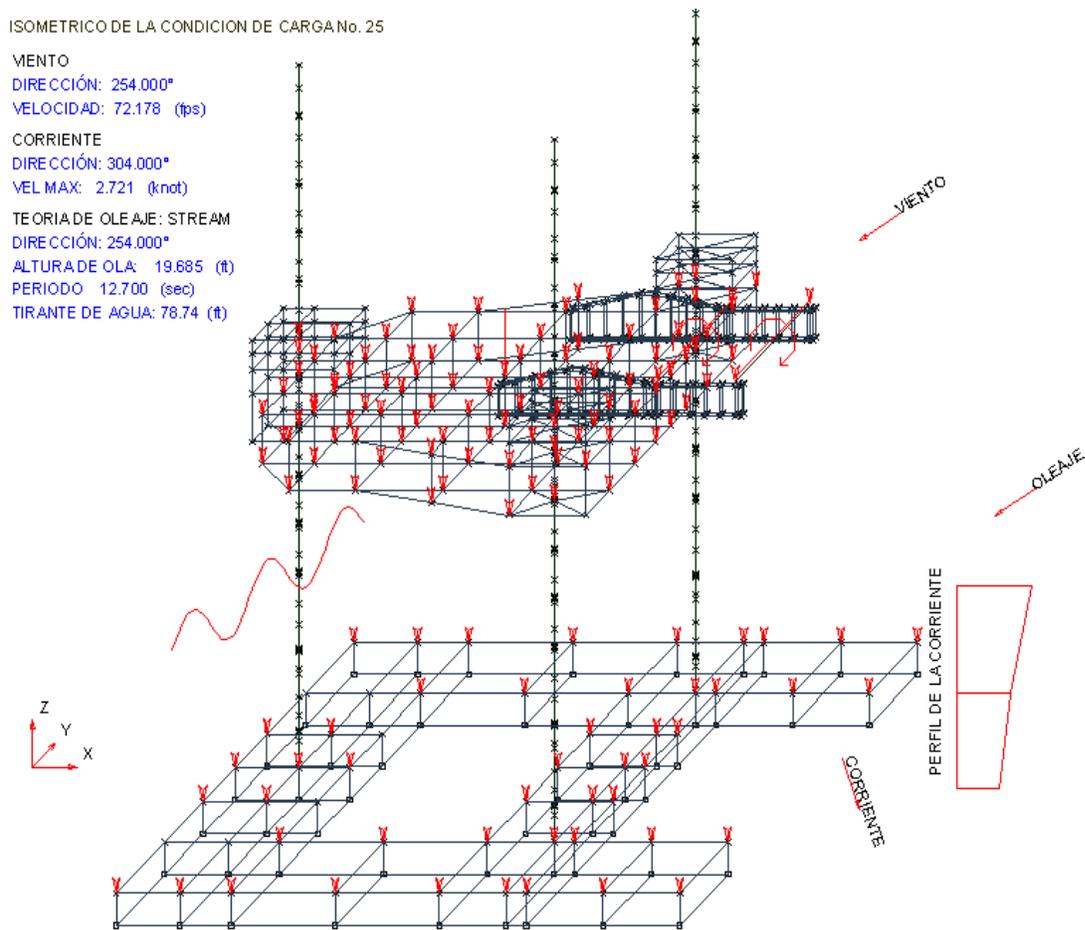


FIGURA 2.1.1-12 VISTA ISOMÉTRICA DEL MODELO MATEMÁTICO TRIDIMENSIONAL DESARROLLADO EN SACS® CON LAS CONDICIONES DE CARGA MÁS DESFAVORABLES

2.1.2 Modelo tridimensional de elementos finitos del suelo marino con el programa PLAXIS®.

Existen métodos empíricos para la determinación de las características de un suelo, desafortunadamente en muchos casos no es posible considerar con precisión las condiciones particulares de estratigrafía, adicionalmente, como es el caso del lecho marino, se debe considerar el tirante de agua. En la literatura (12) se encuentran tablas con valores de parámetros tales como módulo de Poisson, módulos de reacción, módulos de elasticidad, etc., que conjugados hacen posible modelar de forma conservadora el comportamiento del un suelo.

Por otro lado, el método de los elementos finitos es una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio espectro de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van desde el análisis de deformación y esfuerzo de estructuras, elementos estructurales, medios continuos sólidos hasta el análisis de los campos de flujo de calor, de fluidos, magnético, filtración y otros problemas de flujo. Con los avances en la tecnología de cómputo y de los sistemas CAD (Dibujo Asistido por Computadora), pueden modelarse problemas complejos con relativa facilidad. Con este método de análisis, una región compleja, como puede ser una estratigrafía que define un medio continuo, se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. La solución de las ecuaciones resultantes da el comportamiento aproximado del medio continuo.

El modelo matemático tridimensional del suelo marino fue desarrollado aquí con el software PLAXIS 3D FOUNDATION® versión 1.1. Este software permite generar un modelo tridimensional de elemento finito para cimentaciones superficiales, incluyendo cimentaciones en lecho marino. Los datos de la geometría del MAT se insertan con las mismas coordenadas los nudos de apoyo que en el modelo de SACS®. Estos se presentan en la vista en planta del modelo en la figura 2.1.2-1.

Los nudos que conectan las piernas con el MAT están representados por los nudos de carga marcados por círculos. El software PLAXIS® no tiene la posibilidad de considerar momentos en los nudos, por lo tanto aquí se adicionan cuatro nudos para insertar los pares de fuerzas equivalentes sobre cada eje de los momentos

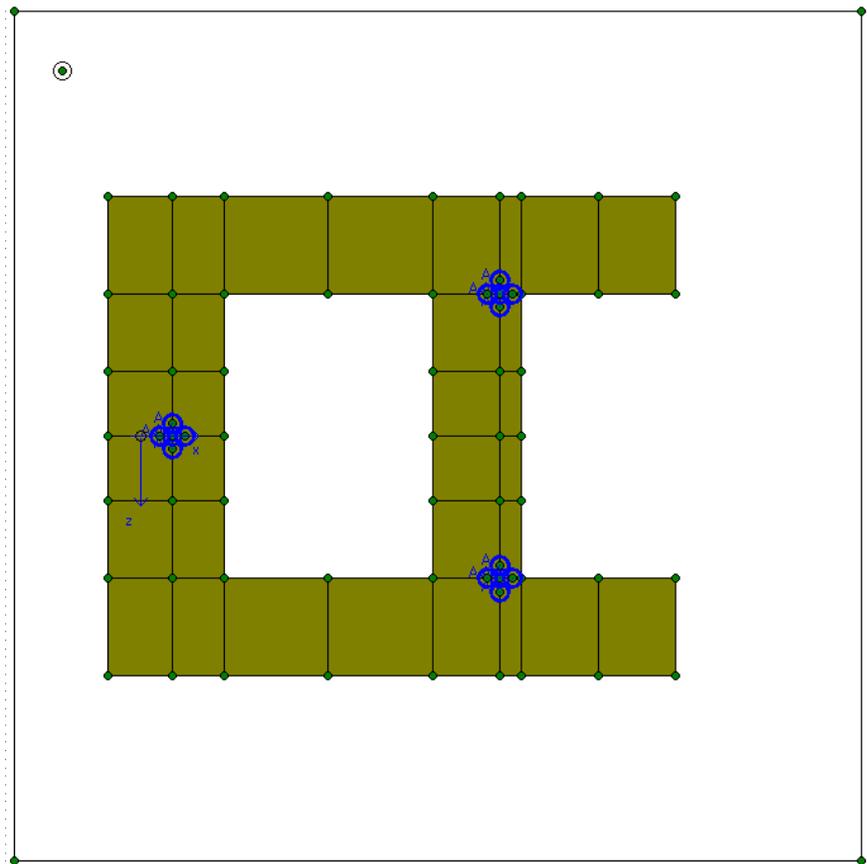
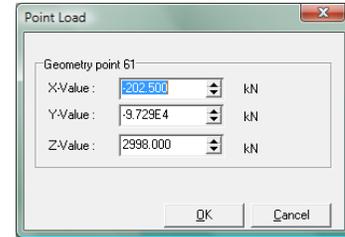


FIGURA 2.1.2-1 VISTA EN PANTA DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO (PLAXIS®)

transmitidos por las piernas.

2.1.2.1 Cargas en el modelo del lecho marino.

Las cargas que se asignan a los nudos del modelo corresponden a la bajada de cargas resultantes de las piernas en el análisis estructural del SACS® (Figura 2.1.2-2). Esto es para estimar los asentamientos y poder calcular de forma iterativa los resortes en los nudos de apoyo del MAT en el modelo de SACS® [Sección 3.1].



2.1.2.2 Estratigrafía

En cuanto a la estratigrafía, de acuerdo a los datos proporcionado por informes típicos de Mecánica de Suelos, el suelo marino se modela con las características mostradas en la tabla 2.1.2-1. Se considera que el criterio de falla es el de Mohr-Coulomb.

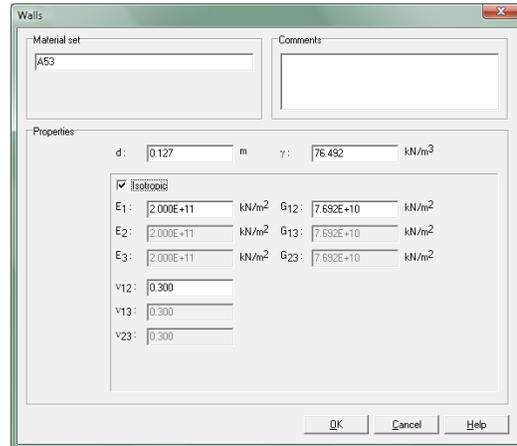


FIGURA 2.1.2-2 CUADROS DE DIALOGO DE ASIGNACIÓN DE CARGAS Y DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES (PLAXIS®)

TABLA 2.1.2-1 ESTRATIGRAFIA DEL SITIO DE TRABAJO DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

Estrato	Prof. [m]	Prof. [ft]	S _u [kN/m ²]	E _s [kN/m ²]	Rel. Vacíos (e)	γ sat [kN/m ³]	Peso sumergido (S's) [kN/m ³]	γ seco [kN/m ³]	Cohesión [kN/m ²]
1 Arcilla arenosa, de mediana y baja plasticidad, de consistencia muy blanda a blanda	4.50	14.76	14.71	5076.07	0.64	14.12	7.06	10.308	8.826
	7.90	25.92	14.71	27996.13	0.58	14.47	7.35	10.879	12.749
	10.20	33.46	16.67	34459.61	0.82	13.46	6.67	9.036	5.691
2 Arcilla de alta plasticidad, de consistencia blanda	14.35	47.08	2157	17492.71	0.96	12.70	5.69	7.890	18.633
	17.30	56.76	2157	16866.27	0.49	14.80	7.45	11.562	18.633
3 Arena limosa, medianamente compactada a muy compactada	23.40	76.77	24.52	38466.58	0.48	15.96	9.12	12.767	18.633
	26.55	87.11	29.42	48807.70	0.68	14.47	7.85	10.482	18.633
	29.60	97.11	63.74	105750.01	0.91	12.84	5.79	8.179	41.188
4 Arcilla de alta plasticidad, de consistencia media a firme	38.45	126.15	34.32	26546.34	0.83	13.14	6.08	8.699	34.323

donde:

S_u = resistencia al cortante de una muestra no drenada (normalmente $S_u = q_u/2$)

q_u = resistencia a la compresión del suelo.

E_s = módulo de elasticidad del suelo.

γ_{sat} = peso volumétrico saturado.

γ_{seco} = peso volumétrico seco.

2.1.2.3 Modelo de elementos finitos

El modelo tridimensional del MAT sobre el lecho marino se genera en el programa PLAXIS®. En las Figuras 2.1.2-3, 2.1.2-4 y 2.1.2-5 se muestra la malla generada con la estratigrafía considerada en los análisis. PLAXIS® genera elementos finitos en 3D prismáticos (Wedge) de hasta 15 nudos a partir de una malla 2D de triángulos de 6 nudos en la dirección horizontal y por elementos cuadrilátero de 8 nudos en la dirección vertical, la precisión de los elementos resultantes es comparable a elementos triangulares de 6 nudos en 2D, esto es porque al considerar elementos de orden superior la demanda de los recursos de cómputo y los tiempos de ejecución serían inaceptables y poco prácticos.

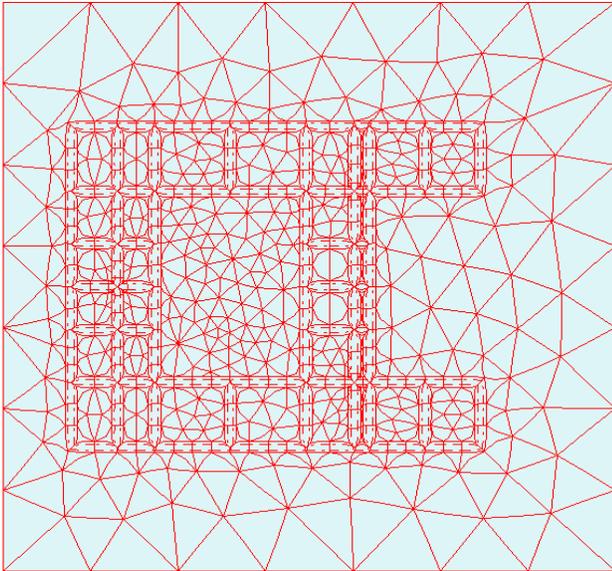


FIGURA 2.1.2-3 PRIMERA ETAPA DE MALLADO (2D) DEL MODELO DEL MAT Y EL LECHO MARINO

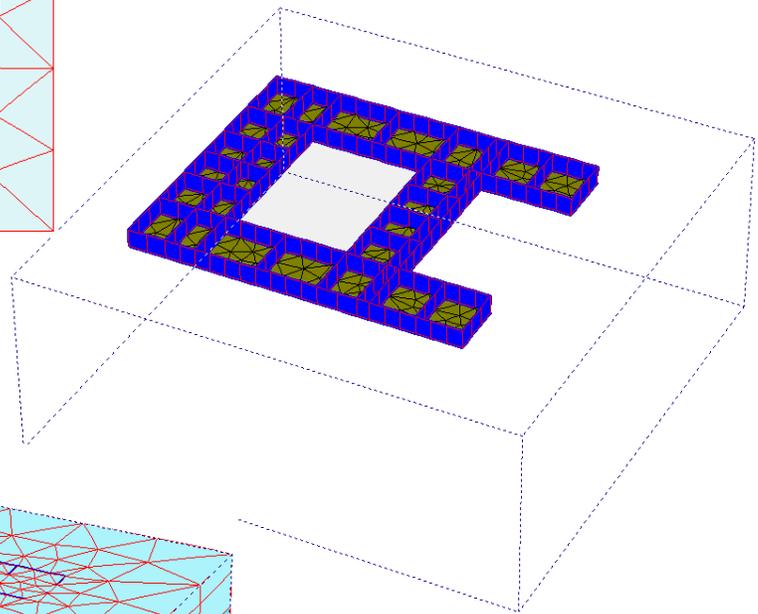


FIGURA 2.1.2-4 ETAPA FINAL DEL MALLADO PARA ELEMENTO FINITO: VISTA 3D DEL MAT

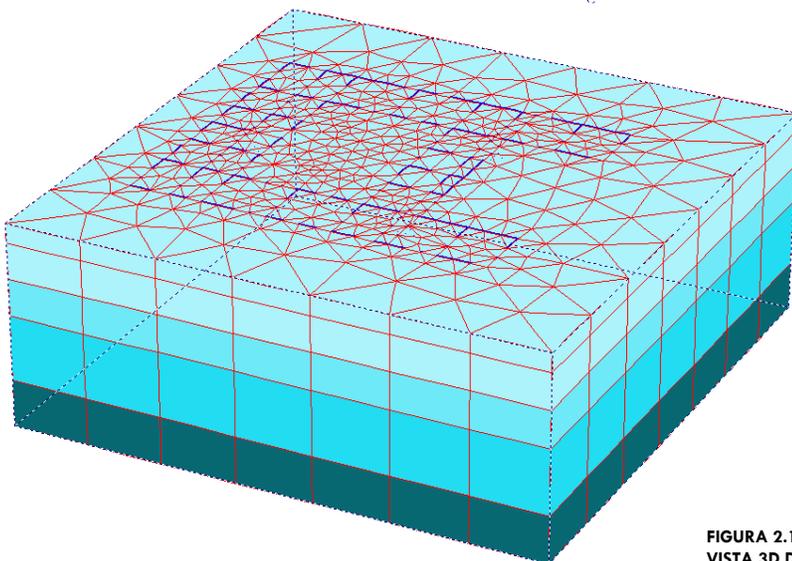


FIGURA 2.1.2-5 ETAPA FINAL DE MALLADO PARA ELEMENTO FINITO: VISTA 3D DE LA ESTRATIGRAFIA Y NUDOS DE CONTACTO CON EL MAT

Para iniciar el análisis de la respuesta del sistema suelo-MAT ante las cargas ambientales severas, se deben definir las siguientes fases en el modelo (Figura 2.2-6):

- **Fase inicial:** en esta fase se considera el modelo del suelo sin el MAT.
- **Posicionamiento:** donde el MAT es asentado en el lecho marino sin precarga.
- **Precarga:** donde se aplica del 40% al 60% de la carga de operación de la plataforma autoelevable (Figura 2.2-7).
- **Carga de operación y de tormenta:** en esta fase se

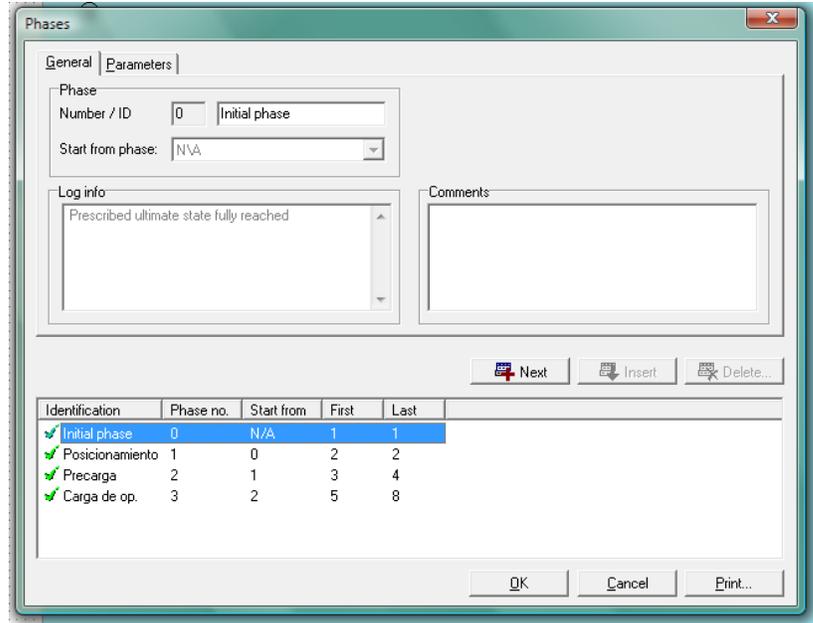


FIGURA 2.1.2-6 CUADRO DE DIALOGO CON LAS FASES DE CALCULO DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO DEL MAT Y EL LECHO MARINO

consideran las cargas ambientales de tormenta. En esta última fase se insertan las cargas que bajan a través de las piernas sobre los nudos que conectan con el MAT. Si se tienen cambios en las cargas, deben capturarse los datos es en esta fase en los nudos correspondientes. En consecuencia, esta fase es la que se recalcula una y otra vez bajo las diferentes condiciones de carga en el sistema de apoyo de la plataforma autoelevable.

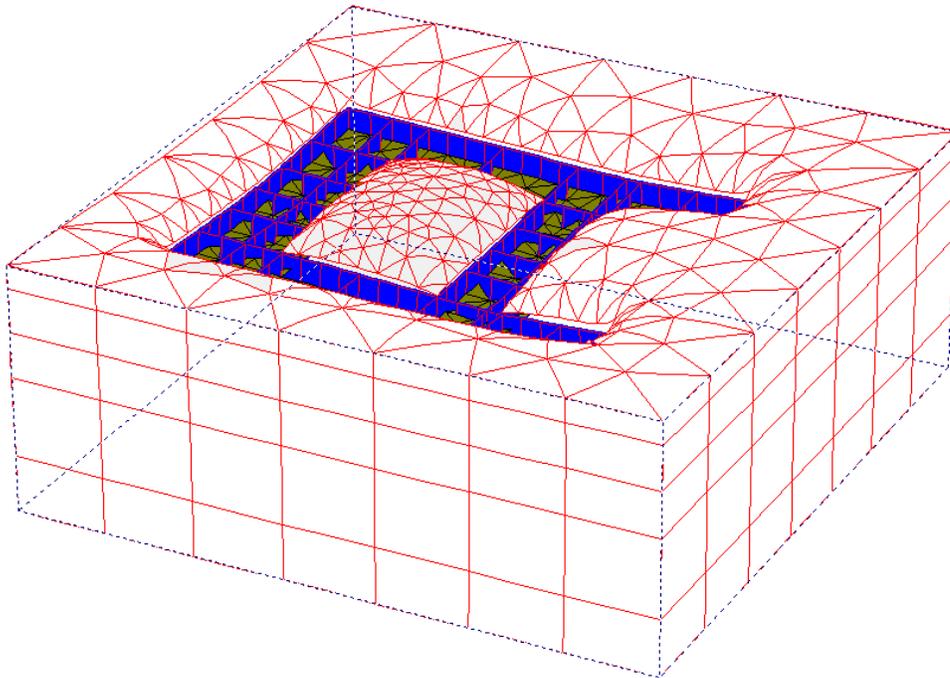


FIGURA 2.1.2-7 REPRESENTACIÓN DEFORMADA A ESCALA AMPLIADA DE CONFIGURACIÓN DESPLAZADA DEL MAT INDUCIDAS POR LAS CARGAS TRANSMITIDAS POR LAS PIERNAS DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

2.2 ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE REACCIÓN DEL SUELO

En la sección 3.1 que existen otras formas de analizar la respuesta de una cimentación, la más común es calculando resortes individuales (método de las áreas tributarias) y la otra por elementos finitos con el programa SAFE®. La característica común en ambos métodos es que las propiedades del suelo quedan resumidas por un solo factor llamado módulo de reacción.

El módulo de reacción (12) es un coeficiente que relaciona en forma conceptual la presión en el suelo (q) y su deformación (δ). Esta propiedad se usa ampliamente en el análisis y diseño de cimentaciones, tales como zapata corridas, MATs, y varios tipos de cimentaciones profundas. Dicha relación está definida como:

$$k_s = q/\delta$$

Los términos de la ecuación anterior se identifican en la figura 2.2-1, donde se grafican q contra δ ; si estas gráficas se usan para determinar k_s de la ecuación anterior, es evidente que dicho valor depende de la pendiente de la tangente o secante y la localización de las coordenadas de q y δ (12).

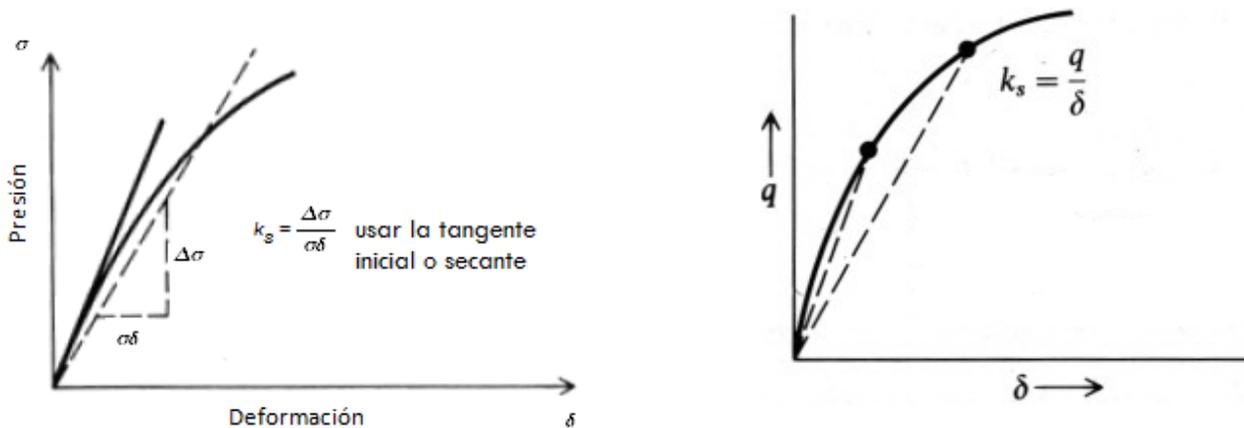


FIGURA 2.2-1 CURVAS DE DEFINICIÓN BÁSICA DEL MÓDULO DE REACCIÓN

El problema principal es estimar el valor de k_s (12). Para ello existen expresiones propuestas por varios autores, una de las primeras contribuciones fue por parte de Terzaghi (1955), quien propuso que k_s , para cimentaciones tomadas en una sola pieza, podría ser obtenida a partir de pruebas con platos cargados usando las siguientes expresiones:

Para cimentaciones en arcilla (12): $k_s = k_1 \cdot B$

Para cimentaciones en arena (12): $k_s = k_1 \cdot \left(\frac{B+1}{2 \cdot B}\right)^2$

En cimentaciones rectangulares en arena de dimensiones $B \times m \cdot B$ (12): $k_s = k_1 \cdot \frac{m+0.5}{1.5 \cdot m}$

donde k_s es el valor buscado y k_1 es el módulo de reacción en una placa de de 1 ft x 1 ft.

Vésic (1961) propuso que el módulo de reacción se calcule usando el módulo de elasticidad E_s como (12):

$$k'_s = 0.65 \cdot \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_f I_f}} \cdot \frac{E_s}{1-\mu^2}$$

donde: E_s y E_f = módulo de elasticidad del suelo y de la cimentación, respectivamente, en unidades consistentes.

B , I_f = ancho de la cimentación y momento de inercia de la sección transversal (no en planta) en unidades consistentes.

J.E. Bowles (12) propone una expresión para evaluar módulo de reacción en base a los factores de influencia para calcular asentamientos inmediatos. La cimentación es de forma rectangular y los factores de influencia se consideran sobre la esquina de la cimentación.

$$k_s = \frac{\Delta q}{\Delta H} = \frac{1}{BE'_s I_s I_F}$$

donde:

$$E'_s = \frac{(1-\mu^2)}{E_s}$$

I_F = Factor de influencia (ecuaciones de Fox (1948)) (12), que depende del módulo de Poisson y de las dimensiones de la cimentación (L/B). La figura 2.2-2 puede ser usada para obtener el valor aproximado.

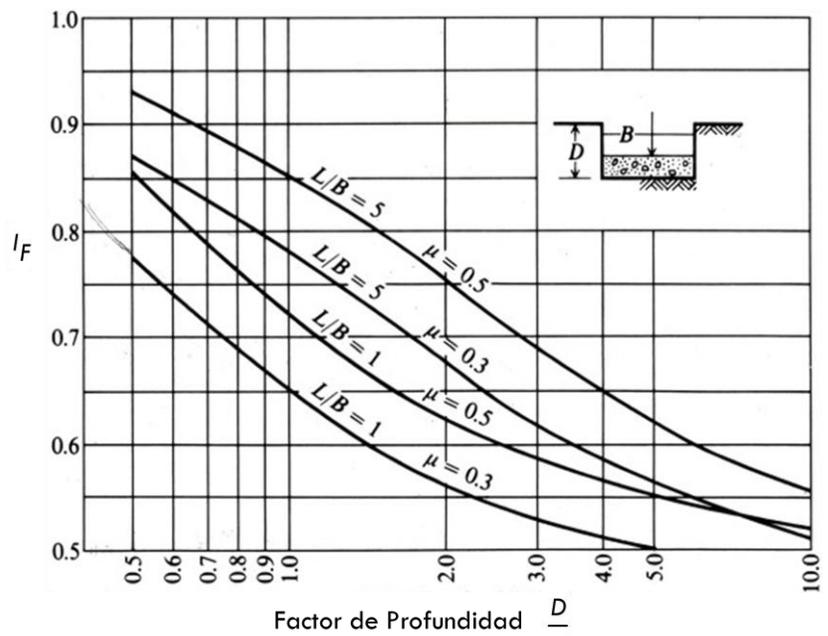


FIGURA 2.2-2 FACTOR DE INFLUENCIA I_F PARA CIMENTACIONES CON PROFUNDIDAD D .

I_s = Factor de influencia que se calcula con las tablas 2.2-2 de Steinbrenner (APÉNDICE III).

Los valores de los parámetros E_s y μ se muestran en las tablas 2.2-1 en función de la profundidad H del estrato resistente y el ancho (dimensión menor) B de la cimentación (12):

TABLAS 2.2-1

Valores e intervalos de valores del módulo de Piosson

Tipo de suelo	μ_{min}	μ_{max}
Arcilla saturada	0.4	0.5
Arcilla no saturada	0.1	0.3
Arcilla arenosa	0.2	0.3
Limo	0.3	0.35
Loess	0.1	0.3
Hielo	0.36	
Concreto	0.15	

Valores típico para módulo de elasticidad

Tipo de suelo	E_s [Mpa]
Arcilloso	
Muy blando	2 - 15
Blando	5 - 25
Medio	15 - 50
Duro	50 - 100
Arenoso	25 - 250

De acuerdo a la tabla 2.2-1, las características del suelo marino corresponden a un suelo arcilloso saturado muy blando, los valores seleccionados del módulo de Poisson μ y de elasticidad E_s son:

Propiedades del lecho marino: $\mu := 0.5$ $E_s := 20000 \text{ kPa}$

Por otro lado se tiene:

Dimensiones generales del MAT: $L := 66.885 \text{ m}$ $B := 56.384 \text{ m}$ del gráfico 2.2-2 (1) se tiene:

Nivel de desplante: $D := 3.58 \text{ m}$

Profundidad del estrato resistente: $H := 0.682B = 38.454 \text{ m}$ $\frac{D}{B} = 0.063$ por lo que $I_F := 0.92$

H/B'	L/B									
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
0.2	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007
0.4	0.033	0.032	0.031	0.030	0.029	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027
0.6	0.066	0.064	0.063	0.061	0.060	0.059	0.058	0.057	0.056	0.056
0.8	0.104	0.102	0.100	0.098	0.096	0.095	0.093	0.092	0.091	0.090
1.0	0.142	0.140	0.138	0.136	0.134	0.132	0.130	0.129	0.127	0.126
1.5	0.224	0.224	0.224	0.223	0.222	0.220	0.219	0.217	0.216	0.214
2.0	0.285	0.288	0.290	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.291	0.290
3.0	0.363	0.372	0.379	0.384	0.389	0.393	0.396	0.398	0.400	0.401
4.0	0.408	0.421	0.431	0.440	0.448	0.455	0.460	0.465	0.469	0.473
5.0	0.437	0.452	0.465	0.477	0.487	0.496	0.503	0.510	0.516	0.522
6.0	0.457	0.474	0.489	0.502	0.514	0.524	0.534	0.542	0.550	0.557
7.0	0.471	0.490	0.506	0.520	0.533	0.545	0.556	0.566	0.575	0.583
8.0	0.482	0.502	0.519	0.534	0.549	0.561	0.573	0.584	0.594	0.602
9.0	0.491	0.511	0.529	0.545	0.560	0.574	0.587	0.598	0.609	0.618
10.0	0.498	0.519	0.537	0.554	0.570	0.584	0.597	0.610	0.621	0.631
20.0	0.529	0.553	0.575	0.595	0.614	0.631	0.647	0.662	0.677	0.690
500.0	0.560	0.587	0.612	0.635	0.656	0.677	0.696	0.714	0.731	0.748

$$I''_1(H/B', L/B) := \begin{cases} i \leftarrow 1 & \text{if } L/B \leq 8.0 \\ i \leftarrow 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{xy} \leftarrow \text{augment} \left((H/B'), (L/B)_i^T \right)$$

$$\xi \leftarrow \text{cspline} \left(M_{xy}, I''_1 \right)$$

$$\text{interp} \left[\xi, M_{xy}, I''_1, \left(\frac{H/B'}{L/B} \right) \right]$$

H/B'	L/B									
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
0.2	0.041	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.043	0.043	0.043	0.043
0.4	0.066	0.068	0.069	0.070	0.070	0.071	0.071	0.072	0.072	0.073
0.6	0.079	0.081	0.083	0.085	0.087	0.088	0.089	0.090	0.091	0.091
0.8	0.083	0.087	0.090	0.093	0.095	0.097	0.098	0.100	0.101	0.102
1.0	0.083	0.088	0.091	0.095	0.095	0.100	0.102	0.104	0.106	0.108
1.5	0.075	0.080	0.084	0.089	0.093	0.096	0.099	0.102	0.105	0.108
2.0	0.064	0.069	0.074	0.078	0.083	0.086	0.090	0.094	0.097	0.100
3.0	0.048	0.052	0.056	0.060	0.064	0.068	0.071	0.075	0.078	0.081
4.0	0.037	0.041	0.044	0.048	0.051	0.054	0.057	0.060	0.063	0.066
5.0	0.031	0.034	0.036	0.039	0.042	0.045	0.048	0.050	0.053	0.055
6.0	0.026	0.028	0.031	0.033	0.036	0.038	0.040	0.043	0.045	0.047
7.0	0.022	0.024	0.027	0.029	0.031	0.033	0.035	0.037	0.039	0.041
8.0	0.020	0.022	0.023	0.025	0.027	0.029	0.031	0.033	0.035	0.036
9.0	0.017	0.019	0.021	0.023	0.024	0.026	0.028	0.029	0.031	0.033
10.0	0.016	0.017	0.019	0.020	0.022	0.023	0.025	0.027	0.028	0.030
20.0	0.008	0.009	0.010	0.010	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015
500.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001

$$I''_2(H/B', L/B) := \begin{cases} i \leftarrow 1 & \text{if } L/B \leq 8.0 \\ i \leftarrow 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{xy} \leftarrow \text{augment} \left((H/B'), (L/B)_i^T \right)$$

$$\xi \leftarrow \text{cspline} \left(M_{xy}, I''_2 \right)$$

$$\text{interp} \left[\xi, M_{xy}, I''_2, \left(\frac{H/B'}{L/B} \right) \right]$$

TABLAS 2.2-2 VALORES DE LOS FACTORES DE INFLUENCIA DE STEINBRENNER I_1 E I_2 Y FUNCIONES DE LOS ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN PARA ESTIMAR LOS VALORES DE I_1 E I_2 (VER APENDICE III)

Según la secuela del cálculo que sugiere Bowles (12), una vez calculados los módulos de reacción en la parte central de la cimentación (en este caso el MAT) y en la esquina, el módulo de reacción promedio se obtiene con:

$$k_s \text{ prom} = \frac{4k_s \text{ cent} + k_s \text{ esq}}{5}$$

Cálculo de módulo de reacción para el centro de la cimentación

$$B' := \frac{B}{2} = 28.192 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \frac{H}{B'} = 1.364 \quad \frac{L}{B} = 1.186$$

y de la tabla 2.2-2 (12) y las funciones de interpolación:

$$I_1 := I''_1 \left(\frac{H}{B'}, \frac{L}{B} \right) = 0.203 \quad I_2 := I''_2 \left(\frac{H}{B'}, \frac{L}{B} \right) = 0.086$$

Con las tablas de Steinbrenner, se obtiene un factor de influencia para el centro de la cimentación igual a:

$$I_s := I_1 + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot I_2 = 0.203 \quad \Rightarrow \quad E'_s := \frac{(1-\mu^2)}{E_s} = 0.00179551 \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{kip}}$$

Por lo tanto el módulo de reacción para el centro de la cimentación resulta:

$$k_{s \text{ cent}} := \frac{1}{B' \cdot E'_s \cdot 4I_s \cdot I_F} = 8.077 \cdot \frac{\text{kip}}{\text{ft}^3}$$

Cálculo de módulo de reacción para la esquina de la cimentación completa:

$$B' := B = 56.384 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \frac{H}{B'} = 0.682 \quad \frac{L}{B} = 1.186$$

De la tabla 2.2-2 del Bowles (12) y las funciones de interpolación:

$$I_1 := I''_1 \left(\frac{H}{B'}, \frac{L}{B} \right) = 0.078 \quad I_2 := I''_2 \left(\frac{H}{B'}, \frac{L}{B} \right) = 0.086$$

$$I_s := I_1 + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot I_2 = 0.078$$

$$E'_s := \frac{(1-\mu^2)}{E_s} = 0.00179551 \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{kip}}$$

$$k_{s \text{ esq}} := \frac{1}{B' \cdot E'_s \cdot I_s \cdot I_F} = 41.936 \cdot \frac{\text{kip}}{\text{ft}^3}$$

Finalmente se calcula el promedio del módulo de reacción:

$$k_{s \text{ prom}} := \frac{4k_{s \text{ cent}} + k_{s \text{ esq}}}{5} = 14.849 \cdot \frac{\text{kip}}{\text{ft}^3} \quad k_{s \text{ prom}} = 2332.604 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

2.3 MODELO MATEMÁTICO TRIDIMENSIONAL DEL MAT CON EL PROGRAMA SAFE® 8.1

J.E. Bowles (12) indica que el método de áreas tributarias tiene ciertas limitaciones en la aproximación en el análisis de la repuesta de una cimentación, esto es porque los resortes resultantes son independientes, lo que deriva en un sistema desacoplado. Para obtener una mejor aproximación, Bowles recomienda que debe desarrollarse un análisis de elementos finitos donde las propiedades del medio continuo estarán definidas por el módulo de reacción.

SAFE® (15) es un programa de ayuda de análisis de la respuesta de cimentaciones superficiales bajo diferentes condiciones y combinaciones de carga, la respuesta de este modelo matemático tridimensional está definida como elementos mecánicos en la estructura de la cimentación, asentamientos verticales y presiones de contacto en el suelo.

El programa, dadas las características geométricas de la cimentación, realiza en forma automática la discretización en elementos finitos (mallado), tanto de la estructura como del medio continuo que representa su soporte (suelo) (Figuras 2.3-1 y 2.3-2). La documentación del programa no proporciona detalles acerca de la formulación de los elementos que utiliza.

La modelación es relativamente sencilla, ya que solo hay que ingresar los mismos datos de la geometría, propiedades y cargas del MAT especificadas en el modelo de PLAXIS® [Sección 2.1.2]; luego para el suelo se especifica el valor del módulo de reacción $k_{s\text{ prom}}$ [Sección 2.2].

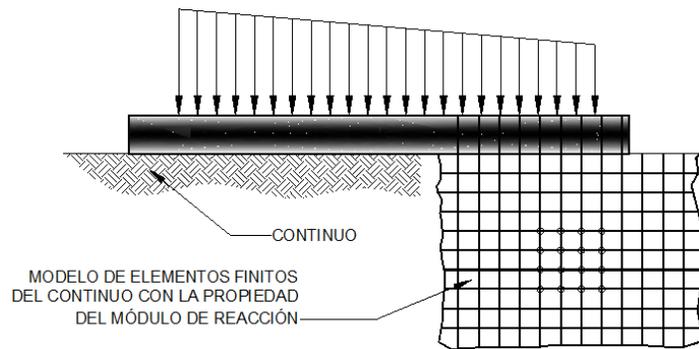


FIGURA 2.3-1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL SUELO QUE IMPLEMENTA EL PROGRAMA SAFE® 8.1

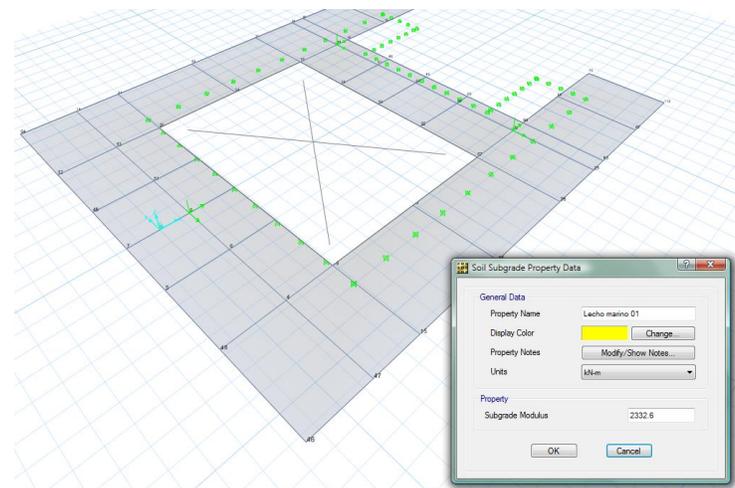


FIGURA 2.3-2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DESARROLLADO CON EL PROGRAMA SAFE® 8.1,

3 APLICACIÓN DE TRES MÉTODOS DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan tres métodos para la determinación de las rigideces de los resortes que modelan el suelo marino sobre el que se apoya el MAT:

1. **Método iterativo:** se utilizan los resultados de los análisis realizados con los modelos desarrollados con los programas SACS® y PLAXIS® [Sección 2.1]. El primer modelo es el de la superestructura y MAT y el segundo es el modelo de elementos finitos del sistema suelo-MAT con la estratigrafía del suelo marino [Sección 3.1]. El modelo del SACS® proporciona las fuerzas en los nudos de contacto con el MAT y las reacciones en los apoyos. Estas fuerzas que transmiten las piernas al MAT se aplican al modelo de PLAXIS® para determinar las deformaciones del suelo y con ello iniciar el proceso iterativo que se muestra esquemáticamente en la figura 3-1.

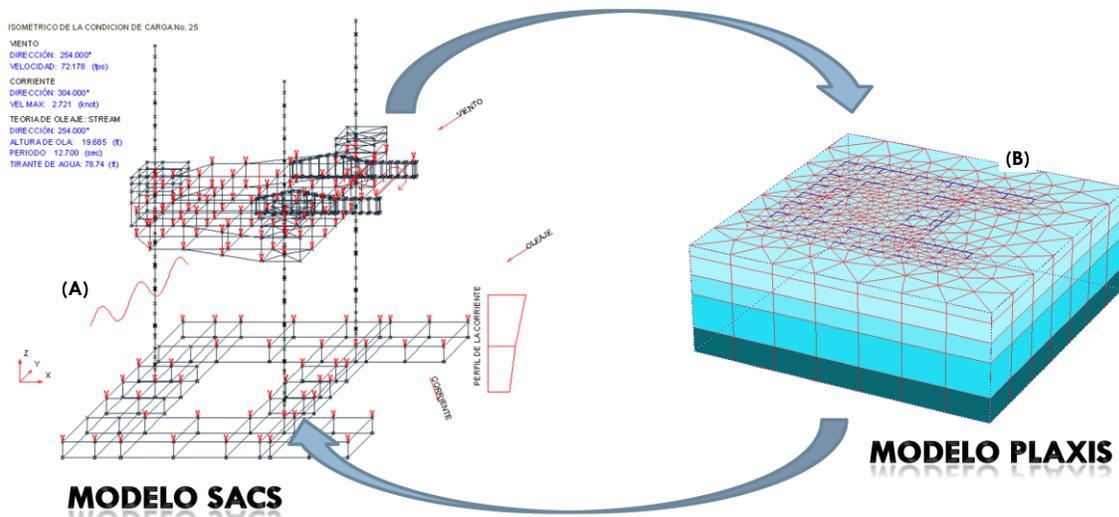


FIGURA 3-1 DIAGRAMA DE INTERACCIÓN DE DATOS ENTRE LOS DOS MODELOS. (A) MODELO DE SUPERESTRUCTURA CON EL MAT, (B) MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL MAT CON LA ESTRATIGRAFÍA DEL SUELO MARINO

2. **Método empírico:** determina directamente las propiedades del suelo marino por medio del módulo de reacción k_s . Este dato se obtiene mediante parámetros y fórmulas de la literatura, y no considera las condiciones de la estratigrafía. Una vez determinado el módulo de reacción, la rigidez de los resortes se calcula en forma directa con el módulo de reacción y las áreas tributarias de los nudos de apoyo del MAT (figura 3-2) con lo que resulta un sistema desacoplado de resortes (12) (16) [Sección 3.2], ya que las características de los resortes son independientes entre sí.

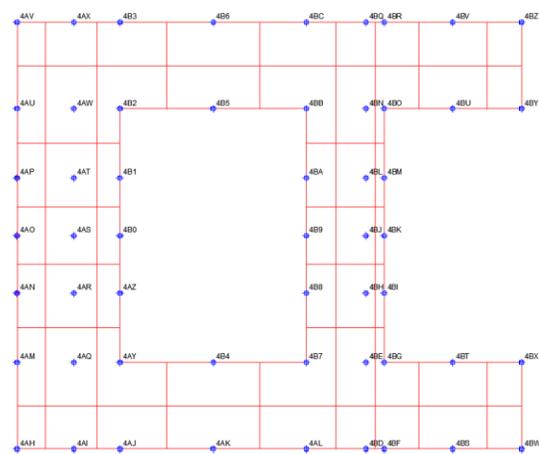


FIGURA 3-2 MAT CON NUDOS Y ÁREAS TRIBUTARIAS

3. **Método semi-empírico:** utiliza un modelo de elementos finitos con las propiedades del suelo marino representadas por el módulo de reacción K_s (12) (16) [Sección 2.2]. Este método permite obtener un sistema acoplado del medio continuo y el MAT [Sección 3.3] (Figura 3-3).

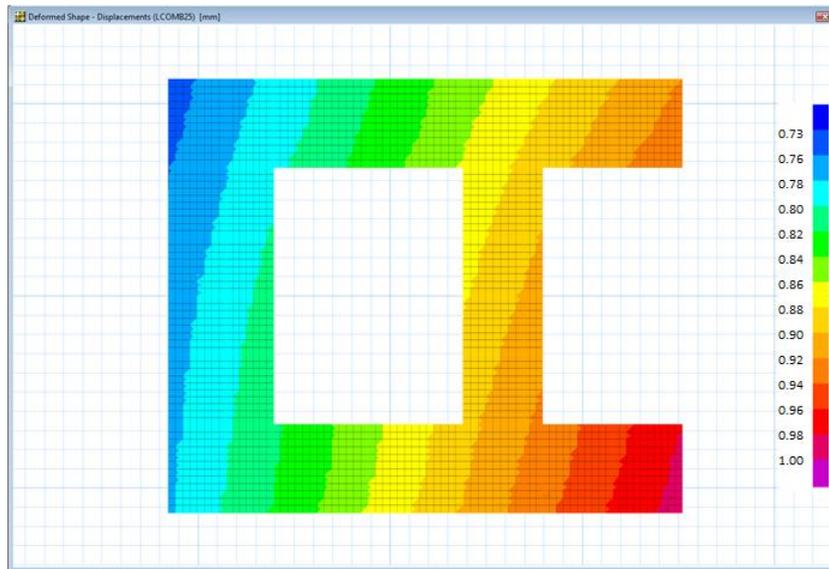


FIGURA 3-3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS CON FORMA DESPLAZADA DEL MAT UTILIZANDO MÓDULO DE REACCIÓN

Enseguida se trata con más detalle cada uno de estos métodos (iterativo, empírico y semi-empírico).

3.1 MÉTODO ITERATIVO: ITERACIÓN CON EL MODELO DE SACS® Y MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (CON PLAXIS®)

En el análisis y diseño de cimentaciones se sabe que las características de la estructura modifican las deformaciones del suelo y que estas, a su vez, tienen un efecto sobre el comportamiento de la estructura, a veces en detrimento, a veces benéfico. Los procedimientos establecidos en el pasado para analizar la deformación del suelo libre de la presencia de cualquier estructura, que se denomina como movimiento de campo libre (17), no son suficientes ya que en un proyecto estructural frente a acciones cíclicas tales como sismo, viento u oleaje es necesario conocer de manera más precisa cuál es el efecto en los desplazamientos de la estructura y las deformaciones del suelo. Dicho comportamiento evidentemente será distinto del movimiento de campo libre correspondiente.

El mecanismo por el cual la presencia de la estructura influye en las deformaciones del suelo y éstas sobre la estructura, es conocido bajo el nombre de interacción suelo-estructura. El aumento de los desplazamientos laterales de la estructura, periodos, así como la modificación de las cargas que bajan a la cimentación son algunos de los efectos de interacción más notables. Las investigaciones realizadas en los últimos años han confirmado la necesidad y la conveniencia de tomar en cuenta esta condición en los diseños. En el caso de análisis de esta tesis por ejemplo, se tiene que la separación mínima que deben guardar los puntos críticos entre una plataforma autoelevable en su configuración elevada, y la estructura adyacente (plataforma fija) deben mantenerse con cierta holgura para evitar colisión cuando

las condiciones ambientales sean severas tal como es el caso de tormenta. De un mejor entendimiento de los efectos de interacción suelo-estructura deben derivar métodos más confiables de diseño y análisis estructural. En el APÉNDICE I se describen en forma breve algunas teorías relativas a interacción suelo-estructura.

Además de conocer las propiedades del suelo, es necesario conocer también la estratigrafía y sus condiciones hidráulicas. Una buena solución de la interacción entre la estructura y el suelo podrá obtenerse solamente si se conocen las propiedades reales de esfuerzo-deformación-tiempo de los materiales y si se establece la compatibilidad de deformación entre la estructura y el suelo.

Las dificultades para obtener mejores soluciones en la interacción suelo-estructura son, entre otras, las siguientes (18):

- Métodos de cálculo.
- El conocimiento de los parámetros adecuados.

Para predecir en la forma más aproximada el comportamiento de una plataforma autoelevable en el modo elevado de operación bajo condiciones de tormenta es necesario modelar la interacción con el suelo marino bajo la condición ambiental más severa. Esto se logra con la obtención de un sistema de resortes cuyas rigideces se calibran mediante un proceso iterativo, el diagrama de flujo de dicho proceso se muestra en la figura 3.1-1.

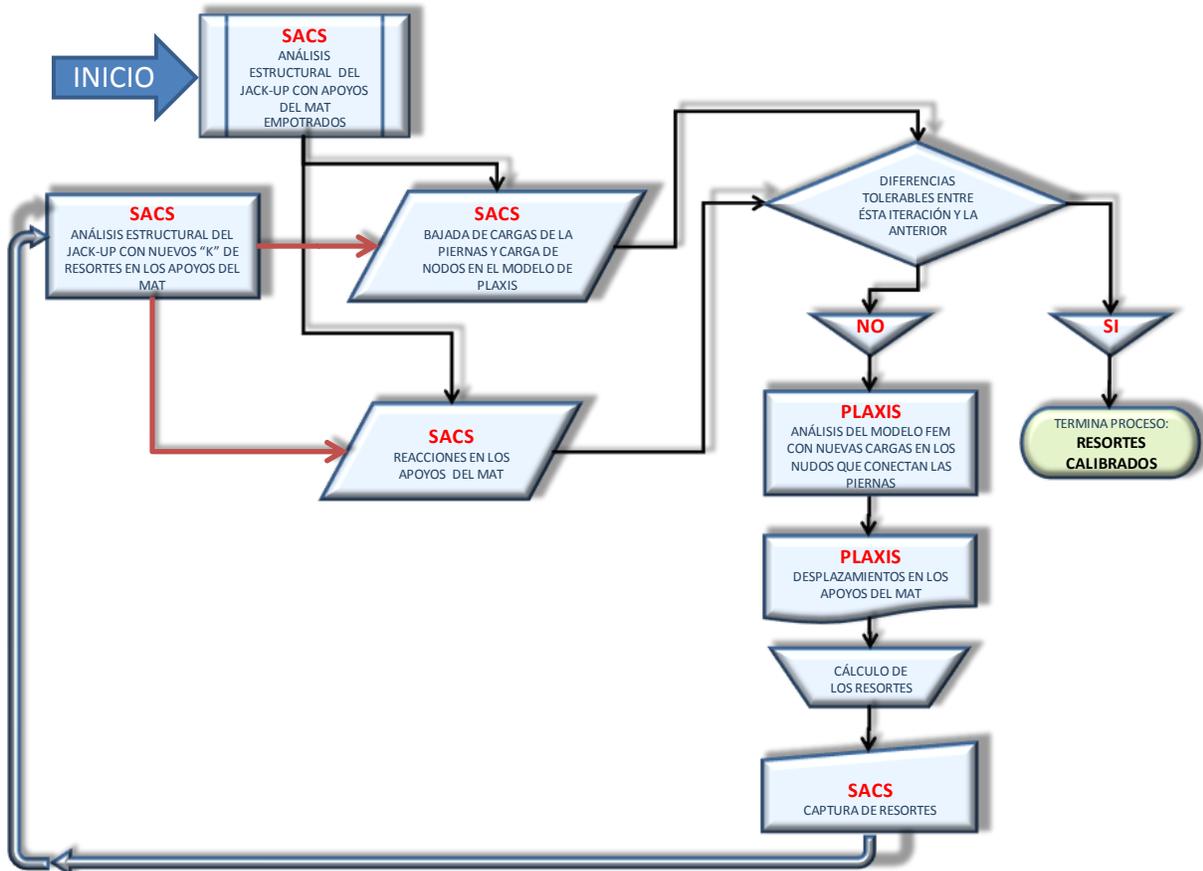


FIGURA 3.1-1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE RESORTES

El método de cálculo por elementos finitos del medio continuo y los parámetros que definen las propiedades de la estratigrafía se utilizan para obtener los asentamientos del MAT. El modelo de SACS® proporciona las cargas transmitidas por las piernas sobre el MAT [Sección 2.1.1]. Dichas cargas son inducidas a su vez por las condiciones ambientales a las que está sometida la superestructura en el sitio de obra [Secciones 2.1.1.2 y 2.1.1.3].

El proceso de iteraciones finaliza cuando los parámetros de comparación muestran poca variación entre las iteraciones. La comparación se realizó aquí dividiendo los valores obtenidos de la última iteración con respecto a los valores de la iteración inmediata anterior, a esta razón se le denomina aquí "factor de variación".

$$\text{Factor de variación} = \frac{\text{Valor iteración actual}}{\text{Valor iteración anterior}}$$

A continuación se enumeran los parámetros utilizados en el análisis de variación:

1. **Desplazamientos verticales (asentamientos):** como se aprecia en la figura 3.1-2, la diferencia de los desplazamientos entre la dos últimas iteraciones resulta ser muy pequeña, por lo tanto se determinó que la iteración No. 5 proporciona con aproximación suficiente los valores de las rigideces de los resortes en los apoyos del MAT. La figura 3.1-2 muestra las variaciones en todos los nudos de apoyo en el modelo de SACS® (Figura 3.1-3).

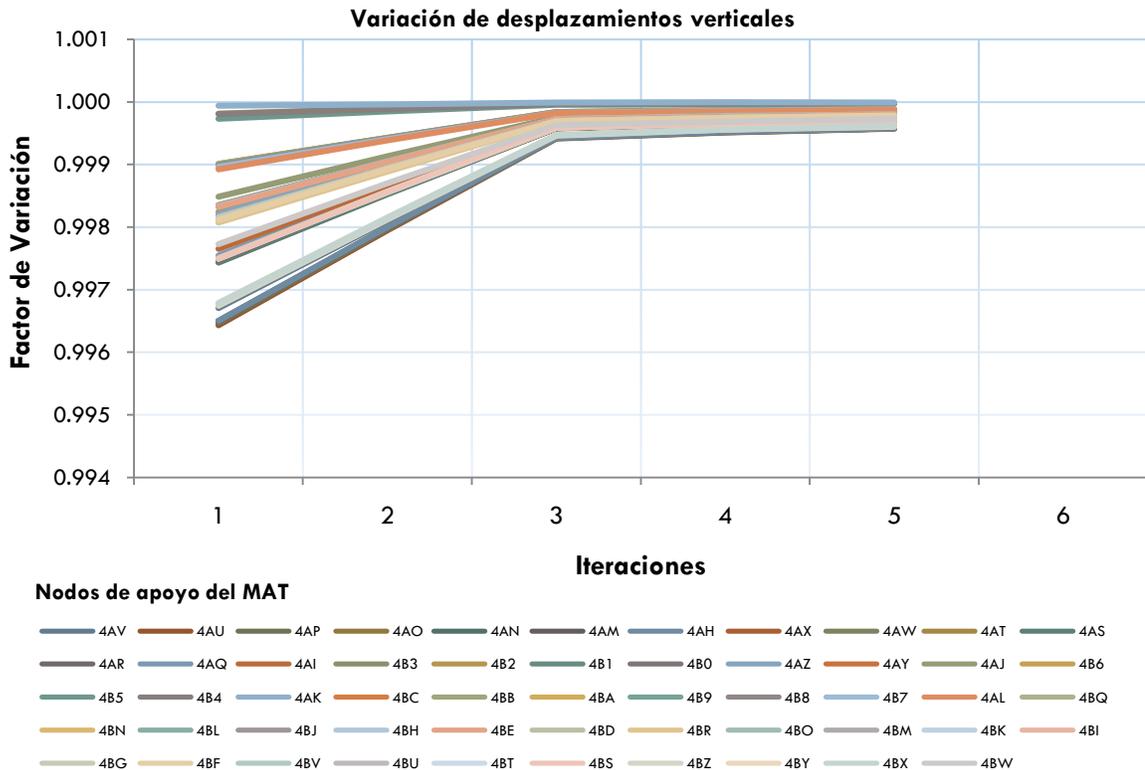


FIGURA 3.1-2 GRÁFICO DE VARIACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LOS NUDOS DE APOYO DEL MAT.

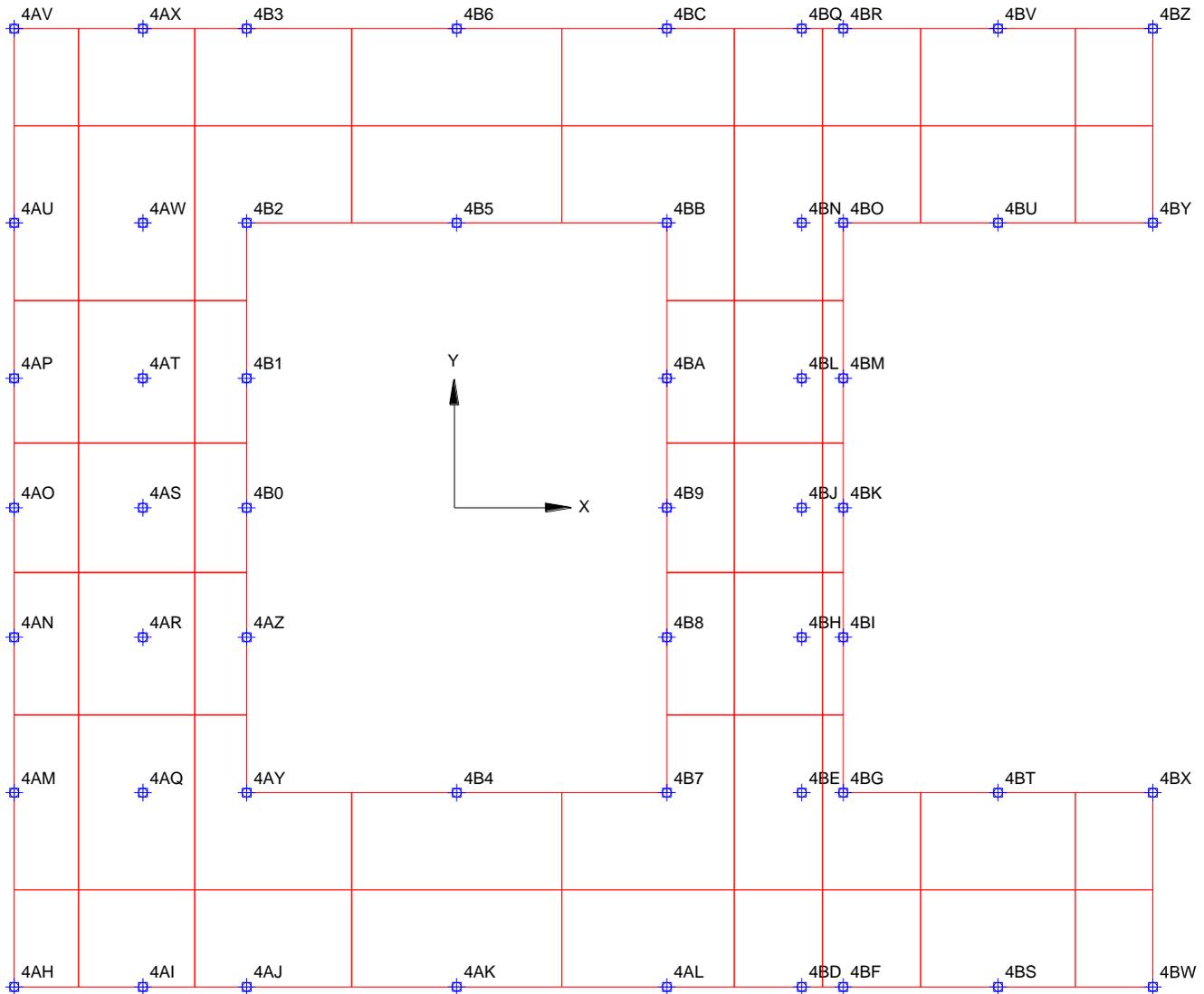


FIGURA 3.1-3 MODELO DEL MAT CON LAS ETIQUETAS DE LOS NUDOS DE APOYO ASIGNADAS EN EL MODELO DESARROLLADO EN EL SACS®

- Rigideces de resortes verticales (K_z) y laterales (K_x y K_y):** para el cálculo de las rigideces de los resortes, se dividió la componente de reacción de cada nudo de apoyo del MAT del modelo de SACS®, entre la componente correspondiente de desplazamiento en el modelo de PLAXIS®. En la figura 3.1-4 se muestra el factor de variación de las rigideces de los resortes verticales K_z . Para la mayoría de estos resortes se encontró que la variación es prácticamente constante entre las iteraciones; sin embargo, el comportamiento de las rigideces de los resortes laterales K_x (Figura 3.1-5) es diferente, en este caso se presentan grandes variaciones en la primeras tres iteraciones, y luego el sistema converge a partir de la cuarta iteración. En la figura 3.1-6 se muestra que a partir de la 2ª iteración las rigideces de los resortes laterales K_y convergen.

Cabe mencionar que durante el proceso de cálculo de iteraciones de los resorte verticales y horizontales, se encontró que no es posible realizar más allá de 5 iteraciones debido a la sensibilidad del programa PLAXIS® en la captura de los valores de las cargas, no permite variaciones más

pequeñas dentro de 7 dígitos significativos en los campos para captura de las cargas en los nudos del modelo del MAT. En el caso de cantidades con exponente, la sensibilidad se reduce aún más, ya que la variación de dichas cantidades se limita a 4 dígitos significativos, por lo tanto si se realizan más iteraciones no se aprecia mayor convergencia de datos. Una situación parecida se tiene con los campos para la captura de las rigideces de los resortes en el programa SACS®. No obstante, en el contexto del problema, por la variabilidad de los parámetros y las simplificaciones adoptadas en el desarrollo de los dos modelos, se considera que el grado de aproximación es apropiado.

En el APÉNDICE II se muestra las tablas con los valores obtenidos de la rigideces de los resortes en cada iteración.

3.1.1 Ajustes de valores sesgados y singulares en los resortes

En las gráficas de las figuras 3.1-4, 3.1-5 y 3.1-6 se observa valores sesgados y/o singulares en las rigideces de los resortes laterales y verticales, por lo que se hicieron dos tipos de ajustes:

1. Ajuste de resortes verticales con valores que no alcanzaron a converger y/o con valores de rigidez disparados.
2. Ajuste de resortes horizontales como una proporción de los resortes verticales.

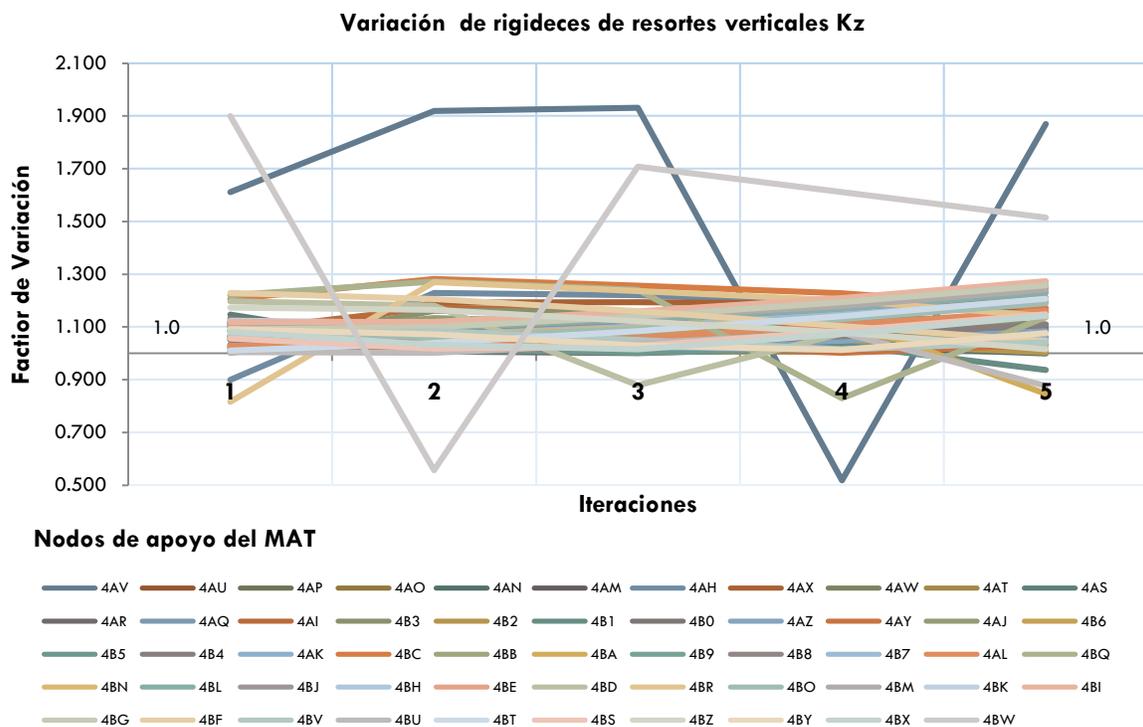


FIGURA 3.1-4 GRAFICO DE VARIACIÓN DE LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES VERTICALES KZ EN LOS NUDOS DE APOYO DEL MAT

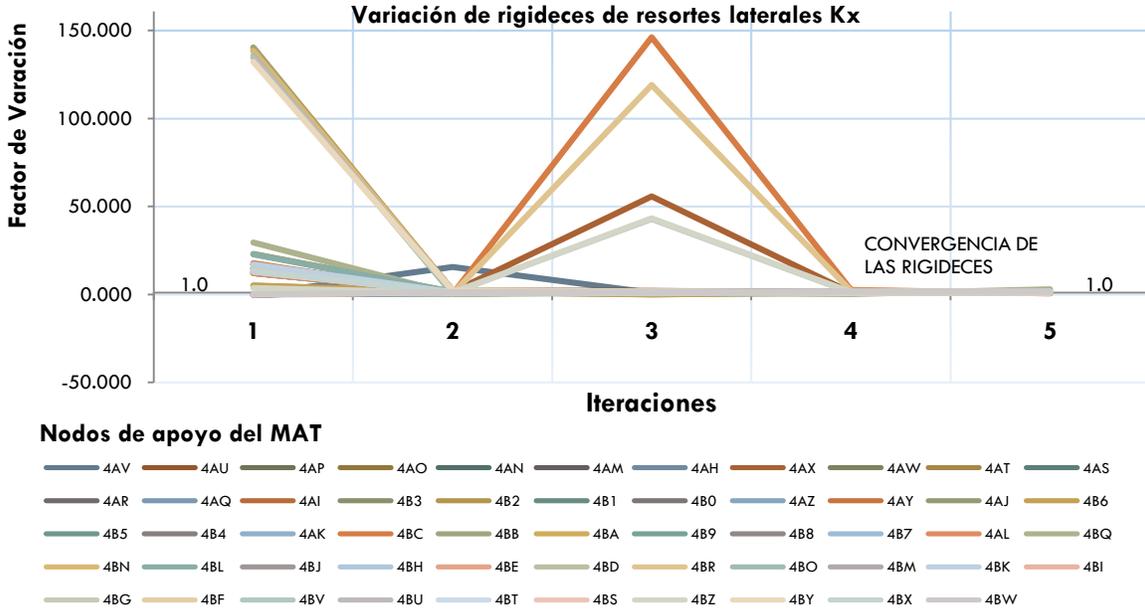


FIGURA 3.1-5 GRÁFICO DE VARIACIÓN DE LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES HORIZONTALES KX EN LOS NUDOS DE APOYO DEL MAT

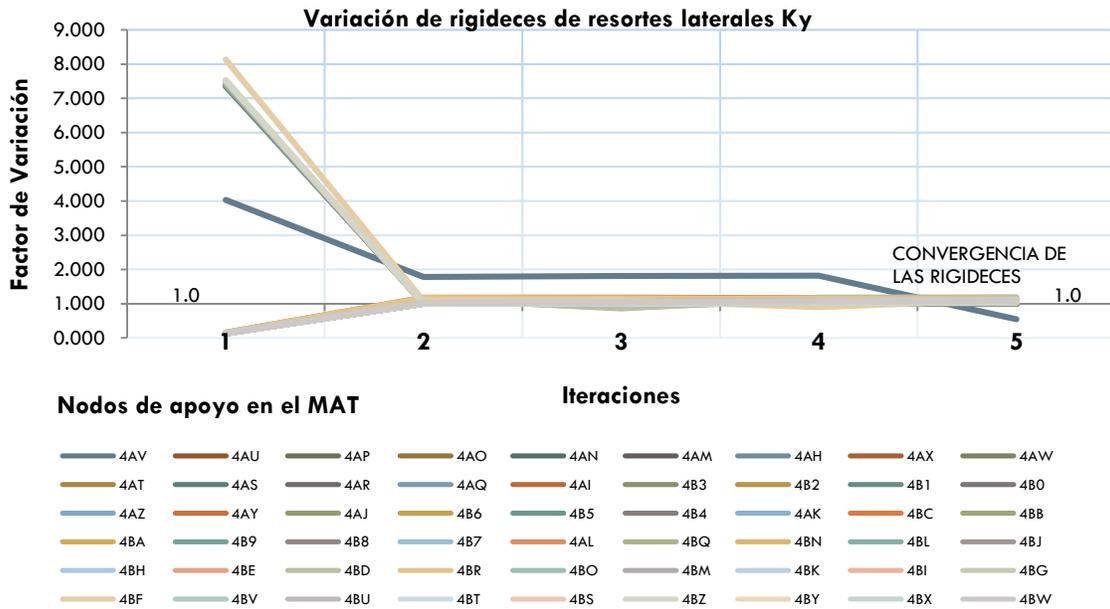


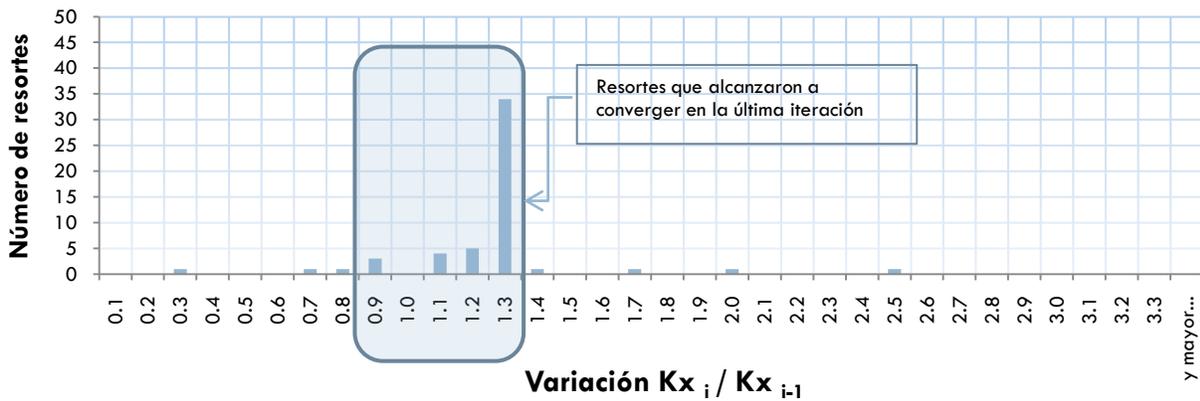
FIGURA 3.1-6 GRÁFICO DE VARIACIÓN DE LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES HORIZONTALES KY EN LOS NUDOS DE APOYO DEL MAT

3.1.1.1 Ajuste-1: ajuste de rigideces que no convergen y con valores disparados.

Para detectar los valores que convergen, se graficaron dichos valores en los histogramas de las figuras 3.1.1.1-1 (A, B y C). Estos histogramas muestran la distribución del número de resortes con las

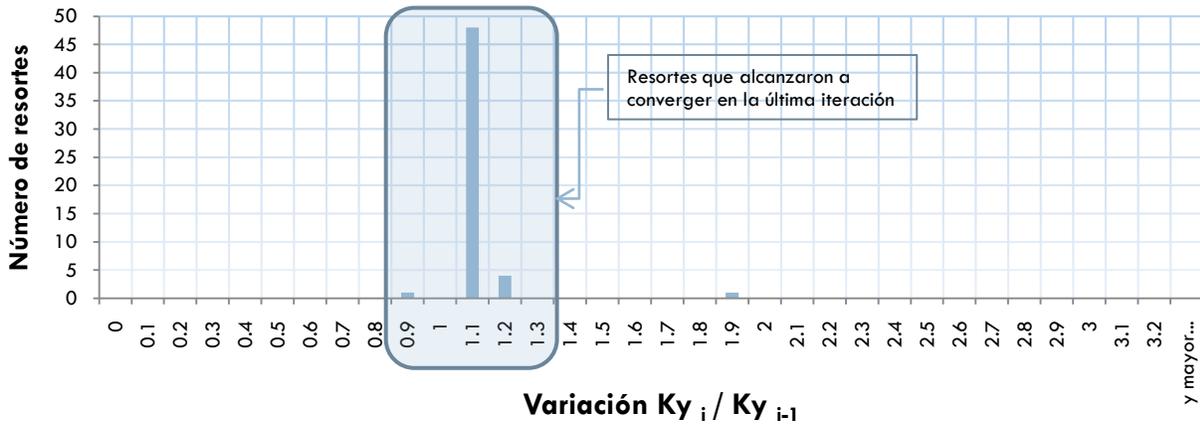
variaciones de los resortes obtenidos con la última iteración, en el eje horizontal de las gráficas aparecen dichas variaciones y en el eje vertical su frecuencia; es decir, el número de resortes que presentan un valor de variación dado. Se tiene un total de 54 nudos de apoyo con resortes con los que está modelado el MAT tanto en el SACS® como en el PLAXIS®. Como ejemplo se observa en la figura 3.1.1.1-1 (A), que alrededor de 35 resortes alcanzaron una variación final de alrededor de 1.3 en K_x , mientras que para los resortes laterales K_y (Figura 3.1.1.1-1 (B)) la variación más significativa es de 1.1, esto es porque más de 45 resortes alcanzaron a variar 1.1 aproximadamente en la última iteración. Por último en K_z se tienen 52 resortes que convergieron ya que sus variaciones están entre 0.9 y 1.3 (Figura 3.1.1.1-1 (C)).

Variación de la rigidez de resortes horizontales (K_x) en la última iteración



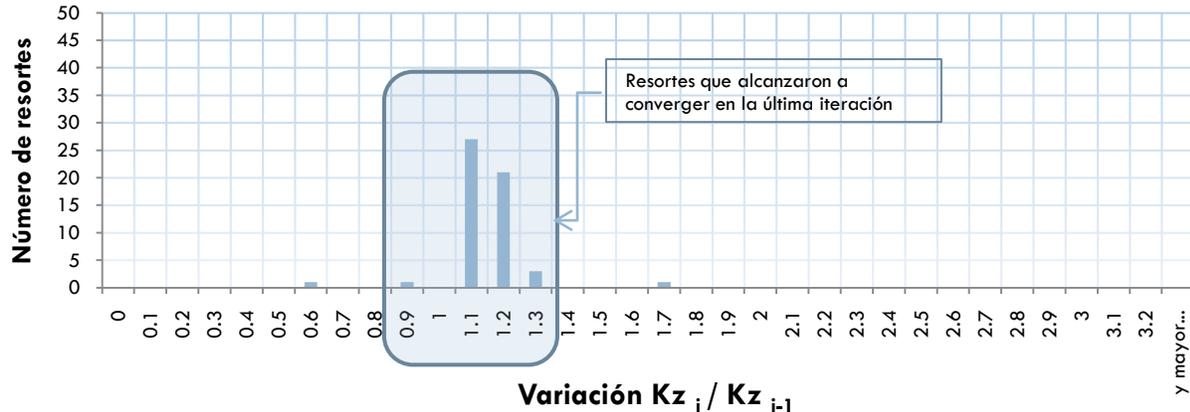
(A)

Variación de la rigidez de resortes horizontales (K_y) en la última iteración



(B)

FIGURAS 3.1.1.1-1 (A Y B) HISTOGRAMAS CON DISTRIBUCIÓN DE VARIACIONES DE RIGIDECES DE RESORTES ENTRE LAS ITERACIONES 5 Y 4

Variación de la rigidez de resortes verticales (Kz) en la última iteración


(C)

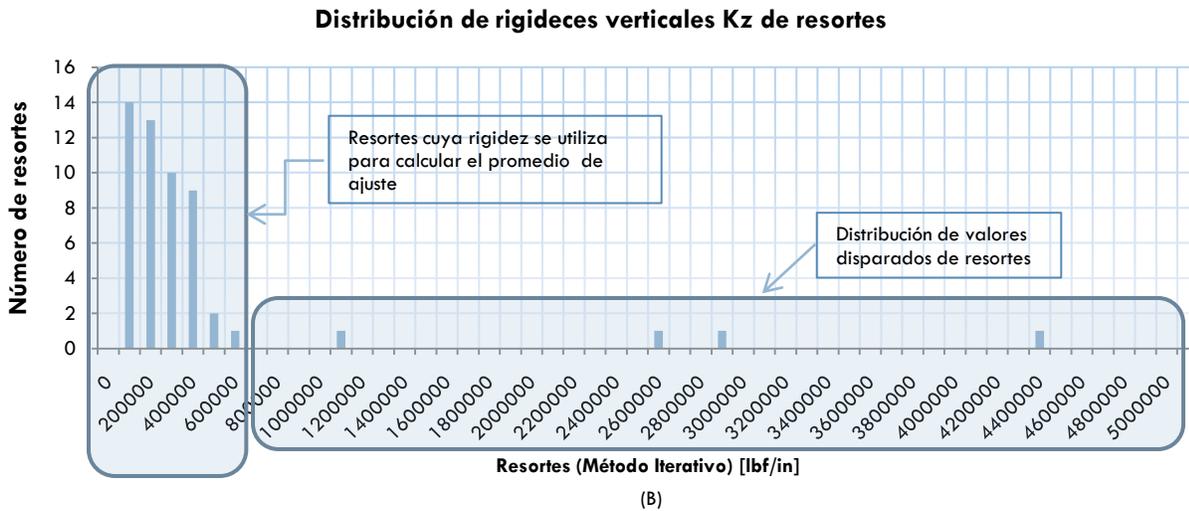
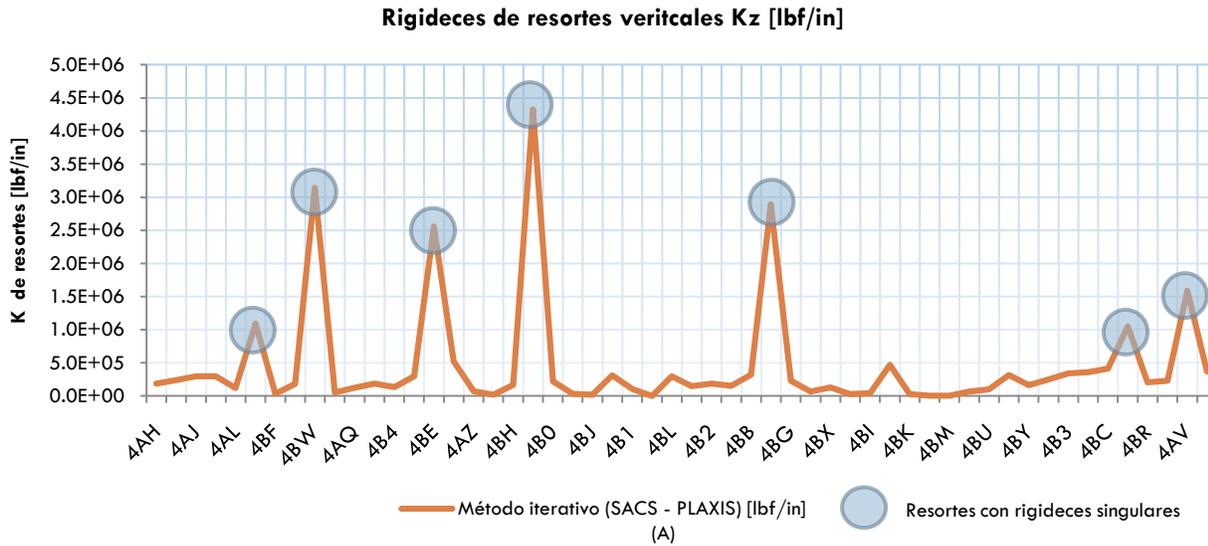
FIGURAS 3.1.1.1-1 (C) HISTOGRAMAS CON DISTRIBUCIÓN DE VARIACIONES DE RIGIDECES DE RESORTES ENTRE LAS ITERACIONES 5 Y 4

De acuerdo a los histogramas obtenidos, se determinó agrupar los nudos con rigideces de resorte cuya variación se encuentra entre 0.9 y 1.3. Los demás resortes no alcanzaron a converger a lo largo de las 5 iteraciones, ya que su factor de variación está fuera del intervalo mencionado. El valor de las rigideces de estos resortes se ajustó al valor promedio de los resortes que quedan dentro del intervalo del factor de variación de 0.9 a 1.3 (Figuras 3.1.1.1-1).

También se tienen resortes con valores de rigidez muy grandes en relación a los demás, para identificarlos primero se debe graficar los valores de las rigideces por nudo (Figura 3.1.1.1-2 (A)), luego para observar cuántos resortes tiene dichos valores disparados y cuáles se usaran para obtener el promedio de ajuste se realizó el histograma de la figuras 3.1.1.1-2 (B).

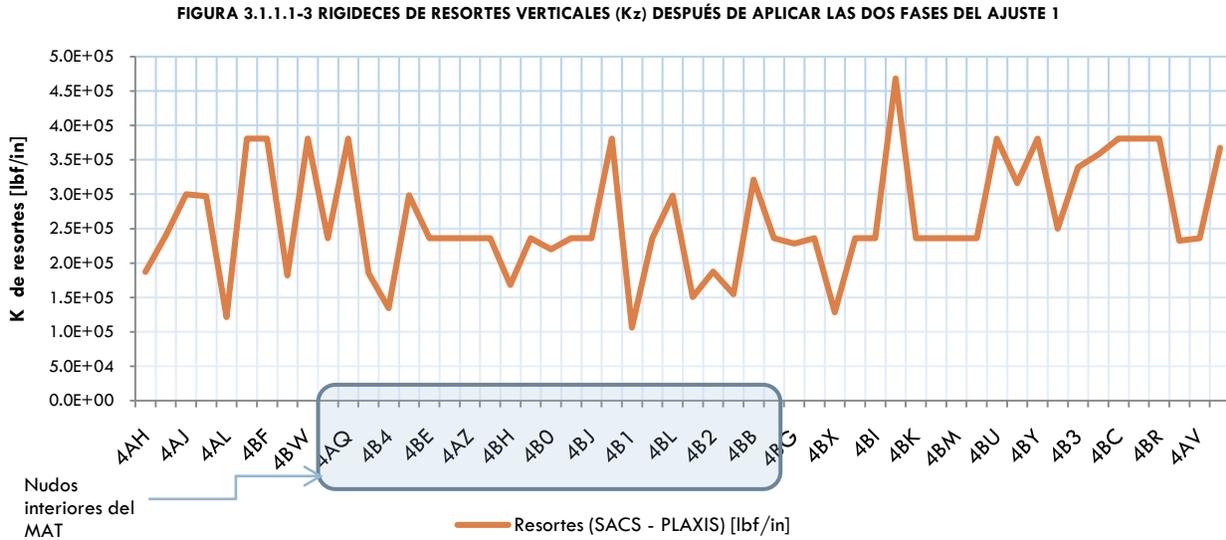
Para ejemplificar el procedimiento completo del primer ajuste, en la gráfica de la figura 3.1.1.1-1 (C), según el histograma, hay un resorte cuya variación quedó de 0.6 y otro de 1.7 en la última iteración, es claro que estos dos resortes no alcanzaron a converger, como la primera parte del Ajuste 1 se sustituyó la rigidez de estos nudos por el valor promedio de los demás resortes cuya variación quedó entre 0.9 y 1.3. La siguiente fase del Ajuste 1 se realiza analizando la gráfica de la figura 3.1.1.1-2 (A), se encontró que aunque hay resortes que convergieron, su valor de rigidez es grande comparada con la de los demás.

En el histograma de la figura 3.1.1-2 (B) se puede observar la agrupación de las rigideces de los resortes. Es evidente que la mayoría de los resortes (50 resortes) tienen rigidez entre $100 \times 10^3 \text{ lbf/in}$ y $600 \times 10^3 \text{ lbf/in}$, los demás resortes tienen valores singulares, por lo tanto esta fase del Ajuste 1 consiste en sustituir las rigideces de los resortes con valores de rigidez singulares por el promedio de los 50 resortes mencionados.

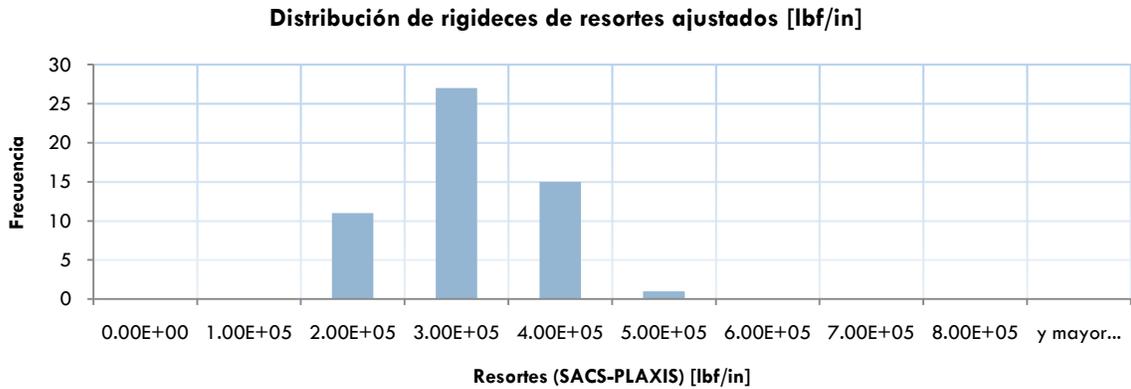


FIGURAS 3.1.1-2 (A Y B) RIGIDECES DE RESORTE EN LA ÚLTIMA ITERACIÓN: (A) MAGNITUD DE RIGIDECES POR NODO DE APOYO DEL MAT, (B) HISTOGRAMA CON DISTRIBUCIÓN DE RIGIDECES (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

En la figura 3.1.1.1-3 se presenta el resultado de los valores de las rigideces ya ajustados. En la figura 3.1.1.1-4 se muestra como resultado el histograma de distribución donde se observa que ya no hay valores de rigideces fuera de rango.



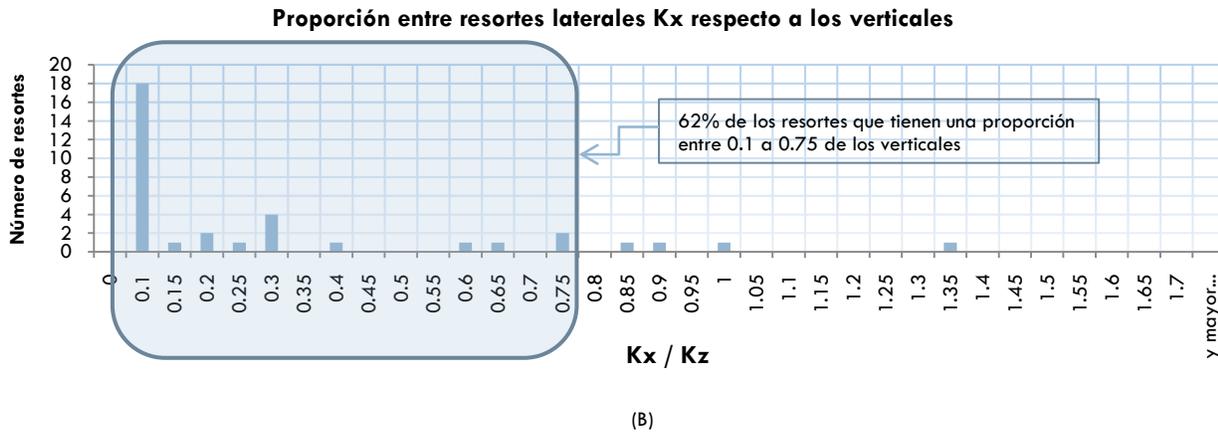
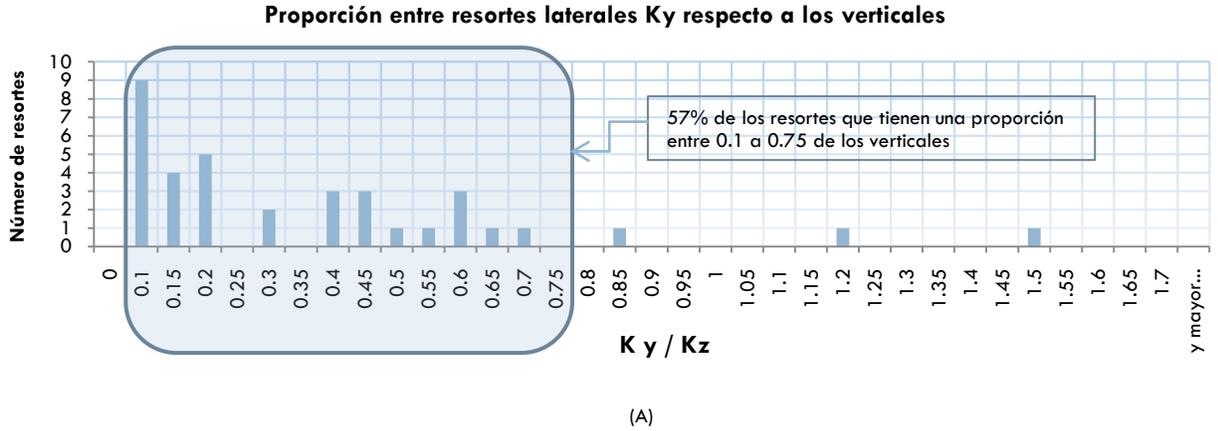
FIGURAS 3.1.1.1-3 VALORES DE RIGIDECES RESULTANTES CON VALORES AJUSTADOS



FIGURAS 3.1.1.1-4 DISTRIBUCIÓN DE RIGIDECES DE RESORTES DESPUES DE APLICAR LOS DOS TIPOS DE AJUSTES (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

3.1.1.2 Ajuste-2: ajuste de los resortes laterales como factor de los resortes verticales.

Se analizó la relación entre las rigideces de los resortes laterales con respecto a la de los resortes verticales $K_{lateral}/K_z$, en las gráficas de las figuras 3.1.1.2-1 (A y B) se muestra las distribuciones de dicha razón tanto para las rigideces de resortes K_y y K_x .



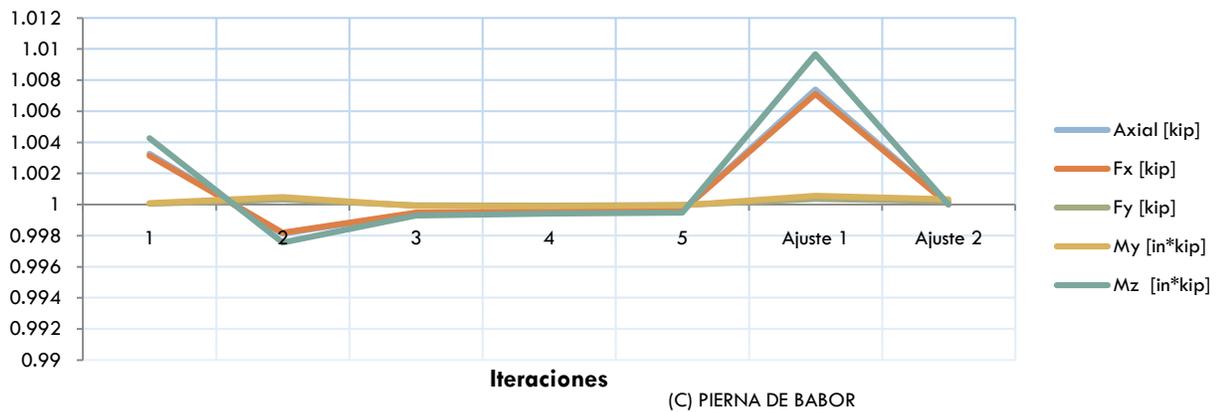
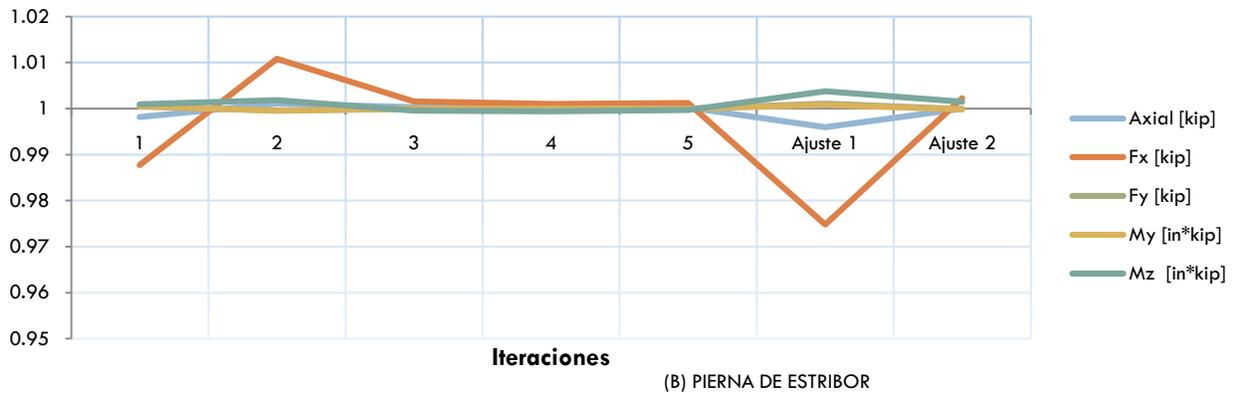
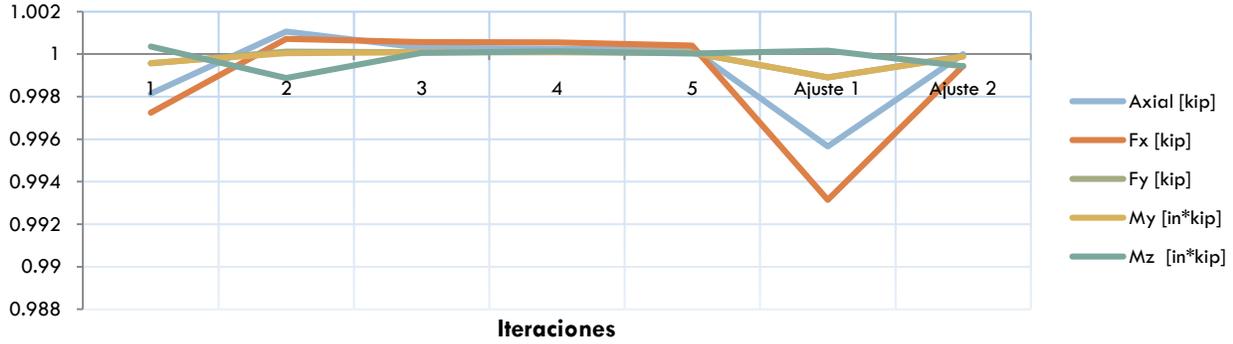
FIGURAS 3.1.1.2-1 (A Y B) HISTOGRAMAS DONDE SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS PROPORCIONES ENTRE LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES LATERALES CON RESPECTO A LA DE LOS VERTICALES

Si se establece que las rigideces de los resortes laterales son una fracción de los verticales dentro de un intervalos de 0.1 y 0.75, se aprecia que del 57% al 62% de las rigideces de los resortes laterales se encuentran dentro de dicha relación respecto a los verticales. Obteniendo el promedio de dichas proporciones dentro del rango mencionado y designando $C_x = K_x/K_z$ y $C_y = K_y/K_z$ respectivamente, se obtienen los siguientes factores que pueden proporcionar la rigidez de los resortes laterales en función de los verticales (Tabla 3.1.1.2-1):

TABLA 3.1.1.2-1. COEFICIENTES DE RESORTES LATERALES

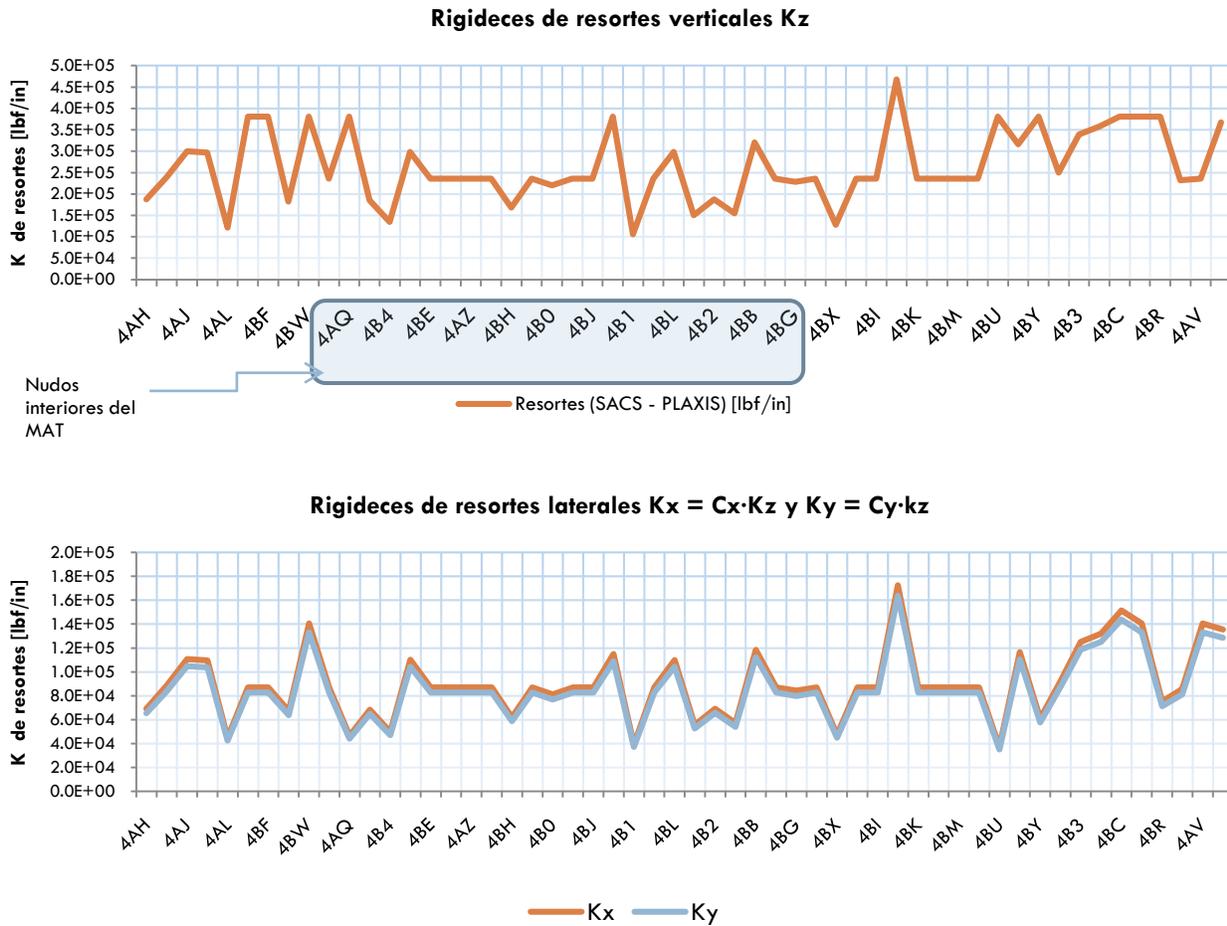
TIPO DE RESORTE	FACTOR
Resortes laterales en X (C_x)	0.369
Resortes laterales en y (C_y)	0.349

Utilizando estos coeficientes para calcular los resortes laterales ($K_x = C_x \cdot K_z$ y $K_y = C_y \cdot K_z$) y sustituyendo los correspondientes en el modelo de SACS®, se realizaron dos corridas adicionales con los datos obtenidos en los dos ajustes. En las figuras 3.1.1.2-2 (A, B y C) se presenta la variación de la bajada de cargas de las piernas entre cada iteración y los dos ajustes realizados sobre los resortes verticales y horizontales. Se observa que la variación vuelve a cerrarse cercano a 1 cuando se consideran los resortes laterales como una proporción de los verticales.



FIGURAS 3.1.1.2-2 (A, B Y C) GRAFICAS DE VARIACIÓN DE LA BAJADA DE CARGAS EN LAS PIERNAS DE LA PLATAFORMA AUTO ELEVABLE

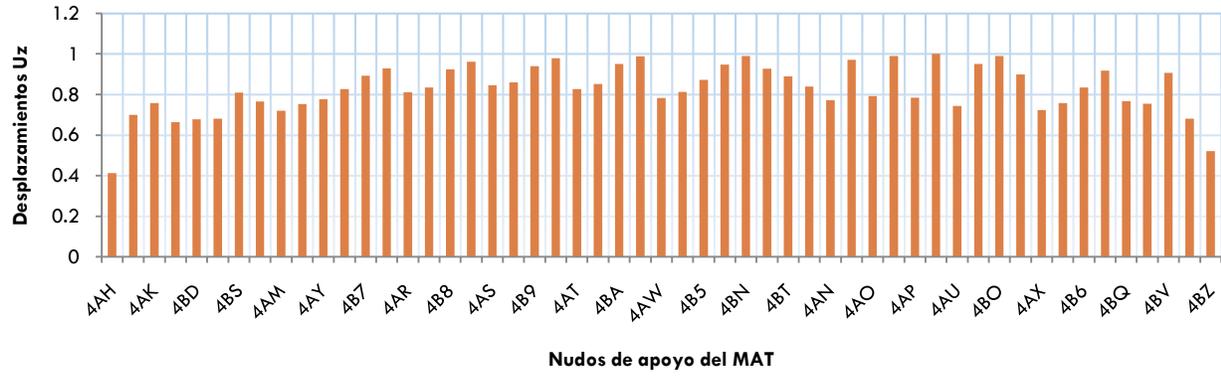
En las figuras 3.1.1.2-3 A y B se muestran los valores finales de las rigideces de los resortes en los nudos de apoyo del MAT.



FIGURAS 3.1.1.2-3 VALORES FINALES DE LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES EN LOS NUDOS DE APOYO DEL MAT (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

En la figura 3.1.1.2-4 se puede apreciar los desplazamientos verticales obtenidos con los resortes calculados por el método iterativo, dichos desplazamientos en la gráfica han sido normalizados con respecto al máximo que se presentó en el nudo 4BM del MAT.

Cabe mencionar que la respuesta obtenida ha sido en base a resortes cuyo comportamiento es elástico lineal bajo cierta sollicitación crítica, por lo tanto estos resultados solo tienen validez para dicha condición de carga, pero más allá de eso, si la magnitud de los esfuerzos inducidos rebasan los límites elásticos, se presenta fluencia en el material, por lo que el suelo adquiere un comportamiento plástico. En el APÉNDICE IV se muestra un análisis con resortes no lineales en donde el modelo de SACS se modificó para realizar la corrida utilizando el conjunto de instrucciones que corresponde a un análisis estático no lineal (en inglés, Push-Over).



FIGURAS 3.1.1.2-4 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES NORMALIZADOS EN LOS NUDOS DEL MAT OBTENIDOS CON RIGIDECE DE RESORTES CALCULADOS POR EL MÉTODO ITERATIVO (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-3)

3.2 MÉTODO EMPÍRICO: DETERMINACIÓN DIRECTA DE LA RIGIDEZ DE LOS RESORTES CON EL MÓDULO DE REACCIÓN Y ÁREAS TRIBUTARIAS.

Con el resultado obtenido del módulo de reacción de las sección 2.2, se obtuvo la rigidez de los resortes sobre cada nudo de apoyo del MAT (Figura 3.2-2) utilizando el área tributaria correspondiente (12), es decir, multiplicando el módulo de reacción por el área tributaria ($k_i = k_{s\ prom} \cdot A_i$), en la figura 3.1-2 se muestran la áreas tributarias utilizadas para las operaciones sobre cada nudo de apoyo del MAT. Para consultar la localización de los nudos en el MAT ver la figura 3.1-3.

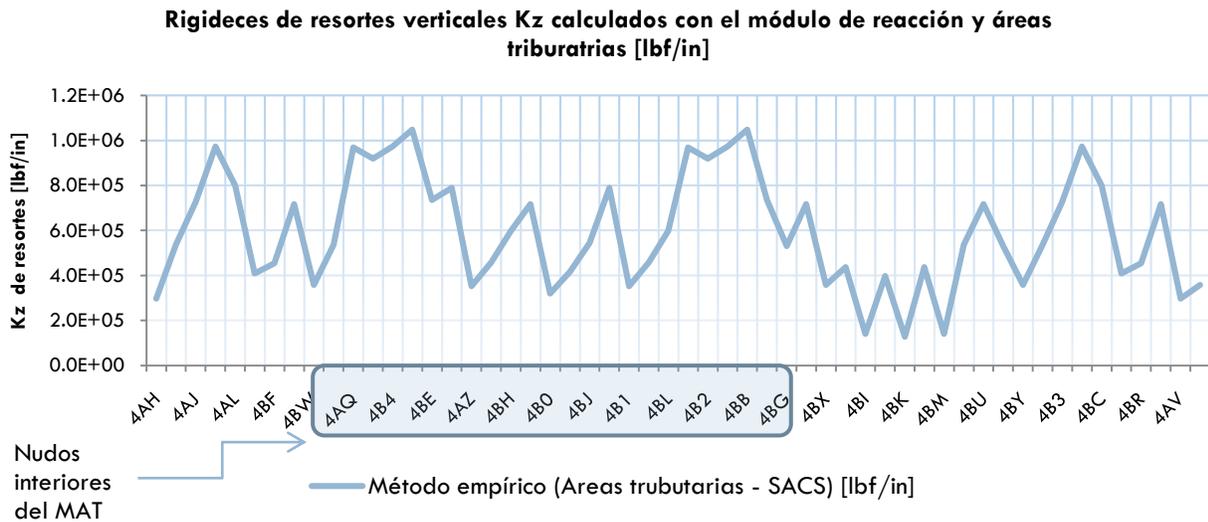


FIGURA 3.2-2 RIGIDECES DE LOS RESORTES OBTENIDOS POR ÁREAS TRIBUTARIAS

Para obtener los desplazamientos, en una copia del modelo tridimensional de SACS®, se sustituyeron las rigideces de resorte calculadas con este método. En la figura 3.2-4 se muestra la gráfica de los desplazamientos verticales U_z normalizados con respecto a su valor máximo. Estos datos obtenidos de las rigideces y los desplazamientos verticales U_z se comparan en la sección 3.4.1 con los resultados del método de las iteraciones [Sección 3.1].

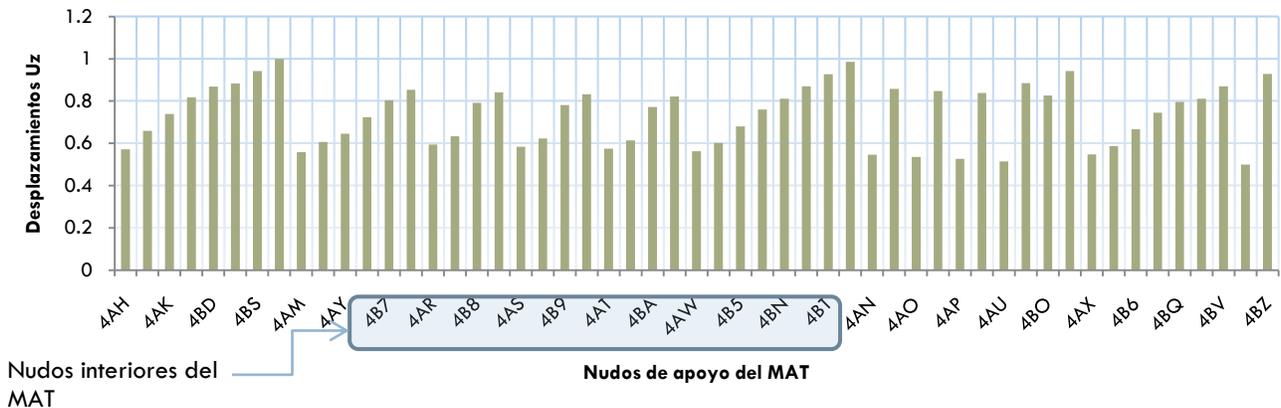


FIGURA 3.2-4 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES U_z NORMALIZADOS EN LOS NUDOS DEL MAT OBTENIDOS CON RIGIDECES DE RESORTES CALCULADOS POR ÁREAS TRIBUTARIAS (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-3)

3.3 MÉTODO SEMI-EMPÍRICO: MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO EL MÓDULO DE REACCIÓN.

La literatura (12) recomienda que para obtener mejores resultados con el módulo de reacción se debe utilizar el método de los elementos finitos. Para este fin, se utiliza el modelo desarrollado con el

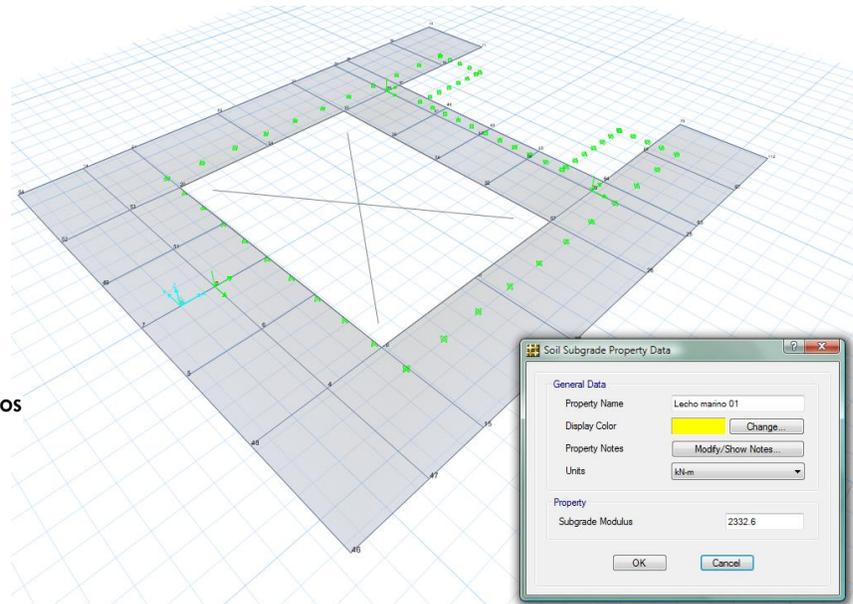


FIGURA 3.3-1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DESARROLLADO CON EL PROGRAMA SAFE® 8.1

programa SAFE® versión 8.1 [Sección 2.3]. El programa analiza la respuesta de la cimentación, esto es los elementos mecánicos, presión de contacto y los asentamientos (desplazamientos verticales U_z), todo bajo las mismas condiciones de carga definidas para el modelo de PLAXIS® [Sección 2.1.2].

En las figuras 3.3-1 se presenta el modelo con la geometría. En la figura 3.3-2 se muestra los asentamientos (desplazamientos verticales U_z) después realizar el análisis de elementos finitos. Los colores indican diferentes magnitudes de asentamientos en el MAT inducidos por la misma condición de carga crítica. En la gráfica 3.3-3 se muestra los asentamientos normalizados por nudo del MAT extraídos de la figura 3.3-2.

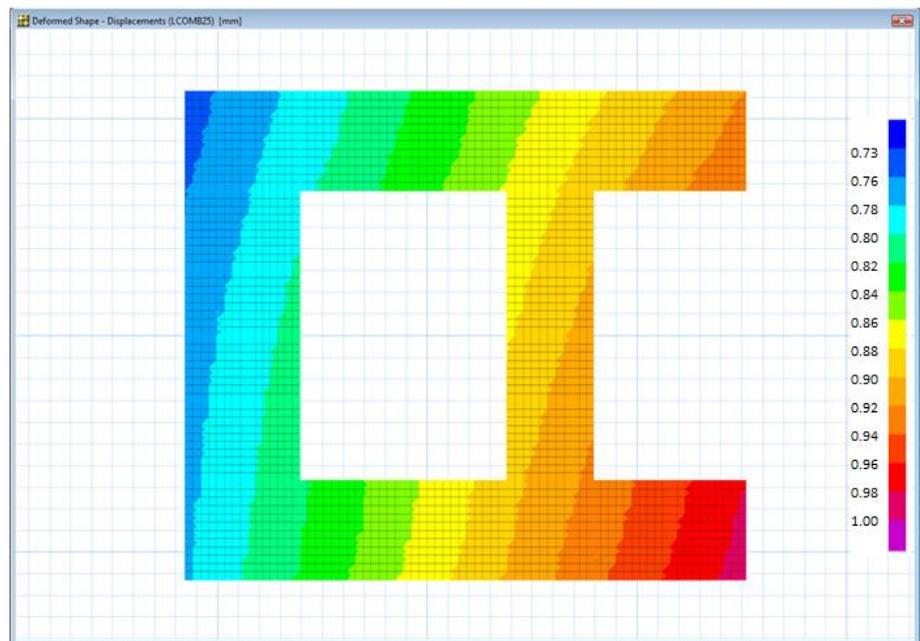


FIGURA 3.3-2 DISTRIBUCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN LOS NUDOS DEL MAT CON RIGIDEZES DE RESORTES CALCULADOS POR AREAS TRIBUTARIAS

Dado que el programa proporciona en forma directa los resultados de los asentamientos, no fue necesario determinar las rigideces de los resortes para luego sustituirlos en los correspondientes en otro modelo de SACS® tal como se hizo en la sección 3.2, por lo tanto, los asentamientos se comparan directamente con los resultantes del método iterativo en la sección 3.4.2.

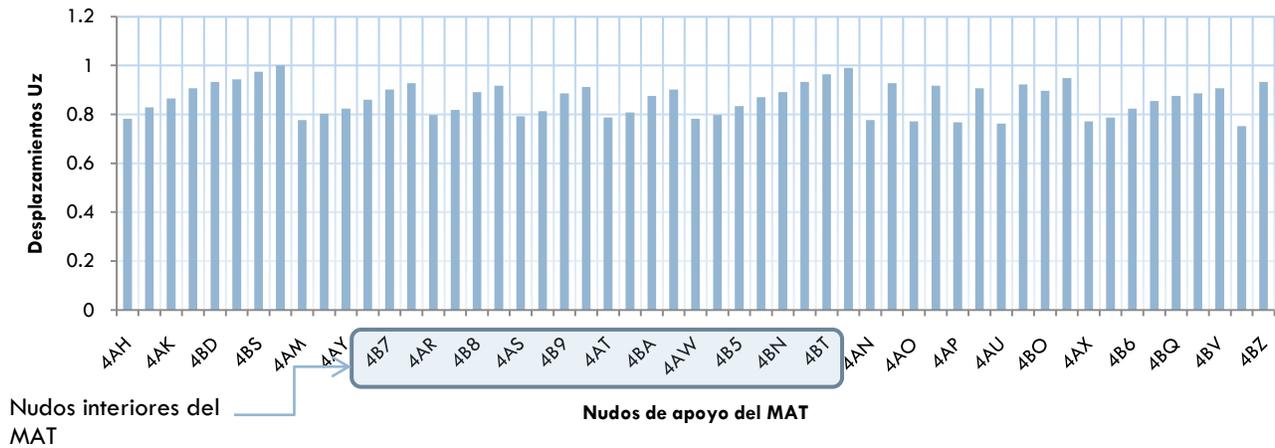


FIGURA 3.3-3 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES UZ NORMALIZADOS RESULTANTES DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS CON EL PROGRAMA SAFE® 8.1 (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-3)

3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Enseguida se comparan los resultados obtenidos con los métodos utilizados en este trabajo y se determinan los valores de los asentamientos inducidos bajo las mismas condiciones de carga. Como se apreciará más adelante, cada método proporciona resultados de acuerdo a la forma en que se modeló el suelo marino [Secciones 3.1, 3.2 y 3.3].

3.4.1 Primer Método (Método iterativo (SACS® - PLAXIS®)) vs Segundo Método (Método empírico (Módulo de reacción y áreas tributarias)).

Comparando el método iterativo [Sección 3.1] con el método empírico [Sección 3.2], se encuentra que las rigideces verticales obtenidas con el módulo de reacción y las áreas tributarias (sistema desacoplado) son mayores entre el 10% y 90%. Al realizar la corrida con el modelo de SACS® con las propiedades de los resortes del segundo método, se obtienen desplazamientos menores que los obtenidos por el primero (método iterativo). En las figuras 3.4.1-1 se muestran en forma gráfica las diferencias de las rigideces de los resortes y su distribución.

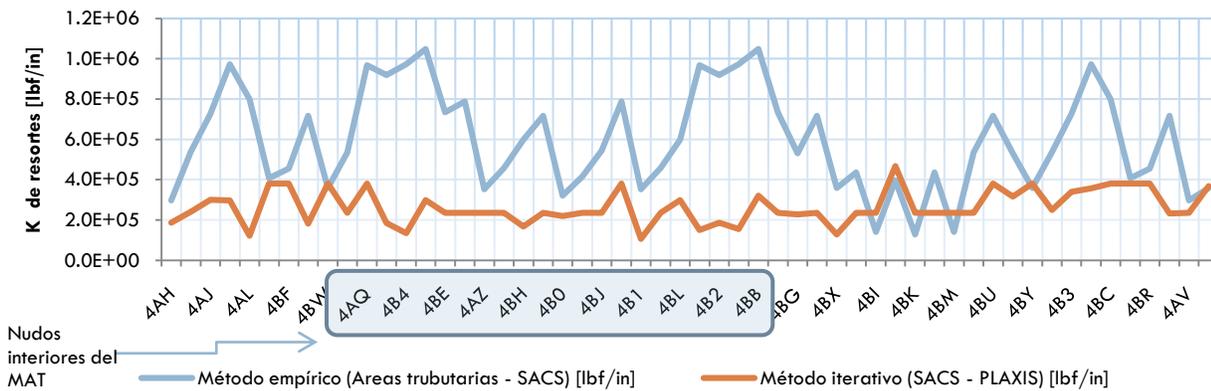


FIGURA 3.4.1-1 GRÁFICA QUE COMPARA LAS RIGIDECES DE LOS RESORTES ENTE EL MÉTODO ITERATIVO VS MÉTODO EMPÍRICO, SE OBSERVA QUE LA RIGIDECES OBTENIDAS POR EL MÉTODO EMPÍRICO SON MAYORES.

En la gráfica de la figura 3.4.1-2 se muestra la distribución de las relaciones que guardan las rigideces de los resortes del primer método con respecto al segundo, se puede apreciar que la mayoría de los valores de rigidez del primer método (método iterativo) son menores que los calculados por medio de áreas tributarias (método empírico).

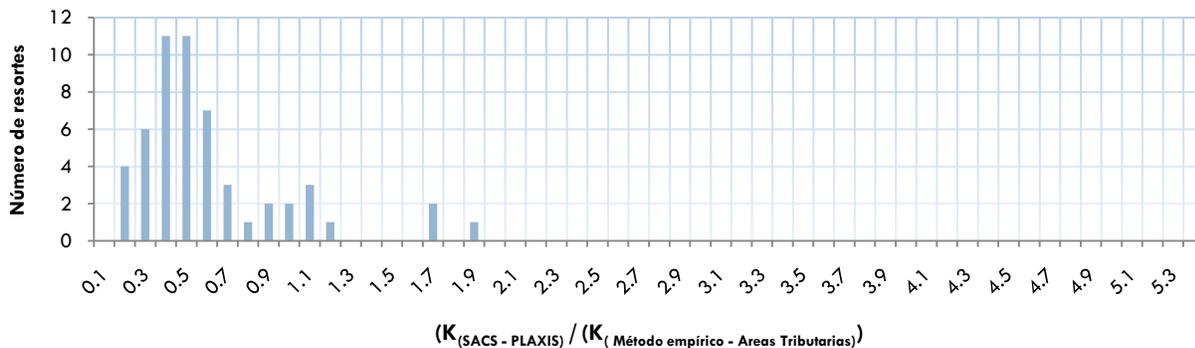


FIGURA 3.4.1-2 DISTRIBUCIÓN DE PROPORCIONES DE LAS RIGIDECES DE RESORTES ENTRE EL PRIMER MÉTODO Y EL SEGUNDO. (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

En la figura 3.4.1-3 se presenta la variabilidad entre los desplazamientos (U_z), se puede apreciar que los asentamientos del primer método son mayores hasta cerca de un 80% respecto a los desplazamiento resultantes del segundo método.

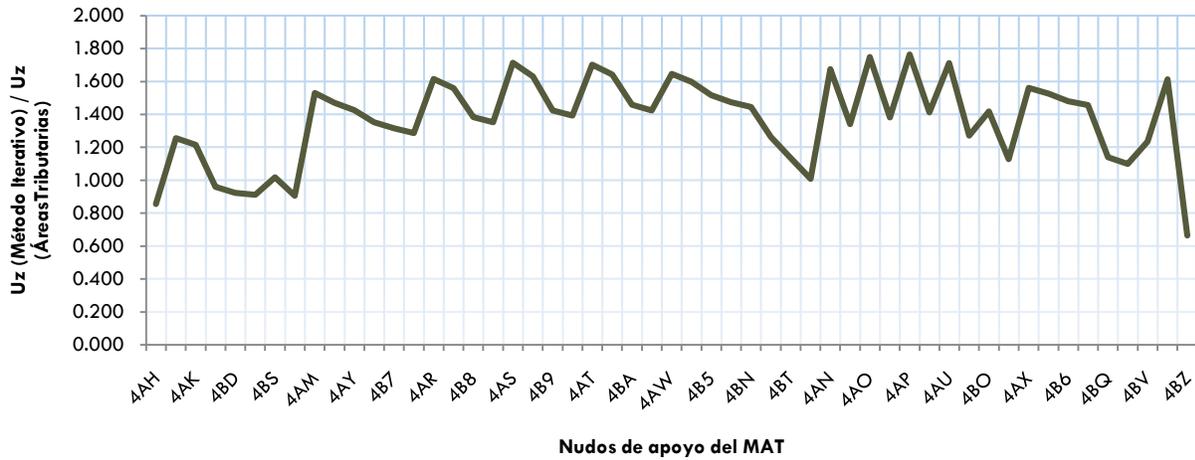
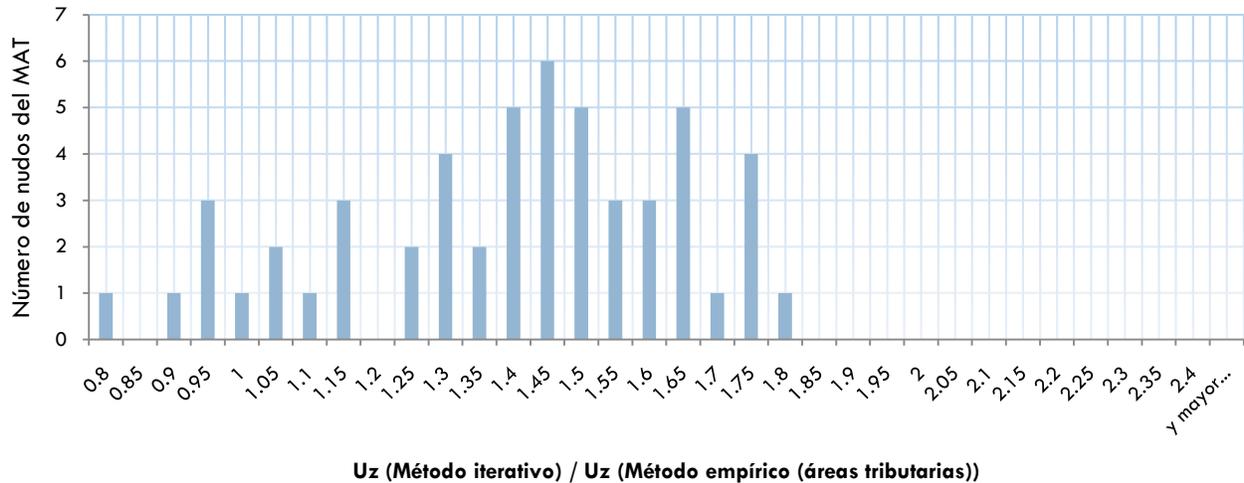


FIGURA 3.4.1-3 RAZÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTO DEL MÉTODO ITERATIVO / MÉTODO EMPÍRICO POR CADA NUDO DEL MAT. (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

FIGURA 3.4.1-4 DISTRIBUCIÓN DE LA PROPORCIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS DEL MÉTODO ITERATIVO / MÉTODO EMPÍRICO POR CADA NUDO DEL MAT.

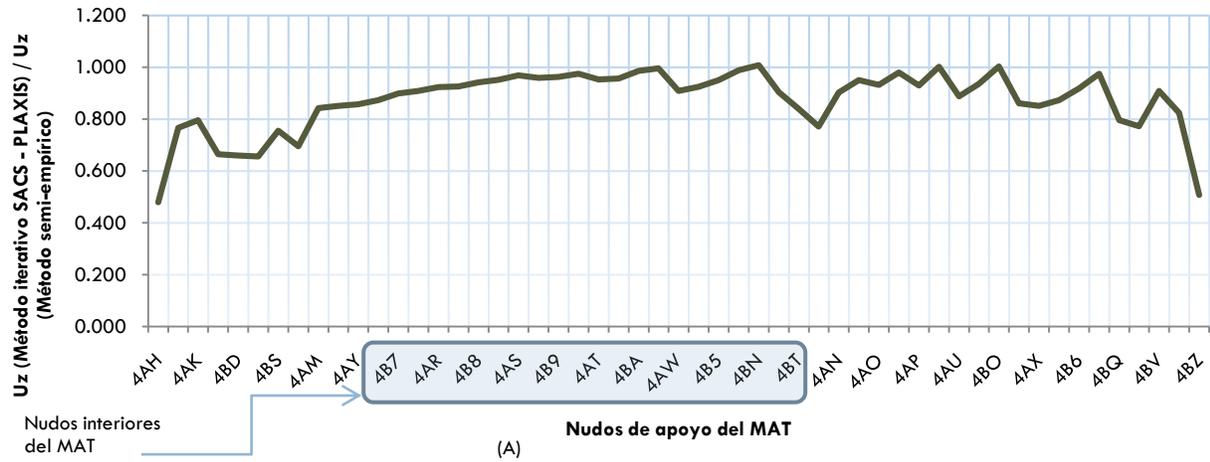
En la figura 3.4.1-4 se muestra el número de nudos del MAT cuya proporción entre desplazamientos (Uz) del primer método respecto al segundo, caen dentro de diferentes magnitudes. Se observa que los asentamientos de la mayoría de los nudos del MAT en el método iterativo (primer método) son mayores entre un 10% y 80%, como consecuencia de la mayor flexibilidad en los resortes.



3.4.2 Primer Método (Método iterativo (SACS® - PLAXIS®)) vs Tercer Método (Método semi-empírico (Módulo de reacción - SAFE®)).

El método iterativo [sección 3.1] determina las rigideces de los resortes considerando la estratigrafía del suelo marino; el método semi-empírico [Sección 3.3] simplifica las características de suelo integrándolas con una sola propiedad representada por el módulo de reacción, y éste define en forma directa el medio continuo (el suelo marino) en un modelo de elementos finitos [Sección 2.3]. A diferencia del método de las áreas tributarias, que también utiliza el módulo de reacción [Sección 3.3], en el método es semi-empírico se genera un sistema que es acoplado, lo que proporciona resultados más congruentes.

En las gráficas de la figura 3.4.2-1 (A y B) se observa que los desplazamiento resultantes de los nudos del método semi-empírico (tercer método), son mayores en un promedio de 12.7%, con lo que se puede confirmar que el método semi-empírico que integra el módulo de reacción k_s (12) en un sistema acoplado (medio continuo por elementos finitos), toma en cuenta en forma un poco menos aproximada las propiedades del suelo en comparación con el método iterativo que se considera como el método más "exacto" ya que toma en cuenta las características de la estratigrafía del sitio para las propiedades reales de esfuerzo-deformación y la compatibilidad entre la estructura y el suelo.



Histograma U_z (Método iterativo) / U_z (Método semi-empírico)

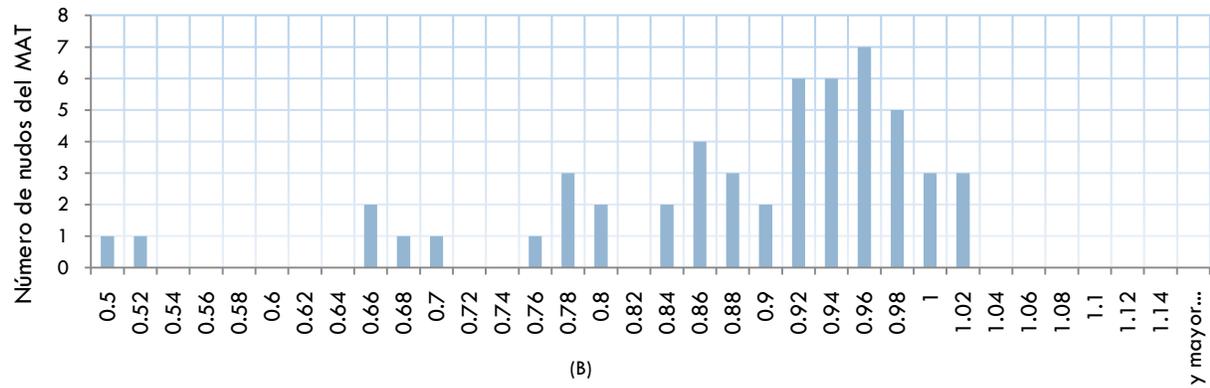


FIGURA 3.4.2-1 (A) RAZÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS DEL MÉTODO ITERATIVO / MÉTODO SEMI-EMPÍRICO. (B) DISTRIBUCIÓN DE LAS RAZONES. (PARA CONSULTAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS NUDOS VER LA FIGURA 3.1-2)

4 CONCLUSIONES

En esta tesis se utilizaron tres métodos para estimar las rigideces de los resortes. El primer método realiza iteraciones con la retroalimentación de los resultados de dos modelos: uno de la plataforma sobre el sistema de resortes y el otro de elementos finitos del sistema suelo-MAT incluyendo la estratigrafía del sitio. Las iteraciones se realizaron hasta alcanzar cierta convergencia en sus variaciones. El segundo es un método empírico que estima las rigideces de los resortes en forma directa mediante el módulo de reacción y áreas tributarias. En este segundo método las características de los resortes son independientes entre sí, resultando un sistema de resortes desacoplado (resortes independientes). El tercer método simplifica las propiedades del suelo con el módulo de reacción en un modelo de elementos finitos obteniendo así un medio continuo.

Se observó que el segundo método proporciona resultados no conservadores (Figura 4-1). Esto se debe a que, tal como se comenta en la literatura (12), el sistema de resortes que se obtiene a partir del módulo de reacción y áreas tributarias, además de resultar más rígido resulta ser un sistema independiente de resortes. Por lo tanto este método puede ser de utilidad sólo para cálculos preliminares. Para los casos analizados aquí se dedujo que es adecuado utilizar un factor de reducción de las rigideces de resortes de magnitud 0.6 a 0.75.

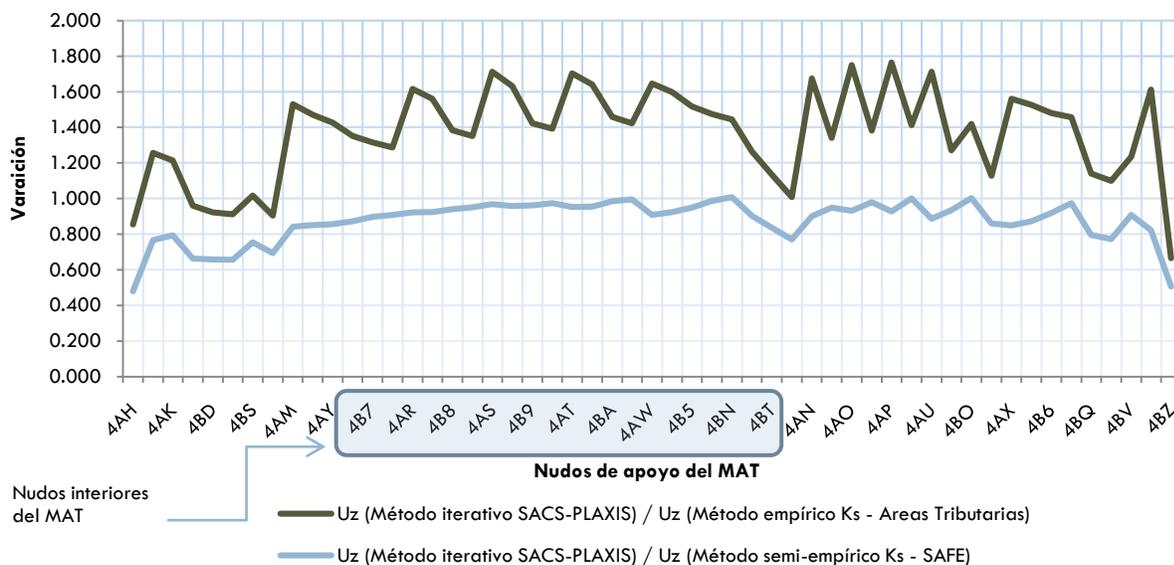


FIGURA 4-1 RELACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS

En relación con el tercer método (Figura 4-1), se encontró una diferencia del 12.7% con los desplazamientos resultantes del primer método. De acuerdo a este resultado se puede afirmar que se tendrían resultados conservadores al utilizar el tercer método para realizar un análisis de interacción suelo estructura. Cabe señalar que esta afirmación es válida si las propiedades del suelo se pueden simplificar utilizando el módulo de reacción, si y solo si las características se asemejan a las citadas en la literatura (12) que corresponden a un suelo con propiedades uniformes.

Durante el proceso de ajuste en los resortes del método iterativo se encontró que para el caso de estudio se puede estimar la rigidez de los resortes laterales dada la rigidez de los resortes verticales.

A partir del análisis realizado, se puede calcular los resortes laterales utilizando un factor promedio de 0.36.

Dada la disponibilidad actual de los recursos de cómputo, se recomienda siempre utilizar un análisis por elementos finitos donde se considere la estratigrafía del suelo y, si las condiciones del suelo marino lo permiten, apoyar los cálculos utilizando el módulo de reacción del suelo (método semi-empírico) ya que esto provee la pauta para verificar los resultados y proporcionar elementos de criterio de análisis para el ingeniero. (17)

4 APÉNDICE I

REVISIÓN DE ALGUNAS TEORÍAS RELATIVAS A LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA

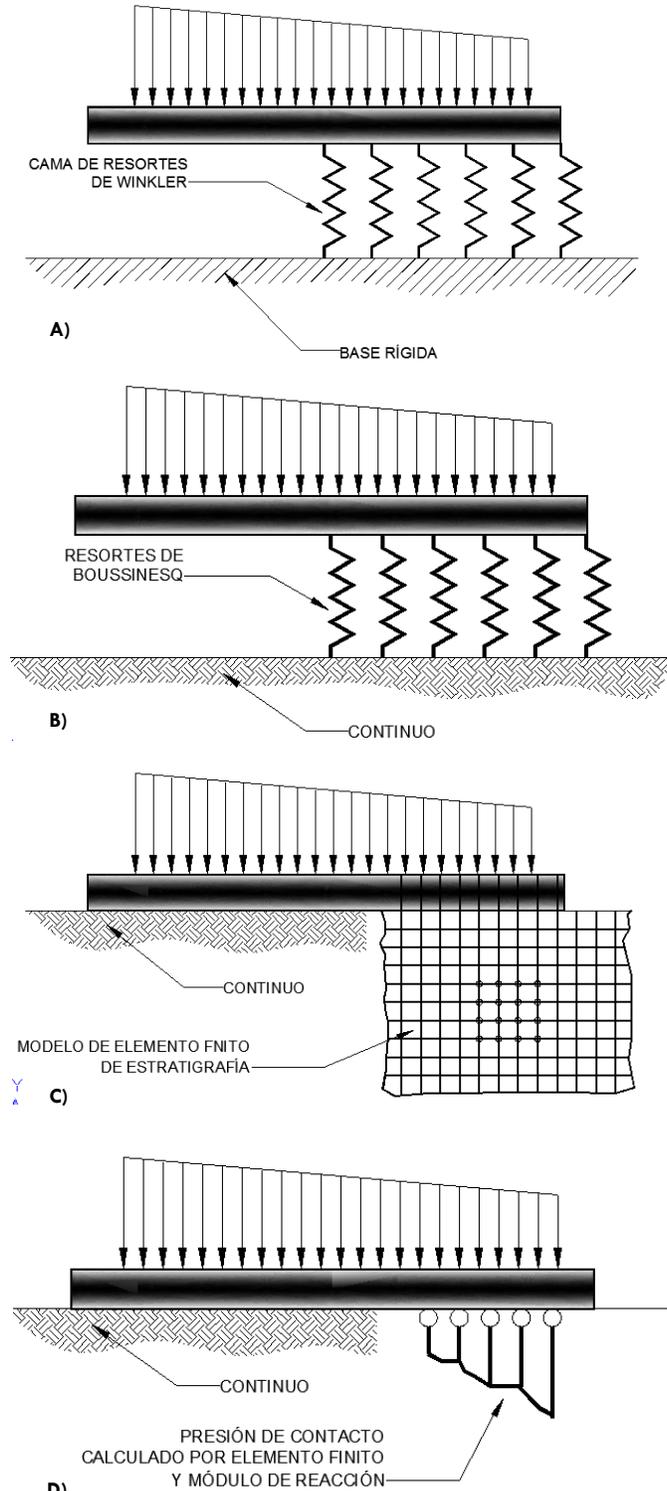
Las teorías convencionales de interacción suelo-estructura de cimentación están basadas en la siguiente ecuación diferencial:

$$(EI) \frac{d^4 y}{dx^4} = q = -K_B \cdot y \quad (18) (12)$$

En donde K_B se considera un parámetro constante identificado por el "módulo de reacción" por unidad de longitud de viga. El módulo de reacción depende de factores como son: el sistema de cargas aplicado, la extensión de la superficie cargada, la distribución de las reacciones, el comportamiento plasto-viscoso del suelo, el nivel de esfuerzos inducidos en la masa del suelo y la profundidad del estrato firme. E. Winkler (1867) (18) (16) (12) (Figura I-1 A) consideró la discontinuidad del suelo, esto es, que el suelo puede ser modelado por una cama de resortes que pueden deformarse al ser cargados en forma independiente los unos de los otros.

Cuando se usa este modelo (12) se requiere que el efecto del módulo de reacción se concentre sobre nudos de apoyo como resortes. Uno de los primeros métodos de concentración fue propuesto por Newmark (1943) (12) fue por medio de una distribución en línea parabólica o cúbica de las magnitudes de las rigideces de resorte sobre la longitud discretizada de la cimentación.

Según el análisis de Boussinesq (12) (16) (Figura A.1-1 B) es evidente que la presión de contacto contribuye al desplazamiento de los puntos que forman la cimentación. Utilizando el módulo de reacción en una base rectangular con carga uniforme, se producirán desplazamientos constantes, es decir que cada nudo presentará el mismo asentamiento, esto es si se calcula la



FIGURAS I-1 (A, B, C Y D) MÉTODOS DE ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA

rigidez de los resortes sobre cada nudo utilizando el área tributaria correspondiente (resortes desacoplados o independientes). En la opinión de varios autores este procedimiento resulta incorrecto, dado que se sabe que los desplazamientos son el resultado de un sistema acoplado con resortes y no con los resortes desacoplados calculado por áreas tributarias (12).

La aplicación del método de los elementos finitos en un medio continuo, con el medio continuo es dividido en un cierto número de elementos prismáticos, cada elemento consiste en un número de nudos que a su vez representan grados de libertad, los cuales corresponden a los valores discretos de las incógnitas derivadas de las condiciones de frontera del problema a resolver, que en el caso de la teoría de deformación, estos grados de libertad corresponden a los componentes de los desplazamientos (19); considerando el módulo de elasticidad (E_s) y módulo de Poisson (μ) como parámetros elásticos para cada estrato, la aplicación del método de los elementos finitos permite obtener un sistema acoplado, sin embargo el trabajo de modelado de la estratigrafía y de cómputo son mucho más extensivos, y los resultados son confiables en la medida en que sea posible estimar E_s y μ (Figura I-1 C). En la sección 2.2 se observa que existe una relación directa entre dichos parámetros y el módulo de reacción K_s . En cualquier caso el uso de K_s en el análisis de cimentaciones tipo MAT, es bastante más generalizado debido a su gran conveniencia en la simplificación del modelado y el trabajo de cómputo requeridos (12) (Figura I-1 D).

4 APÉNDICE II

Tabla de iteraciones

Nota 1: en esta tabla se presentan las iteraciones realizadas para calibrar las rigideces de los resortes, en los encabezados aparecen el número de iteración. En cada iteración aparecen asentados los desplazamientos obtenidos en el modelo de elemento finito tridimensional del programa PLAXIS, en las columnas de la izquierda aparecen las reacciones obtenidas en los apoyos del modelo tridimensional del programa SACS. La rigidez de los resortes se obtuvo dividiendo la reacción entre el desplazamiento. Las unidades de las rigideces aquí presentadas son compatibles con los datos de entrada del SACS.

N	Módulo SACS	Nodo PLAXIS	Coordenada en el IMAT	ITERACIÓN 0												ITERACIÓN 01											
				Ux	Uy	Uz	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz			
1	4AV	3784	-3.898	28.1939	-0.00021311	0.00028592	-0.00723608	34.363	21.196	174.544	666.180	423297	131736	0.00021207	0.00028551	-0.00726000	0.205	3.533	282.226	9651	106065	221977					
2	4AU	3768	-3.898	16.7639	-0.0002955	-0.01261635	5.536	24.092	113.181	1073721	265955	51235	-0.00026212	0.00051753	-0.01266172	0.036	3.301	107.896	38417	46059	46059						
3	4AP	3816	-3.898	7.62	-0.00004363	0.00051812	-0.01352160	78.089	32.214	5.916	1029288	1679317	2498	-0.00004018	0.00051831	-0.01356951	3.132	20.729	5.378	445051	228367	228367					
4	4AO	3870	-3.898	-7.62	-0.00005519	0.00051507	-0.01387197	118.634	37.360	1177787	1222456	631004	484815	-0.00005172	0.00051925	-0.01392082	6.535	78.53	1061.933	74246	88182	435392					
5	4AN	3883	-3.898	-16.7639	-0.00006740	0.00052003	-0.01373983	32.143	53.383	66.828	2727253	586172	28937	-0.00006580	0.00052021	-0.01378810	2.077	7.277	64.490	185931	79879	26708					
6	4AM	3974	-3.898	-28.1939	-0.00008147	0.00052088	-0.01303185	1.486	106.833	86.843	104335	117152	38952	-0.00007794	0.00052107	-0.01370765	0.107	14.523	86.549	7822	195155	37790					
7	4AH	4127	-3.898	-28.1939	-0.00009907	0.00052105	-0.01193160	17.869	37.007	1029916	34855	94282	-0.00008040	0.00052124	-0.01197344	1.423	0.431	219.840	85111	4727	104842						
8	4AA	3848	3.6576	28.1939	-0.00001179	0.00052898	-0.01180618	9.017	0.520	297.835	4367883	5618	144005	-0.00008040	0.00052124	-0.01197344	0.160	21.107	280.798	34949	22725	121267					
9	4AW	4066	3.6576	16.7639	-0.00002959	0.00052964	-0.01318842	25.106	155.265	296.790	4484989	1675670	128500	-0.00002616	0.00052925	-0.01322202	1.463	100.472	767.808	207655	1023885	307817					
10	4AT	4086	3.6576	7.62	-0.00004370	0.00053074	-0.01481442	365.697	778.577	14227.690	37609284	8376610	5483994	-0.00003681	0.00053090	-0.01485525	20.137	105.779	12435.577	2209341	113717	4780928					
11	4AS	4086	3.6576	-7.62	-0.0000552	0.00053074	-0.01481442	40.835	1288.539	1481.511	3464294	3780236	584225	-0.00005058	0.00053125	-0.01451578	2.642	174.401	1348.082	236463	1871389	530266					
12	4AR	4056	3.6576	-16.7639	-0.00008157	0.00053253	-0.01371707	27.948	53.935	320.932	653732	148921	144302	-0.00007804	0.00053269	-0.01375084	2.024	7.308	256.355	148086	78342	106454					
13	4AI	4134	3.6576	-28.1939	-0.00008157	0.00053253	-0.01371707	11.343	13.892	261.684	653732	148921	144302	-0.00009951	0.00053283	-0.01269371	0.903	1.882	347.855	53987	20165	156480					
14	4AJ	4134	3.6576	-28.1939	-0.00008157	0.00053253	-0.01371707	1.775	5.253	463.353	853573	55705	174810	-0.00008048	0.00053283	-0.01269371	0.262	0.716	472.939	176697	7592	219899					
15	4AB	4148	3.6576	-28.1939	-0.00001187	0.00053851	-0.01226047	3.913	53.574	414.403	6548502	568055	1745816	-0.00002615	0.00053864	-0.01228091	0.214	7.282	386.121	46631	71790	162533					
16	4AC	4148	3.6576	-28.1939	-0.00002957	0.00053851	-0.01226047	139.803	218.377	182.38694	2312965	124662	124662	-0.00004632	0.00053926	-0.01463999	5.587	29.616	286.001	791314	313605	111574					
17	4BI	4409	7.62	-0.00004377	0.00053912	-0.01461317	139.803	218.377	182.38694	2312965	124662	124662	-0.00005556	0.00054037	-0.01507367	46.969	9.008	658.128	5149455	95184	151574						
18	4BO	4561	7.62	-0.00005556	0.00054037	-0.01507367	853.925	66.456	743.431	87760761	702429	281016	-0.00006392	0.00054151	-0.01493204	6.855	12.428	209.373	612356	131054	80066						
19	4AZ	4566	7.62	-0.00006742	0.00054137	-0.01490530	105.908	91.909	230.493	8997400	3691420	88301	-0.00007803	0.00054211	-0.01425225	3.060	4.626	428.555	223961	48728	171700						
20	4AY	4440	7.62	-0.00008156	0.00054199	-0.01422842	42.254	34.256	441.820	2995279	3609188	177311	-0.00008888	0.00054211	-0.01425225	2.928	2.878	552.048	17804	30313	202128						
21	4AU	4323	22.0978	28.1939	-0.00001228	0.00054199	-0.01422842	2.136	480.661	21.6698	24574	206949	-0.00008888	0.00054211	-0.01425225	0.298	3.61	615.775	168953	33386	282013						
22	4BE	4578	22.0978	16.7639	-0.00002964	0.00054756	-0.01448546	73.262	14.612	418.805	8495482	247042	289510	-0.00002621	0.00054766	-0.01448936	0.463	1.975	392.542	100774	20223	154698					
23	4BS	4578	22.0978	7.62	-0.00006773	0.00054930	-0.01732580	9.924	457.019	869.583	841642	4412736	286593	-0.00002621	0.00054766	-0.01448936	0.368	1.975	392.542	100774	20223	154698					
24	4BA	5120	34.442	16.7639	-0.00008171	0.00056099	-0.015248872	54.749	12.909	417.950	3825884	131393	196099	-0.00002621	0.00056110	-0.01529168	0.948	4.840	714.562	46140	289798	17655	148395				
25	4AC	4853	34.442	16.7639	-0.00009956	0.00056100	-0.01460479	94.760	36.035	702.990	45521723	3374436	274501	-0.00002621	0.00056110	-0.01460479	7.500	4.840	714.562	46140	289798	17655	148395				
26	4BC	4191	34.442	28.1939	-0.00002857	0.00056099	-0.015248872	277.444	118.114	351.209	45521723	3374436	274501	-0.00003123	0.00056099	-0.01604639	14.092	18.580	422.861	2576612	116125	208076					
27	4BB	4680	34.442	16.7639	-0.00002973	0.00056666	-0.01563099	8.25.225	93.969	1156.569	158517486	930482	422505	-0.00002630	0.00056773	-0.01561648	5.204	12.620	1059.050	1129794	124946	387265					
28	4BA	5257	34.442	7.62	-0.00004340	0.00057775	-0.01619383	84.289	15.182	4.537	11089045	1504949	1600	-0.00003996	0.00057781	-0.01617672	3.172	2.033	4.083	482506	20089	1441					
29	4B9	5574	34.442	0	-0.00005516	0.00057821	-0.01646380	57.275	83.667	155.937	5928992	826256	54084	-0.00005169	0.00057827	-0.01644720	3.172	11.205	140.115	350367	110644	48645					
30	4B8	5662	34.442	-7.62	-0.00006773	0.00057872	-0.01665375	124.412	120.227	90.281	10567304	1186251	30955	-0.00006373	0.00057879	-0.01663675	8.020	16.000	81.376	718588	157854	27930					
31	4B7	5207	34.442	16.7639	-0.00008174	0.00057987	-0.01659280	961.492	105.209	1274.931	67165892	1035851	438747	-0.00007821	0.00058032	-0.01650526	12.784	16.688	411.750	608272	16413	146441					
32	4AL	5207	34.442	28.1939	-0.00009959	0.00058026	-0.01607259	161.644	12.504	424.218	92684871	1230848	150713	-0.00009602	0.00058032	-0.01650526	12.784	16.688	411.750	608272	16413	146441					
33	4BQ	4194	42.367	28.1939	-0.00004971	0.00051692	-0.01186426	47.725	514.686	938.405	5482560	5685077	451472	-0.00002594	0.00051720	-0.01184665	0.222	116.735	10926.976	48960	1132328	3842482					
34	4BN	4454	42.367	16.7639	-0.00002936	0.00058863	-0.01626495	34.843	872.403	12023.899	6776434	8402917	4221240	-0.00002594	0.00051720	-0.01184665	0.302	140.742	1269.656	43084	1362470	431111					
35	4BL	5098	42.367	7.62	-0.00004354	0.00058981	-0.01684466	7.486	1061.977	1421.318	981876	1028113	481811	-0.00004009	0.00058985	-0.01681683	0.302	4.395	8.052	64443	42487	26865					
36	4BI	5483	42.367	0	-0.00005550	0.00059062	-0.01732580	10.778	32.935	90.517	1108910	301334	301334	-0.00005023	0.00059066	-0.01732580	0.587	6.052	777.122	57697	597515	256547					
37	4BH	5650	42.367	-7.62	-0.00006773	0.00059139	-0.01732580	9.924	457.019	869.583	841642	4412736	286593	-0.00005023	0.00059143	-0.01729694	0.645	6.052	777.122	57697	597515	256547					
38	4BE	5553	42.367	16.7639	-0.00008133	0.00059216	-0.01734327	191.434	1016.930	12956.993	13441099	9806089	4265919	-0.00005023	0.00059220	-0.01734327	13.910	135.226	11746.655	1020988	1308883	3873922					
39	4BD	5224	42.367	28.1939	-0.00005551	0.00059216	-0.01734327	33.624	1217.291	1487.441	3458591	10210392	631818	-0.00005691	0.00059227	-0.01734327	4.764	140.742	1778.403	517083	1184349	576862					
40	4BR	4135	44.8052	28.1939	-0.00002422	0.00059312	-0.01493989	217.336	151.106	184.833	51234789	1654092	88395	-0.00002690	0.00059312	-0.01493989	15.838	23.442	226.088	3366373	262670	108323					
41	4BO	4450	44.8052	16.7639	-0.00002887	0.00059224	-0.01625500	786.592	148.873	1281.773	155431632	1435383	4506168	-0.00002545	0.00059327	-0.01625500	5.107	19.835	1177.355	1145529	191227	414347					
42	4BI	4804	44.8052	7.62	-0.00004374	0.00059376	-0.01601689	121.388	105.676	15.480	15484827	10168855	4143583	-0.00004029	0.00059439	-0.01698851	4.853	14.012	13.821	687856	134745	46464					
43	4BM	5112	44.8052	0	-0.00005550	0.00059435	-0.01734848	53.783	101.064	5533027	970949	47149	-0.00005023	0.00059439	-0.01734848	2.963	13.629	127.246	325114	129396	41960						
44	4BK	5422	44.8052	-7.62	-0.00006742	0.00059487	-0.01732452	118.367	159.429	243.255																	

Tabla de iteraciones

N	Módulo SACS	Módulo PLAMIS	Coordenadas en el MAT			ITERACIÓN 02						ITERACIÓN 03											
			X	Y	Z	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz	Ux	Uy	Uz
1	4AV	3784	-3.898	-18.1939	-0.00012235	0.00028587	0.00724622	0.018	9.372	540.672	623	1872.08	42.6060	0.00012267	0.00028593	-0.00724230	0.000	16.952	1043.309	6.23	3382.48	82.3063	
2	4AU	3768	-3.898	-16.7639	-0.0002817	0.00051758	0.01263571	0.018	3.247	115.871	3607	35824	5.4170	0.00028271	0.00051753	-0.01262832	0.009	3.243	133.838	17.69	357.79	6051.8	
3	4AP	3816	-3.898	0	-0.0004220	0.00051836	0.01354195	2.286	20.373	5.627	309366	22.425	0.00004276	0.00051831	-0.01353411	1.695	20.324	5.903	226313	223907	2490		
4	4AO	3870	-3.898	0	-0.0006372	0.00052026	0.01376038	5.4144	7.687	1090.784	5.8E+6	84520	44.8330	0.00006351	0.00052021	-0.01375247	43.206	7.655	1121.250	4.5E+6	84186	46111.8	
5	4AN	3883	-3.898	-7.62	-0.0006578	0.00052026	0.01376038	1.837	7.126	67.373	159479	78212	27.958	0.00006515	0.00052021	-0.01375247	1.526	7.082	70.204	131298	77732	29151	
6	4AM	3974	-3.898	-16.7639	-0.0007989	0.00052112	0.01305138	0.098	14.199	96.171	6994	155583	42.076	0.00008481	0.00052107	-0.01304387	0.085	14.088	106.999	5997	154739	46622	
7	4AH	4127	-3.898	-28.1939	-0.0009743	0.00052119	0.01194946	1.388	0.423	269.713	81342	4629	128885	0.00009803	0.00052124	-0.01194267	1.223	0.418	328.884	711257	4581	157250	
8	4AX	3848	3.6576	-16.7639	-0.0001047	0.00052917	0.01181869	1.179	0.071	365.168	642587	768	176429	0.00001101	0.00052913	-0.01181387	0.022	0.071	435.817	11532	768	210697	
9	4AW	3861	3.6576	-16.7639	-0.0002821	0.00052928	0.01320268	1.068	20.489	302.808	16207	224928	130964	0.00002876	0.00052924	-0.01319719	0.049	20.827	326.822	104981	224705	141175	
10	4AT	4066	3.6576	0	-0.0004227	0.00052983	0.01423218	0.888	98.888	775.454	144233	1065758	131341	0.00004282	0.00052979	-0.01421622	0.787	98.137	780.801	104981	1067735	313620	
11	4AS	4086	3.6576	0	-0.0005405	0.00053218	0.01483064	16.521	103.466	12130.229	1745437	1112778	4570426	0.00005462	0.00053089	-0.01482440	13.073	102.767	11775.848	1366844	1105554	453580	
12	4AR	4056	3.6576	-7.62	-0.0006579	0.00053218	0.01483064	2.340	171.221	1355.447	203088	1837169	533944	0.00006561	0.00053213	-0.01482952	1.939	169.428	1353.723	166876	1818080	533479	
13	4AQ	4109	3.6576	-16.7639	-0.0008000	0.00053272	0.01371446	1.886	1.715	274.482	134622	76908	114142	0.00008073	0.00053281	-0.01376172	1.615	1.722	291.270	114415	144415	121172	
14	4AI	4134	3.6576	-28.1939	-0.0009743	0.00053285	0.01267611	0.881	1.846	407.809	151616	19782	183696	0.00009803	0.00053281	-0.01267172	0.728	1.833	472.539	45341	19641	212936	
15	4B3	3932	9.7635	-28.1939	-0.0001056	0.00053866	0.01267611	0.227	0.712	548.946	122662	7545	254483	0.00001110	0.00053865	-0.01267611	0.004	0.712	635.000	2289	7545	295846	
16	4B2	4148	9.7635	16.7639	-0.0002819	0.00053866	0.01362176	0.107	7.215	410.251	21622	76480	171974	0.00002874	0.00053865	-0.01362176	0.067	7.205	431.317	13255	76591	180857	
17	4B1	4409	9.7635	7.62	-0.0004234	0.00053927	0.01462457	4.051	29.309	284.099	547761	310346	110926	0.00004261	0.00053924	-0.01462019	2.998	29.238	280.033	390079	309613	109372	
18	4B0	4561	9.7635	0	-0.0005408	0.00054039	0.01509271	8.597	8.896	638.338	4075031	94007	242416	0.00005460	0.00054035	-0.01505518	30.582	8.856	615.314	3195172	93590	233377	
19	4Z	4566	9.7635	-16.7639	-0.0005990	0.00054152	0.01491658	6.054	12.550	206.832	54571	129175	757176	0.00005948	0.00054109	-0.01491320	5.013	12.170	202.856	430612	12839	72370	
20	4Y	4440	9.7635	-28.1939	-0.0006998	0.00054213	0.01438856	2.851	4.555	443.358	203557	47977	174006	0.00006967	0.00054211	-0.01434266	2.442	4.519	460.796	173071	47606	184845	
21	4U	4323	9.7635	-28.1939	-0.0007971	0.00054213	0.01321702	0.289	2.834	576.643	16931	38844	345404	0.00007911	0.00054211	-0.01321671	0.254	2.811	645.122	13756	39532	27905	
22	4B6	4171	22.0978	-16.7639	-0.0000996	0.00054765	0.01327659	2.166	3.497	718.469	1128221	33250	305427	0.00009910	0.00054765	-0.01327620	0.040	3.445	780.242	19876	33268	335543	
23	4B5	4578	22.0978	-16.7639	-0.0002826	0.00054765	0.01448715	0.231	1.966	398.597	46737	20131	157250	0.00002811	0.00054765	-0.01448715	0.142	1.962	399.091	28212	20088	157346	
24	4B4	5120	22.0978	-16.7639	-0.0004814	0.00054765	0.01528994	3.692	1.717	394.775	265071	1474	147432	0.00004813	0.00054765	-0.01528994	3.158	1.704	383.646	223400	17339	43280	
25	4K4	4853	22.0978	-16.7639	-0.0002959	0.00049077	0.01811111	3.296	12.642	1019.964	519658	254377	266670	0.00002917	0.00049074	-0.01813502	0.022	12.620	960.037	310202	124960	350003	
26	4B8	34442	16.7639	-0.0002835	0.00057776	0.01618696	2.478	2.033	3.825	37.059	279607	100521	1349	0.00004253	0.00057775	-0.01618962	1.846	2.024	3.996	247829	20004	1233	
27	4B8	34442	16.7639	-0.0004571	0.00057873	0.01664649	7.104	11.192	130.097	47.626	11923	10521	45141	0.00005423	0.00057872	-0.01664927	2.100	11.143	117.624	220972	110041	48006	
28	4B8	34442	-16.7639	-0.0008071	0.00057998	0.01606513	64.704	13.910	1097.634	4608651	136946	377901	25801	0.00008075	0.00057997	-0.01606823	55.220	13.885	1175.822	508117	156730	23180	
29	4B8	34442	-16.7639	-0.0009794	0.00057998	0.01606513	12.393	1.659	401.670	722497	16327	142769	379051	0.00009854	0.00057997	-0.01606795	10.885	1.646	379.269	630721	16196	342802	
30	4AL	5207	34.442	-16.7639	-0.0006968	0.00051698	0.01185559	0.240	89.672	1455.556	27064	990434	701033	0.00006968	0.00051694	-0.01185921	0.000	101.967	1806.245	27064	112619	869697	
31	4B8	4454	42.367	16.7639	-0.0002798	0.00058860	0.01625358	0.111	117.104	10248.814	22692	1136059	3600575	0.00002783	0.00058860	-0.01625799	0.067	116.334	9349.721	13353	1128593	3283818	
32	4B8	5098	42.367	7.62	-0.0004211	0.00058978	0.01683284	0.222	140.942	1160.185	30161	1364585	393566	0.00004267	0.00058978	-0.01683741	0.165	140.012	1028.633	22026	1355582	348845	
33	4B8	5483	42.367	0	-0.0005403	0.00059058	0.01713991	0.845	4.404	72.795	51246	42578	24252	0.00005459	0.00059058	-0.01714457	0.387	4.381	63.721	40478	42463	21223	
34	4B8	5553	42.367	-16.7639	-0.0006975	0.00059135	0.01731349	0.569	60.887	699.897	49402	587933	230832	0.00006939	0.00059135	-0.01731821	0.472	60.527	609.477	40556	584453	201012	
35	4B8	5524	42.367	-28.1939	-0.0007975	0.00059213	0.01731349	12.993	134.723	1064.780	930280	1291933	3508387	0.00007975	0.00059213	-0.01733593	11.169	132.806	9301.485	793869	1280708	3063744	
36	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0008417	0.00059250	0.01343195	8.429	122.886	2105.617	888475	1029108	893575	0.00008466	0.00059250	-0.01343618	13.385	105.009	2391.895	1398168	883699	1073365	
37	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0009725	0.00059250	0.01193019	4.306	27.419	287.279	973586	370366	137501	0.00009725	0.00059250	-0.01193977	0.036	27.345	355.195	8183	937008	169953	
38	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0009725	0.00059250	0.01624238	2.602	19.964	1110.365	540366	192486	390358	0.00009725	0.00059250	-0.01624277	1.632	19.941	1016.419	332363	192883	357223	
39	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0009725	0.00059250	0.01730856	3.532	14.065	12.553	476709	135277	4216	0.00004267	0.00059250	-0.01730081	2.611	14.016	11.045	402835	134806	3708	
40	4B8	5524	42.367	0	-0.0005403	0.00059431	0.01734883	2.442	13.609	114.150	258087	129790	37601	0.00005460	0.00059431	-0.01734009	1.939	13.447	99.040	202835	129200	32614	
41	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0006990	0.00059482	0.01731066	6.748	21.267	193.974	584689	204158	63254	0.00006948	0.00059482	-0.01731598	5.587	21.151	167.480	479899	203046	54588	
42	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0007925	0.00059621	0.01733733	53.623	14.701	943.877	384676	140802	310871	0.00007948	0.00059621	-0.01734260	46.337	14.568	828.328	3314222	139693	272700	
43	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0008663	0.00060674	0.01417804	7.357	2.042	541.486	6065782	110680	21275	0.00008634	0.00060675	-0.01418388	90.392	2.037	568.767	67.858	9704468	101663	29335
44	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0009718	0.00060674	0.01557073	0.076	6.423	306.082	15885	60466	112247	0.00009718	0.00060675	-0.01557112	0.049	6.410	295.959	10075	60339	108161	
45	4B8	5524	42.367	-16.7639	-0.0009718	0.00060674	0.01663707	6.054	0.850	244.710	438165	7											

Tabla de iteraciones

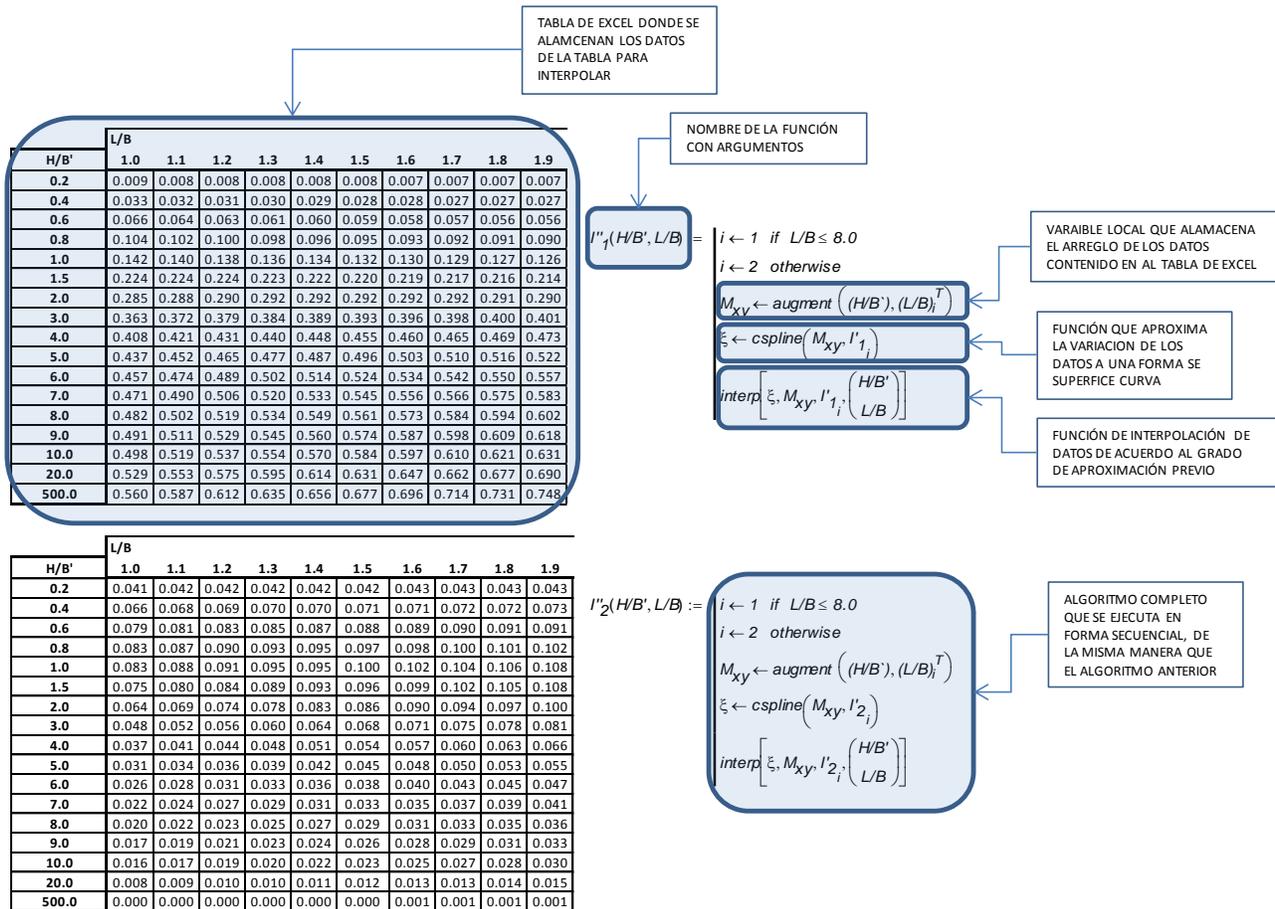
Iteración	ITERACIÓN 04												ITERACIÓN 05											
	Coordenadas en el MAT			Desplazamientos PLAMS (m)			Reacciones SAC (kN)			K resortes SAC (lb/in)			Desplazamientos PLAMS (m)			Reacciones SAC (kN)			K resortes SAC (lb/in)					
	X	Y	Z	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	Kx	Ky	Kz			
1	AAV	-3.88	28.1939	-0.00012293	0.00028596	-0.00723905	0.000	30.920	203.305	623	617422	1588091	-0.00012316	0.00028600	-0.00723620	0.000	56.537	3762.550	623	1128799	2969063			
2	AAU	-3.88	16.7639	-0.00002917	0.00051748	-0.01262121	0.009	3.269	148.566	1742	36077	67210	-0.00002937	0.00051745	-0.01261678	0.009	3.305	160.585	1718	36472	72678			
3	AAP	-3.88	3816	7.62	-0.00004322	0.00051825	-0.01352758	1.392	20.448	6.130	183927	225304	2.587	-0.00004363	0.00051822	-0.01352186	1.188	20.631	6.196	155424	227326	2617		
4	AAO	-3.88	0	-0.00005476	0.00051919	-0.01387808	35.056	7.687	1137.989	3.7646	84537	468226	-0.00005517	0.00052012	-0.01387224	28.491	7.740	1124.208	2.9546	85129	462751	29999		
5	AAW	-3.88	-16.7639	-0.00006684	0.00052015	-0.01374589	1.219	7.099	72.212	104126	77935	29998	-0.00006736	0.00052098	-0.01374011	0.956	7.135	72.186	81194	78331	29999			
6	4AM	-3.88	16.7639	-0.00008984	0.00052101	-0.01303762	0.067	14.101	115.663	4705	154543	90657	-0.00008940	0.00052115	-0.01303213	0.049	14.150	122.219	3432	155088	53552			
7	4AH	-3.88	28.1939	-0.0001145	0.00052118	-0.01193689	0.965	0.418	391.501	5937	458	18729	-0.00011484	0.00052115	-0.01193187	0.716	0.418	453.332	41319	4581	216948			
8	4AX	3.6576	16.7639	-0.0001145	0.00052108	-0.01180984	0.922	0.071	517.471	11092	768	29201	-0.00011484	0.00052106	-0.01180654	0.031	0.071	595.928	15011	768	288221			
9	4AW	3.6576	16.7639	-0.00004329	0.00052919	-0.01319261	0.040	20.871	347.971	7825	252505	159612	-0.00004377	0.00052917	-0.01318860	0.036	20.942	359.928	6861	225791	155835			
10	4AT	3.6576	7.62	-0.00004329	0.00052974	-0.01421124	0.645	97.532	775.236	85080	1051307	314494	-0.00004377	0.00052974	-0.01420688	0.547	97.563	746.380	71995	1051690	299991			
11	4AS	3.6576	7.62	-0.00005609	0.00053084	-0.01481920	10.502	102.176	11224.318	1088593	1099088	434965	-0.00005550	0.00053081	-0.01481464	8.429	101.282	10274.214	86703	1089520	3986633			
12	4AS	3.6576	-7.62	-0.00006685	0.00053209	-0.01448472	1.552	168.125	1324.978	132611	1894255	522331	-0.00006727	0.00053206	-0.01448033	1.214	167.253	1327.216	103085	1794983	495729			
13	4AQ	3.6576	-16.7639	-0.00008108	0.00053265	-0.01374132	1.281	7.090	301.807	90221	76015	125988	-0.00008151	0.00053260	-0.01374727	0.974	7.064	303.084	68246	75732	126166			
14	4AI	3.6576	-16.7639	-0.00008108	0.00053265	-0.01374132	1.281	7.090	301.807	90221	76015	125988	-0.00008151	0.00053260	-0.01374727	0.974	7.064	303.084	68246	75732	126166			
15	4AB	9.7535	28.1939	-0.0001154	0.00053858	-0.01262101	0.004	0.712	728.957	2202	7546	39843	-0.00011593	0.00053856	-0.01262600	0.048	1.815	580.858	26431	19453	261905			
16	4B2	9.7535	16.7639	-0.00002920	0.00053920	-0.01361455	0.058	29.149	271.226	11310	76255	182573	-0.00002960	0.00053918	-0.01361170	0.053	29.171	448.323	10298	76022	188073			
17	4B1	9.7535	7.62	-0.00005513	0.00054031	-0.01505139	24.624	88.12	2152.658	308693	308693	10298	-0.00005554	0.00054031	-0.01504807	19.096	78.020	253.927	272160	307328	99272			
18	4B0	9.7535	-7.62	-0.00006696	0.00054145	-0.01408662	4.634	12.081	142.1396	177411	17835	20064	-0.00006738	0.00054143	-0.01499545	3.132	11.979	177.726	265381	176326	68086			
19	4A4	9.7535	16.7639	-0.00008897	0.00054305	-0.01432142	1.935	4.484	461.972	136239	47334	183339	-0.00008919	0.00054305	-0.01432855	1.472	4.489	447.460	103166	19707	179933			
20	4A4	9.7535	-16.7639	-0.00008897	0.00054305	-0.01432142	1.935	4.484	461.972	136239	47334	183339	-0.00008919	0.00054305	-0.01432855	1.472	4.489	447.460	103166	19707	179933			
21	4A4	9.7535	-16.7639	-0.00008897	0.00054305	-0.01432142	1.935	4.484	461.972	136239	47334	183339	-0.00008919	0.00054305	-0.01432855	1.472	4.489	447.460	103166	19707	179933			
22	4B6	42.367	28.1939	-0.00011994	0.00055761	-0.01327382	0.040	3.212	832.151	19148	3288	37939	-0.00012033	0.00055760	-0.01327557	0.053	3.103	832.929	24714	3288	36866			
23	4B5	42.367	16.7639	-0.00002926	0.00055760	-0.01448597	2.500	1.944	32.124	23436	19906	194959	-0.00002966	0.00055760	-0.01448553	0.111	1.917	369.549	21406	19906	145955			
24	4B4	42.367	-16.7639	-0.00008122	0.00056103	-0.01528907	2.500	1.677	360.328	175754	17668	194575	-0.00008165	0.00056102	-0.01528869	1.899	1.641	324.889	12836	175754	121342			
25	4AK	48.53	28.1939	-0.00009903	0.00056104	-0.01460488	5.013	4.680	759.778	289074	47628	297055	-0.00009946	0.00056102	-0.01460972	3.710	4.582	719.513	21282	46633	281315			
26	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
27	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
28	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
29	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
30	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
31	4B8	34.442	16.7639	-0.00002883	0.00056972	-0.01161455	0.069	29.616	836.261	1762	344624	411137	-0.00002852	0.00056970	-0.01161598	0.004	33.918	979.988	891	394692	481739			
32	4AL	34.442	-7.62	-0.00005677	0.00057820	-0.01645172	1.708	10.920	102.754	178221	107846	35643	-0.00005719	0.00057820	-0.01645623	1.392	10.613	85.659	144777	104815	29709			
33	4AL	34.442	-16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
34	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
35	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
36	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
37	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
38	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
39	4AL	34.442	16.7639	-0.00008125	0.00057996	-0.01659662	4.724	15.555	58.503	40431	153484	20662	-0.00008168	0.00057996	-0.01659263	3.705	15.106	48.321	314913	148051	16568			
40	4BR	44.8052	28.1939	-0.00002449	0.00059320	-0.01197035	0.018	36.191	426.553	4149	405751	204044	-0.00002449	0.00059320	-0.01193987	0.013	40.683	486.484	3152	456144	232577			
41	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756.242	27071	181685	265658			
42	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756.242	27071	181685	265658			
43	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756.242	27071	181685	265658			
44	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756.242	27071	181685	265658			
45	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756.242	27071	181685	265658			
46	4B0	44.8052	16.7639	-0.00002850	0.00059320	-0.01625130	1.419	19.492	899.724	284321	187949	316132	-0.00002890	0.00059320	-0.01625491	1.370	18.843	756						

4 APÉNDICE III

Los algoritmos para interpolar los factores de influencia de Steinbrenner I_1 e I_2 (12) fueron desarrollados con el programa Mathcad versión 14, su propósito consiste en leer los datos de las tablas descritas por Bowles (12) e interpolar dados los parámetros siguientes:

- H = profundidad del estrato resistente.
- L = dimensión mayor de la cimentación.
- B = dimensión menor de la cimentación.

A continuación se reproduce los algoritmos con los comentarios pertinentes que explican su funcionamiento básico:



4 APÉNDICE IV

DESPLAZAMIENTOS EN EL MAT CON RESORTES NO LINEALES

Con el método iterativo [sección 3.1] se obtuvieron las rigideces de los resortes para modelar las características de suelo marino y se realizó el análisis de la respuesta de la estructura ante una cierta sollicitación crítica, dichos los resultados obtenidos solo tienen validez para dicha condición de carga, más allá de eso, si la magnitud de los esfuerzos inducidos rebasan los límites elásticos, se presenta una fluencia en el material y el suelo adquiere un comportamiento plástico, dicha condición no puede ser analizada considerando solamente resorte elásticos lineales. Por esta razón, en el análisis de interacción suelo-estructura, es recomendable considerar resortes modelados de modo que describan un comportamiento no lineal, con esta nueva característica se obtiene una respuesta más realista de la estructura bajo diferentes condiciones de carga, en particular cuando se llega a una falla en el suelo.

En este apéndice se presenta las modificaciones que deben considerarse en el modelo matemático tridimensional para realizar el análisis de respuesta con resortes no lineales. Los resortes que se utilizan son los mismos, es decir las rigideces que se obtuvieron por el método iterativo, la variante consiste de que a partir de las rigideces obtenidas, se calcula la fuerza de fluencia para definir las curvas elastoplásticas de los resortes, y luego se sustituyen en el modelo de SACS®. Finalmente se comparan los desplazamientos nuevos con los obtenidos con los resortes elásticos [Sección 3.1.1.2].

Para mostrar el cálculo de las rigideces de los resortes no lineales, a continuación se presenta un ejemplo del cálculo sobre uno de los resortes. Esta secuela de cálculo se aplica para cada uno de los demás resortes considerando una serie de factores de carga de fluencia, obteniéndose así una familia de curvas elastoplásticas para cada resorte.

Resorte

Nodos SACS_{mt} = "4AH" ➡ factor de carga de fluencia de: $f_p := 10\%$

Para calcular el desplazamiento máximo inelástico se considera conservar la misma área bajo la gráfica del resorte elástico (energía de deformación).

Datos iniciales del resorte

Rigidez del resorte

Desplazamiento

$$k_R := K_{\text{resortes}_{m,n}} = 187279.178 \cdot \frac{\text{lbf}}{\text{in}} \quad \rightarrow \quad \Delta_R := \Delta_{m,n} = 1.0593 \cdot \text{in}$$

Carga inducida

Carga de fluencia

$$P_R := k_R \cdot \Delta_R = 198.385 \cdot \text{kip} \quad \rightarrow \quad P_2 := f_p \cdot P_R = 19.838 \cdot \text{kip}$$

Energía de deformación total del resorte elástico:

$$U_{\text{tot}} := \frac{1}{2} \cdot k_R \cdot \Delta_R^2 = 11871.827 \text{ J}$$

Energía de deformación de la zona plástica del resorte:

$$U' := \left| U_{\text{tot}} - \frac{1}{2} \cdot k_R \cdot \left(\frac{f_p \cdot P_R}{k_R} \right)^2 \right| = 11753.1092 \text{ J}$$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_{inls_2} := \frac{f_p \cdot P_R}{k_R} = 0.10593 \cdot in$

Desplazamiento requerido para cubrir la energía de deformación de la parte plástica del resorte: $\Delta_{plst} := \sqrt{\frac{U'}{k_R}} = 0.74528361 \cdot in \rightarrow \Delta_{inls_3} := \Delta_{inls_2} + \Delta_{plst} = 0.85121361 \cdot in$

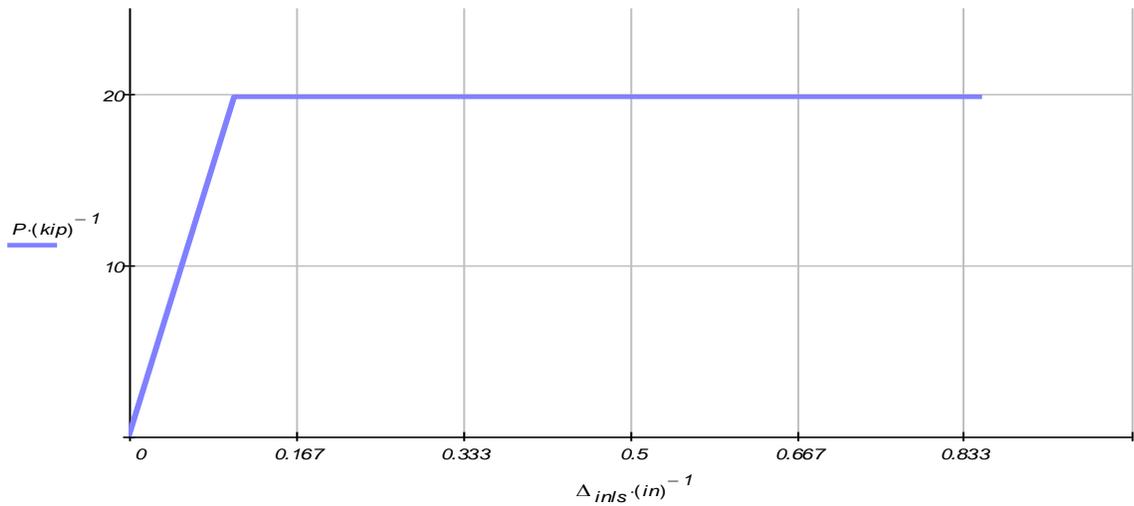


FIGURA IV-1 CURVA ELASTOPLÁSTICA UNO DE LOS RESORTES DEL MAT CON FUERZA DE FLUENCIA AL 10% DE LA REACCIÓN

Respuesta del Resorte en el Nudo 4AH

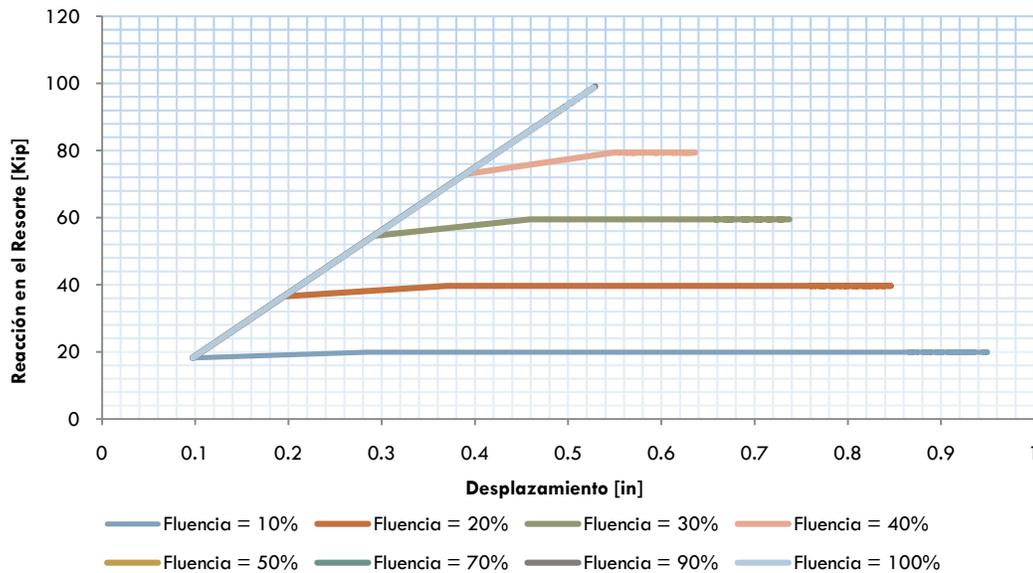


FIGURA IV-2 FAMILIA DE CURVAS ELASTOPLÁSTICAS DEL RESORTE 4AH

En la gráfica de la figura IV-2 se muestra la familia de curvas elastoplásticas del resorte de ejemplo, ésta se obtienen aplicando la secuela de cálculo anterior bajo diferentes factores de carga de fluencia. Con estos factores se pretende simular la respuesta del MAT bajo diferentes condiciones de falla del suelo, para luego comparar dichas respuestas con la que se obtuvo con los resortes elásticos lineales.

La nueva corrida del modelo del SACS® se realizó de la siguiente manera:

- Se aplicó la misma condición de carga crítica, esto es la misma combinación de cargas gravitacionales y ambientales que se determinaron en las secciones 2.1.1.1, 2.1.1.2 y 2.1.1.3.
- El análisis realizado es tipo Push-Over, donde se consideró primero la aplicación de las cargas gravitacionales y luego las cargas laterales (oleaje, corriente y viento), cada una de las fases de carga se aplicó en forma progresiva.

En la figura IV-3 se presenta la comparación de las relaciones obtenidas al dividir los desplazamientos de los resortes inelásticos entre los elásticos, cada curva representa diferentes factores de carga de fluencia.

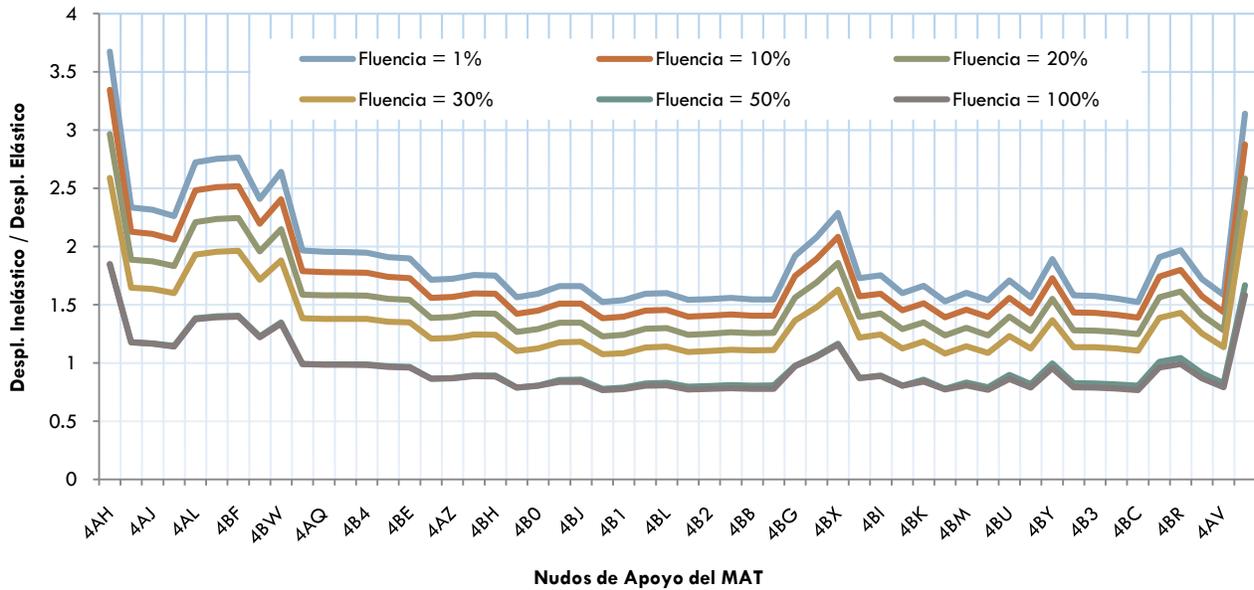


FIGURA IV-3 COMPARACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS RESORTES INELÁSTICOS ENTRE LOS ELÁSTICOS CON FLUENCIAS AL 1%, 10%, 20% 30%, 50% Y 100% RESPECTIVAMENTE.

En la gráfica se puede observar las diferencias en los desplazamientos en el MAT por los resortes inelásticos respecto al de los elásticos, esto es por la redistribución de reacciones en los nudos dado que su comportamiento es elastoplástico, por otro lado se puede apreciar que cuando se presenta una falla extraordinaria en el suelo marino, tal como se trata de representar con los factores de fluencia menores que 30%, los desplazamientos en el MAT pueden llegar a ser del orden de hasta 3.5 veces. Para valores de factores de carga de fluencias mayores al 50%, la relación de desplazamientos varía muy poco además de que son pocos los resortes que alcanzan a fluir.

Huber-Von Mises (20) propone una ecuación para el cálculo del esfuerzo de fluencia, la cual está en función de la resistencia al cortante de la muestra de suelo no drenada (S_u). La fuerza de fluencia para calcular las curvas elasto-plásticas de los resortes, se obtiene del producto del esfuerzo de fluencia por el área tributaria correspondiente.

$$\sigma_y(z) = 2 \cdot S_u(z) \rightarrow P_y = \sigma_y(z) \cdot A_{tribt}$$

Para la determinación de $S_u(z)$, de acuerdo a la tabla 2.1.2-1 [Sección 2.1.2.2], se considera el valor del primer estrato por ser el que se encuentra en contacto directo con el MAT. A continuación se realiza el cálculo sobre el mismo resorte de ejemplo.

Nodos $S_{ACS}_{m'}$ = "4AH" $\Rightarrow S_u := 14.71 \frac{kN}{m^2}$ factor del desplazamiento $f_{\Delta p} := 3$
 máximo de fluencia

Datos iniciales del resorte

Rigidez del resorte $k_R := K_{resortes}_{m',n} = 187279.178 \frac{lbf}{in}$ \Rightarrow Área tributaria $A_{tribt}_{m'} = 33459.607 in^2$ \Rightarrow Esfuerzo de fluencia $\sigma_y := 2 \cdot S_u = 4.26701 \frac{lbf}{in^2}$

Carga de fluencia $\Rightarrow P_2 := \sigma_y \cdot A_{tribt}_{m'} = 142.77 \text{ kip}$

Desplazamiento de fluencia: $\Delta_y := \frac{P_2}{k_R} = 0.762 in$ $\Rightarrow \Delta_{inls_2} := \Delta_y = 0.76235 in$

$\Rightarrow \Delta_{inls_3} := \Delta_{inls_2} + f_{\Delta p} \cdot \Delta_y = 3.04940436 in$

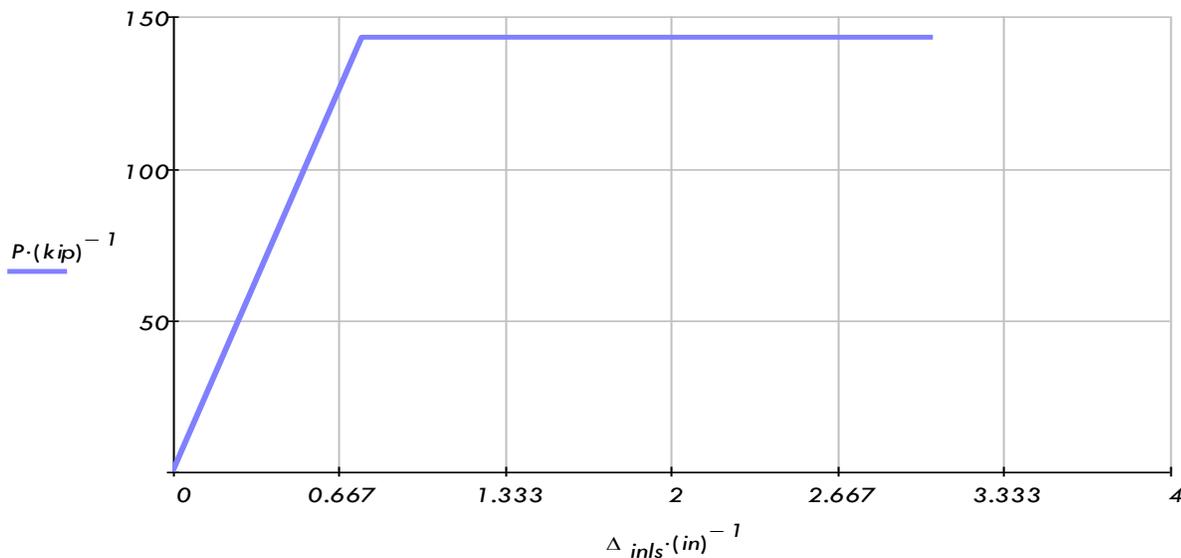


FIGURA IV-4 CURVA ELASTOPLÁSTICA UNO DE LOS RESORTES DEL MAT CON FUERZA DE FLUENCIA UTILIZANDO LA ECUACIÓN DE HUBER-VON MISES (20)

La figura IV-4 presenta la relación entre desplazamiento inelásticos respecto a los elásticos de los resortes no lineales calculados a partir de la ecuación de Huber-Von Mises (20), como se puede apreciar la curva describe el prácticamente mismo comportamiento que los factores de fluencia mayores al 50%.

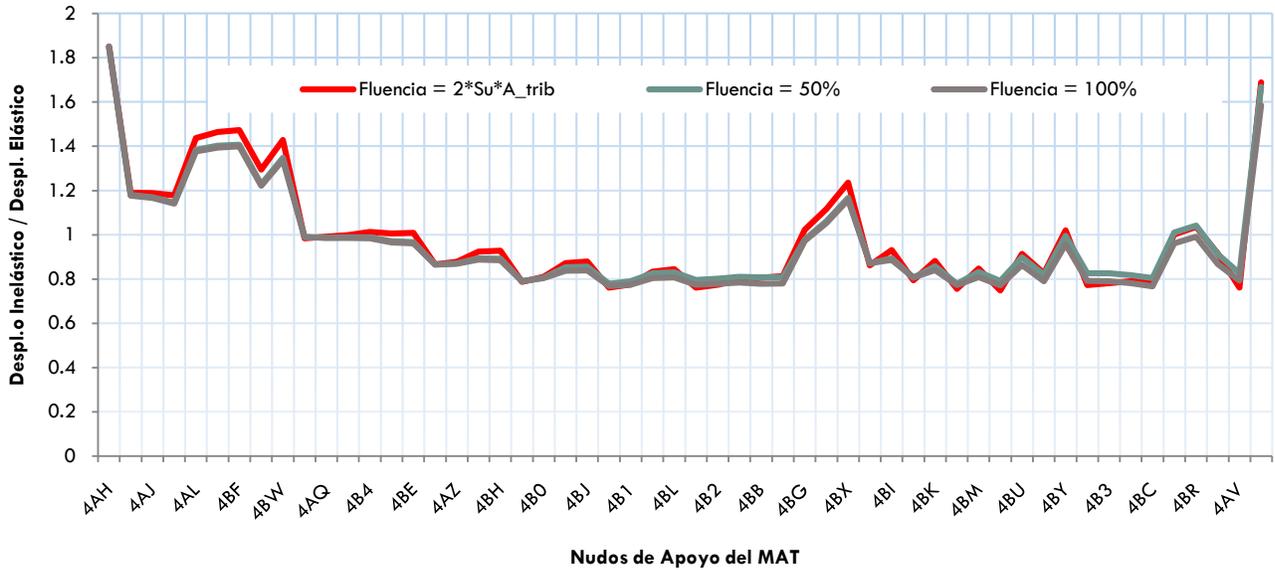


FIGURA IV-4 GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE DESPAZAMIENTOS LOS RESORTES INELÁSTICOS ENTRE LOS RESORTE ELÁSTICOS.

En la figura IV-5 grafican los esfuerzos de fluencia en los resortes para cada factor de carga de fluencia respecto a S_u . Estos esfuerzos se obtienen de dividir la fuerza de fluencia entre el área tributaria correspondiente de cada resorte. En la gráfica de la figura IV-6 se muestra que el 40% de los resortes alcanza esfuerzos iguales o mayores que $2 \cdot S_u(z)$, es decir que fluyen.

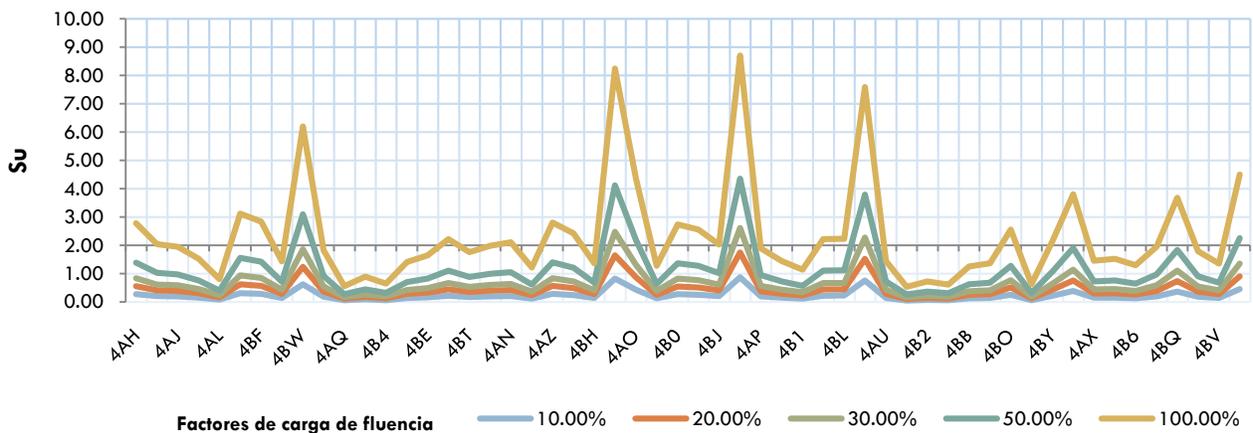


FIGURA IV-5 ESFUERZOS DE FLUENCIA EN LOS RESORTES RESPECTOA S_u



FIGURA IV-6 HISTOGRAMA CON LA DISTRIBUCION DE DE LOS RESORTES QUE ALCANZAN LA FLUENCIA

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis con resortes no lineales, se tiene que al menos que se presente una condición de falla extraordinaria del suelo, tal como lo indican los resultados obtenidos al aplicar los factores de fluencia menores que el 30%, el sistema suelo-estructura presenta un comportamiento adecuado ante las condiciones ambientales de tormenta extrema del sitio de obra.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Bennet & Associates, L.L.C.** "Jack Up Units a Technical Primer for the Offshore Industry Professional". s.l. : Offshore Technology Development, Octubre 2005.
2. **Hercules Drilling Company.** "Hercules Drilling 30". s.l. : American Bureau of Shipping as a Maltese Cross A-1 Jack Up Self-Elevating Drilling Unit., Enero 2005.
3. **Young A. G.** "Foundation Performance of Mat-Supported Jack-Up Rigs in Soft Clays". s.l. : Offshore Technology Conference (OTC), 1981.
4. **MSL Engineering Ltd.** "Sensitivity of Jack-Up Reliability to Wave-in-Deck Calculation". s.l. : Health and Safety Executive, 2003. Research Report 019.
5. **Hedrick W. P.** "Jackup Operations: New Operational Recommended Practices". s.l. : Offshore Technology Conference (OTC), Mayo 2007. 18980.
6. **Hirst T. J. , Lehigh U., Steele J. E., Remy N. D., Scales R. E.** "Performance of Mat Supported Jack-Up Drilling Rigs". s.l. : Offshore Technology Conference (OTC), 1976.
7. **Augusti G., Baratta A., Casciati F.** "Probabilistic Methods in Structural Engineering". s.l. : Spon Press, 1984. 9780412222306.
8. **American Petroleum Institute (API).** "Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design.". s.l. : American Petroleum Institute (API), Edición 21, Diciembre 2000.
9. **DNV-OS-C201, Offshore Standard.** "Structural Design of Offshore Units (WSD Method)". s.l. : Det Norske Veritas (DNV), Octubre 2008.
10. **Hsu, T.** "Applied Offshore Structural Engineering". s.l. : Gulf Publishing Company, 1984.
11. **Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y Organismos Subsidiarios.** "Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche". Diciembre 2000. Vols. NRF-003-PEMEX-2000.
12. **Bowles, J. E.** "Foundation Analysis and Design". s.l. : McGraw-Hill, Inc., 1988. 0-07-006776-7.
13. **Haritos, N.** "Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures— An Overview". s.l. : EJSE International - The University of Melbourne, Australia, 2007.
14. **Chakrabarti, S.** "Handbook of Offshore Engineering". s.l. : Elsevier Ocean Engineering Series, 2005.
15. **SAFE V-8.1.** "Computers and Structures, Inc.". Berkeley, California : s.n., 2004.
16. **Hemsley, J. A.** "Design Applications of Raft Foundations". s.l. : J.A. Hemsley, Octubre 2000.
17. **Soriano, A.** "Interacción Suelo-Estructura. Modificación del Movimiento". *Física de la Tierra*. Madrid : Universidad Complutense de Madrid, 1989. 1 (287-308).
18. **Zeevaert, L.** "Interacción Suelo - Estructura, Estática y Sísmica de Cimentaciones Monolíticas Superficiales". *VI Seminario de Mecánica de Suelos Interacción Suelo-Estructura*. Caracas, Venezuela : s.n., Septiembre 1980.

19. **PLAXIS 3D Foundation Scientific Manual.** "CONSOFT Technologies Sdn. Bhd". 2004. Version 1.1.
20. **Sánchez, M. J.** "Proposta de Metodologia para Critério de Projeto de Fundações de Estacas de Sucção para TLP", Tese de Doutorado. s.l. : COPPE-UFRJ. Programa de Engenharia Civil., 2005.
21. **Spinelli P., Augusti G.** "Engineering Structures : Wind-induced deflections of freestanding". s.l. : MJ Glanville, 1997.
22. **SACS® Structural Analysis.** "Engineering Dynamics, INC.". Kenner, Louisiana : s.n., 2005.
23. **Kellezi L., Kudsk G., Hofstede H.** "Jack Up Rig Foundation Design Applying 3D Finite Element Structure - Soil - Interaction Modeling". s.l. : IHS BRE Press, Junio 2008.