



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA CON BASE EN UN MODELO DE CONTACTO UNILATERAL

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Felipe de Jesús Adrián Brito

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Dr. Jaime Moises Horta Rangel
Presidente

Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario

Firma

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo contreras
Vocal

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez
González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia
Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, por ser mi mentor, guía, ya que con su apoyo fue posible terminar este proyecto, además por darme la oportunidad y confianza de trabajar bajo su dirección.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea por brindarme su apoyo y conocimientos en el área de suelos.

A todo el profesorado del área de Estructuras de la Universidad Autónoma de Querétaro por haberme transmitido parte de sus conocimientos y llevar a cabo mi formación académica.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de forjarme como profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su invaluable ayuda, ya que fue pieza clave para el desarrollo profesional, académico y personal para lograr la culminación de este proyecto.

RESUMEN

Los efectos de la interacción suelo-estructura han probado ser de gran importancia como para ser ignorados debido a la presencia de un material heterogéneo como lo es el suelo, el cual debido al cambio de volumen generado al ser humedecido, suelo expansivo, pone en peligro a las estructuras cimentadas sobre él. Existen diversos modelos, donde se puede observar la modelación del suelo y la estructura por separado o conjuntamente, así como la consideración de acciones dinámicas o simplemente estáticas y diversos entornos de modelación como son macro elementos, elemento finito, elemento frontera o una combinación de los últimos dos.

Este trabajo presenta la interacción suelo-estructura existente entre un losa de cimentación y un suelo expansivo, desde la perspectiva de problemas de contacto entre dos cuerpos (suelo y cimentación), realizando un modelo en el software computacional ANSYS mediante el uso de elementos finitos donde se utiliza el clásico modelo Winkler para el suelo y se realiza la comparación de los esfuerzos en los elementos ante la presencia de expansiones en la cimentación.

Palabras claves: interacción suelo-estructura, modelado, ANSYS, suelo expansivo

SUMMARY

The effects of the soil-structure interaction have proven to be of great importance to be ignored due to the presence of a heterogeneous material such as the soil, which due to the change in volume generated by being moistened, expansive soil, endangers the structures built on it. There are several models, where you can see the modeling of the soil and the structure separately or jointly, as well as the consideration of dynamic or simply static actions and diverse modeling environments such as macro elements, finite element, border element or a combination of the last two.

This work presents the soil-structure interaction between a foundation slab and an expansive soil, from the perspective of contact problems between two bodies (soil and foundation), making a model in the ANSYS computer software by using finite elements where the classic Winkler model is used for the ground and the comparison of the efforts in the elements is made in the presence of expansions in the foundation.

Key words: soil-structure interaction, modelling, ANSYS, expansive soil

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
SUMMARY	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
INTRODUCCIÓN	9
1. ANTECEDENTES DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	12
1.1. Modelado de la interacción suelo-estructura	12
1.2. La interacción suelo-estructura en diversas áreas	13
1.3. Métodos de cálculo de interacción suelo-estructura	13
2. SUELOS EXPANSIVOS	16
2.1. Definiciones de suelos expansivos y presión de expansión	16
2.2. Predicción de expansión	16
2.3. Estado de esfuerzos	16
2.4. Las relaciones constitutivas	17
2.5. Los índices de succión	18
2.6. Succión del suelo	19
2.7. Consolidación-expansión, análisis de volumen constante y procedimientos edométricos	21
2.8. Procedimientos empíricos	24
2.9. Propiedades de suelos expansivos en Querétaro	26
2.10. Coeficiente de determinación	26
3. PROBLEMAS DE CONTACTO	29
3.1. Antecedentes de la problemática de contacto	29
3.2. Esfuerzos de contacto	30
3.3. Tipos de contacto	30
3.4. Clasificación del contacto según la rigidez del material	32

3.5. Elementos de contacto	32
3.6. Métodos de solución para problemas de contacto	33
4. SOFTWARE ANSYS	35
4.1. Método de elementos finitos	35
4.2. Conceptos generales del ANSYS	35
4.3. Familias de elementos en ANSYS	36
5. METODOLOGÍA.....	39
5.1. Definición de parámetros iniciales	41
5.2. Escritura del código APDL.....	41
5.2.1. Modelación de estructura de concreto	41
5.2.2. Modelación de la cimentación	45
5.2.3. Solución de modelo	46
5.2.4. Aplicación de desplazamiento	46
5.2.5. Análisis de esfuerzos en las zonas elegidas	47
5.3. Recopilación de los resultados del análisis.	48
6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	50
6.1. Presentación de resultados condensados	50
6.2. Discusión de resultados.....	54
6.3. Conclusiones.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Superficie constitutiva tridimensional Idealizada para suelos no saturados en términos de relación de vacíos y variables de estado de esfuerzos (Nelson y Miller, 1992).	18
Figura 2.2 Desarrollo de la presión osmótica a través de una membrana semipermeable (Nelson y Miller, 1992).....	19
Figura 2.3 Interfase aire-agua en el suelo (Nelson y Miller, 1992).	20
Figura 2.4 Gráfico típico de resultados de pruebas de consolidación-expansión (Nelson y Miller, 1992).....	22
Figura 2.5 Resultados típicos de volumen constante (Porter y Nelson, 1980).	23
Figura 2.6 Relaciones para uso en el método de predicción de expansión empírica de Van der Merwe: (a) potencial de expansión y (b) factor de reducción (Van der Merwe, 1964).....	24
Figura 2.7 Graficas para los diferentes esfuerzos verticales a una profundidad de 1m, 1.5 m y 2m (Ayala, 2008).....	26
Figura 2.8 Grafica esfuerzo contra % expansión con el mejor coeficiente de determinación (Ayala, 2008).....	27
Figura 3.1 Perforación en un semiespacio por un cuerpo rígido (Zisis et al., 2014).	31
Figura 3.2 Interacción cuando el contacto que se establece es rígido-flexible y superficie-superficie (ANSYS, 2013).....	32
Figura 4.1 Elemento BEAM188 (ANSYS, 2014).	37
Figura 4.2 Elemento SHELL63 (ANSYS, 2014).....	37
Figura 5.1 Diagrama de flujo de ejecución general del código APDL.....	39
Figura 5.2 Macro de ingreso de variables iniciales	42
Figura 5.3 Macro de ingreso de cargas vivas y muertas.....	42
Figura 5.4 Macro de ingreso de cargas debidas a muros	42
Figura 5.5 Macro de ingreso de propiedades de columnas	43
Figura 5.6 Macro de ingreso de dimensiones de las secciones seleccionadas.....	43
Figura 5.7 Macro de ingresos de propiedades y dimensiones de las losas.....	44
Figura 5.8 Visualización de elementos trabe y columna	44
Figura 5.9 Visualización de elemento losa.....	45

Figura 5.10 Macro de ingreso para variables de la losa de cimentación y el suelo	45
Figura 5.11 Visualización de elementos link que simulan el suelo	46
Figura 5.12 Esfuerzos sin considerar expansión	46
Figura 5.13 Ploteo de esfuerzos normales en columnas	47
Figura 6.1 Primera iteración de expansión	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de PE (Van der Merwe, 1964).....	25
Tabla 2.2 Predicción del porcentaje de expansión (Schneider y Poor, 1974)	25
Tabla 5.1 Datos iniciales considerados en la modelación.....	41
Tabla 6.1 Comparación de esfuerzos de contacto primera iteración.....	50
Tabla 6.2 Comparación de Fuerzas normales primera iteración.....	51
Tabla 6.3 Comparación de momentos primera iteración.....	51
Tabla 6.4 Comparación de esfuerzos de contacto segunda iteración.....	52
Tabla 6.5 Comparación de Fuerzas normales segunda iteración	53
Tabla 6.6 Comparación de momentos segunda iteración	54

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, nuevas metodologías en el ámbito de la ingeniería estructural se han ido desarrollando; por otra parte muchas de estas han sido utilizadas como fundamento para la optimización de las mismas, así como en la implementación hacia problemas particulares. Un claro ejemplo de lo antes mencionado es la consideración de la interacción suelo-estructura, comúnmente denominada SSI (Soil-Structure Interaction), en el diseño estructural. Esto, debido al impacto que el suelo puede llegar a generar en los elementos que se encuentran en contacto directo o indirecto con el mismo, o bien a la estructura como conjunto.

Desde 1990 se han hecho grandes esfuerzos para sustituir los métodos clásicos de diseño por nuevos métodos más optimizados que puedan tomar en cuenta características más detalladas o bien utilizar nuevas investigaciones (Nakhaei y Ghannad, 2008). Resulta de interés la consideración del suelo al momento del análisis debido a que el suelo es un material heterogéneo que posee diversas propiedades físicas y químicas dependiendo de su proceso de formación y su lugar de residencia. Se ha confirmado experimentalmente que el suelo es propenso a cambiar sus propiedades cuando está sujeto a cierto historial de cargas (Kuklík, 2011).

Dicho material en muchas ecuaciones resulta en expansiones y reducciones de volumen por lo que, al ser utilizado como base de las estructuras que hoy en día conocemos, tiende a generar asentamientos diferenciales en las edificaciones.

Hipótesis

La consideración de los efectos de interacción suelo-estructura resulta de impacto en la distribución de esfuerzos de una losa de cimentación y los elementos de la estructura aledaños.

Objetivo General

Generar un modelo, mediante el uso de un software en particular (ANSYS), para la representación de los efectos que un suelo expansivo genera sobre una losa de cimentación y los elementos a su alrededor.

Objetivos Específicos

- Modelar estructuras regulares a base de vigas y columnas de diversos niveles con sus cargas gravitacionales pertinentes, dependiente de su geometría y propiedad de sus materiales.
- Modelar una estructura de cimentación de tipo losa, los efectos de un suelo expansivo y verificar la repercusión en los diversos escenarios de la estructura sobre ella.
- Generar una tabla comparativa para los resultados obtenidos.

Justificación

Desde 1990 se han hecho grandes esfuerzos para sustituir los métodos clásicos de diseño por nuevos métodos más optimizados que puedan tomar en cuenta características más detalladas o bien utilizar nuevas investigaciones (Nakhaei y Ghannad, 2008). Resulta de interés la consideración del suelo al momento del análisis debido a que el suelo es un material heterogéneo que posee diversas propiedades físicas y químicas dependiendo de su proceso de formación y su lugar de residencia.

Se ha confirmado experimentalmente que el suelo es propenso a cambiar sus propiedades cuando está sujeto a cierto historial de cargas (Kuklík, 2011). Dicho material en muchas ecuaciones resulta en expansiones y reducciones de volumen por lo que, al ser utilizado como base de las estructuras que hoy en día conocemos, tiende a generar asentamientos diferenciales en las edificaciones. Esto puede provocar fallas estructurales de menos o mayor grado en las estructuras de cimentación así como en estructuras superiores. De aquí la importancia de su consideración así como de la interacción que se genera al entrar en contacto la superficie de la estructura/cimiento con el suelo.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

1. ANTECEDENTES DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

1.1. Modelado de la interacción suelo-estructura

Se han realizado diversos modelados de SSI a lo largo del tiempo debido a las repercusiones que el suelo provoca sobre una estructura. Kocak y Mengi (2000) proponen un modelo simple tridimensional de SSI donde primero se desarrolla un modelo para un medio de suelo estratificado. En el modelo, el medio es dividido en capas delgadas, cada una representada por un modelo paramétrico. Desarrollan un programa para el caso estático solamente pero encontraron que el modelo propuesto puede ser usado de manera confiable en SSI dinámica, y adaptado a interacción entre zapatas.

Nakhaei y Ghannad (2008), investigaron acerca de los efectos que la interacción suelo-estructura tiene sobre los índices de daño de una estructura supuesta bajo cargas sísmicas. Tomaron dos parámetros clave: la rigidez y una relación de aspecto de la estructura, así como ciertas consideraciones entre las cuales destacan, el modelado mediante el concepto de Modelo de Cono, un sistema sujeto a tres diferentes movimientos sísmicos de suelo como movimientos representativos y al análisis realizado en dominio tiempo. Obtuvieron como resultados, el incremento sustancial de los índices de daño en una estructura sustentada sobre suelos blandos y periodos cortos de vibración.

Grange *et al.* (2009), mediante el uso de macro-elementos simularon la interacción dinámica suelo-estructura sobre edificaciones con cimentaciones poco profundas (superficiales) ante cargas dinámicas (sismo), tomando en cuenta la plasticidad del suelo, profundidad de la cimentación y amortiguamiento emitido. En su trabajo propusieron una cimentación infinitamente rígida y un movimiento completamente descrito por variables globales (fuerzas y desplazamientos), generando un modelo mediante el uso de elemento finito en FEDEASLabs (una herramienta del software computacional de MATLAB).

Galvín y Romero (2014), desarrollaron una herramienta en el entorno MATLAB para estudiar la interacción dinámica suelo-estructura, la cual permitió calcular las fuerzas-vibraciones estructurales así como las respuestas sísmicas mediante la formulación de un acoplamiento de elemento finito en dominio tiempo. Dicha herramienta denominada SSIFiBo (Soil-Structure Interaction with Finit Boundary Elements) es un compendio de funciones de MATLAB basadas en

un modelo acoplado tridimensional BEM-FEM (Boundary Element Method y Finite Element Method) formulado en dominio tiempo, donde el comportamiento del suelo es representado por el BEM, mientras que las estructuras son modeladas con el FEM y presentando la problemática de propagación de ondas de dos tipos: un campo de ondas incidentes y un campo de ondas dispersas.

Lu *et al.*, (2016) presentaron un modelo como diseño preliminar de una herramienta para análisis de interacción dinámica suelo-estructura. El propósito del modelo era capturar la respuesta no lineal carga-desplazamiento de cimentaciones superficiales durante sismos fuertes o eventos donde la capacidad de carga de la cimentación fuera completamente alcanzada.

1.2. La interacción suelo-estructura en diversas áreas

La interacción suelo-estructura se correlaciona con diversas áreas, si es cierto que juega un papel importante en grandes edificaciones. También es considerada en otros ámbitos. Damgaard *et al.*, (2014), abundaron acerca de la respuesta dinámica de una estructura tipo turbina en un rango de frecuencia cercano a la frecuencia de excitación, relacionada a cargas armónicas ambientales y paramétricas y los efectos que la estructura de cimiento y el subsuelo tenían sobre la turbina.

Li *et al.*, (2016) realizaron un estudio acerca de las garras de oso (herramientas de corte de suelo). Desarrollaron un modelo usando el método de elemento discreto (DEM) para simular la interacción entre las garras y el suelo.

1.3. Métodos de cálculo de interacción suelo-estructura

Los métodos comúnmente usados para la interacción suelo-estructura se pueden dividir en tres clases distintas: métodos completos de FE (Finite Element), métodos acoplados FE-BE (Finite Element – Boundary Element) y métodos regulados.

Los métodos completos de FE utilizan el método de elemento finito para el mallado de nodos del suelo y la estructura. Este se acopla a las diferentes características del suelo. Los suelos sin límites son representados por elementos similares en las fronteras del mallado. La solución del método es aplicado en un espacio completamente físico y usualmente en dominio tiempo. La transformada de Fourier es entonces usada para obtener las respuestas harmónicas. Entre las ventajas del método se encuentran que puede tratar con comportamientos no lineales entre el suelo o la estructura. Las principales desventaja son la dificultad para determinar el

tamaño del dominio para ser mallado, el alto costo computacional y la dificultad para representar amortiguamiento modal o histéretico (Lee *et al.*, 2005).

Los métodos acoplados realizan un acoplamiento del método de elemento finito (FE) y elemento frontera (BE). Esto requiere un mallado de las estructuras y su interface con el suelo cuando las funciones de Green de un medio estratificado elástico son usadas en el método de elemento frontera. La respuesta dinámica del suelo es condensada en una matriz compleja de la interface suelo-estructura. La solución del método usa un conjunto de coordenadas generalizadas sobre los modos de la interface en el dominio de frecuencias.

Las ventajas de este método son la reducción de tamaño en el dominio del mallado, un costo de modelado relativamente bajo, la versatilidad para definir modos de interfaces para el análisis modal y su capacidad para representar el amortiguamiento modal o histéretico. La principal desventaja es la incapacidad de tomar en cuenta fenómenos no lineales (Von y Firuziaan, 2000).

Los métodos regulados son métodos simplificados, los cuales consideran resortes que aportan las respuestas del suelo, para ser aplicados debajo de la cimentación. Como lo es el modelo de Winkler (Gerolymos y Gazetas, 2006). La principal ventaja es la simplicidad aun cuando permiten modelos de elemento finito complejos de la estructura junto con todos los tipos de comportamiento no lineal del suelo mediante resortes. Esto permite el estudio de la cimentación. Una deficiencia es la incapacidad para considerar la dependencia de frecuencias de la cimentación donde los resortes deben tener constantes de rigidez características con respecto a la frecuencia (Nakamura *et al.*, 2007).

Los métodos pueden ser combinados de diferentes maneras. El método completo de FE puede ser usado un análisis semi estático para proveer una estimación de los valores de las constantes de rigidez características usadas en el método regulatorio. Esos valores pueden ser también determinados en relación a la dependencia de frecuencias provista por el método acoplado. De manera inversa el método regulado puede ser usado para calcular una base de modos de la interface para el método acoplado (Pitilakis *et al.*, 2008).

CAPITULO 2

SUELOS

EXPANSIVOS

2. SUELOS EXPANSIVOS

2.1. Definiciones de suelos expansivos y presión de expansión

Un suelo expansivo es un suelo arcilloso que tiene la habilidad de cambiar su volumen cuando el contenido del agua del suelo cambia. El suelo se contraerá cuando el contenido de agua del suelo disminuya y el suelo se expandirá cuando el contenido de agua se incremente. La presión de expansión ha sido definida, en general, como una carga vertical aplicada en pruebas en edómetro, bajo la cual al hidratar al suelo, originalmente no saturado, no se presenta expansión alguna (Ayala, 2008).

2.2. Predicción de expansión

Existen varios procedimientos de laboratorio para la predicción de los cambios de volumen o presiones de expansión para este tipo de suelos. El estado de esfuerzos se debe definir usando las variables de estado apropiadas y se requieren dos variables para definir completamente el estado de esfuerzos en los suelos no saturados. Las variables más comúnmente utilizadas son una de las dos variables de estado eficaz del esfuerzo $\sigma - u_a$ o $\sigma - u_w$ y la variable de estado de esfuerzo de succión matricial $u_a - u_w$ (Fredlund y Morgenstern, 1977).

Los cambios de volumen en suelos expansivos son causados por las variaciones de humedad que causan rangos en la variable de estado de esfuerzo de succión matricial $u_a - u_w$. Los métodos de predicción se pueden separar en tres grandes categorías. Estos son los métodos teóricos, métodos semiempíricos, y métodos empíricos.

El estado de la práctica sigue incluyendo procedimientos empíricos para predecir expansión en suelos expansivos aunque tienen validez solamente si se utilizan dentro de los límites del tipo de suelo, el medio ambiente, y la aplicación de ingeniería para los que fueron creados (Nelson y Miller, 1992).

2.3. Estado de esfuerzos

Un enfoque a macro-escala del estudio de arcillas expansivas se ha aplicado en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería civil. La mecánica de suelos clásica, usa las relaciones

constitutivas elásticas (esfuerzo-deformación) y los principios de la mecánica de medios continuos para describir el comportamiento expansivo del suelo.

En suelos no saturados, la presión del fluido de poro tiene al menos dos componentes, la presión de poro agua (u_w) y la presión de poro de aire u_a , en general u_a y u_w no son iguales. La diferencia de presión se equilibra en la interfase aire-agua por fuerzas de tensión superficial. Esta diferencia es conocida como presión capilar o matriz de succión μ :

$$\mu = u_a - u_w \quad (2.1)$$

Conforme el valor de u_w se aproxima a u_a la succión decrece y el grado de saturación aumenta. La succión nunca será negativa y en casos de suelos saturados y $u_w > 0$ el valor de μ será cero. La succión del suelo puede verse como un esfuerzo de tensión interno actuando sobre la superficie de las partículas del suelo.

Los primeros intentos de derivar una ecuación de esfuerzo efectivo para suelos no saturados consideraron el equilibrio de fuerzas en los contactos entre partículas. La succión del suelo es vista como un esfuerzo de tensión interna que actúa sobre una parte de la superficie de las partículas del suelo (Fredlund y Morgenstern, 1977).

2.4. Las relaciones constitutivas

Los cambios de volumen de un suelo no saturado pueden o no estar relacionados con las variables de estado de esfuerzos. Debido a que las variables de estado de esfuerzos son independientes, las relaciones de esfuerzo-deformación deben ser representados en gráficas de tres ejes, como la que se muestra para la relación de vacío en la Figura 2.1. Las superficies constitutivas pueden ser linealizadas por la representación de los parámetros de volumen de peso (relación de vacíos, el contenido de agua o de saturación) contra el logaritmo de las variables de estado de esfuerzos. La superficie constitutiva en la Figura 2.1 puede ser representada por una ecuación como sigue (Fredlund, 1979):

$$\Delta e = C_t \cdot \Delta \cdot \log \sigma - u_a + C_m \cdot \log(u_a - u_w) \quad (2.2)$$

Donde e = Relación de vacíos

C_t = Índice de compresión

$(\sigma - u_a)$ = Variable de estado de esfuerzo efectivo saturado

C_m = Índice de succión en términos de relación de vacíos y la succión matricial

$(u_a - u_w)$ = Succión matricial

La relación constitutiva para la fase de agua se puede representar de manera similar:

$$\Delta w = D_t \cdot \Delta \cdot \log(\sigma - u_a) + D_m \cdot \log(u_a - u_w) \quad (2.3)$$

Donde D_t = Índice de contenido de agua con respecto a la variable de estado de esfuerzo efectivo saturado.

D_m = Índice de contenido de agua con respecto a la succión matricial.

El índice de contenido de agua con respecto a la succión matricial es más familiarmente conocido como la característica de humedad (Nelson y Miller, 1992).

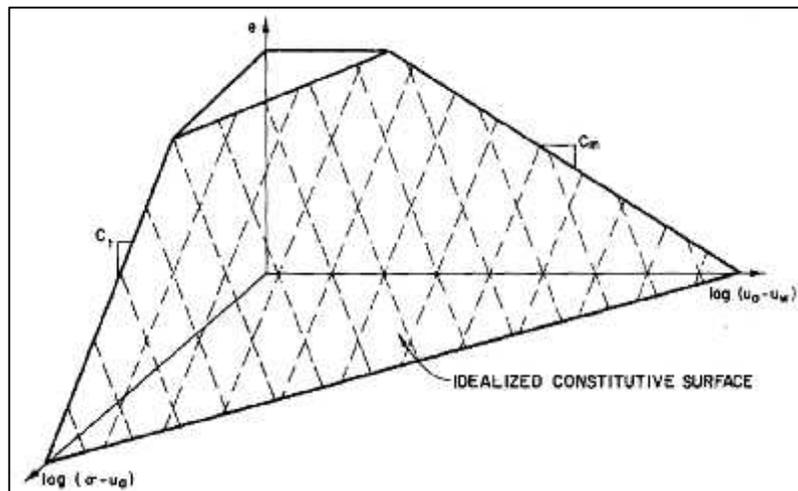


Figura 2.1 Superficie constitutiva tridimensional Idealizada para suelos no saturados en términos de relación de vacíos y variables de estado de esfuerzos (Nelson y Miller, 1992).

2.5. Los índices de succión

Los módulos del suelo que relacionan los cambios de succión con los cambios de volumen se basan en la manera en la que se representa el esfuerzo y los diferentes componentes de succión utilizados para definir las condiciones iniciales y finales de esfuerzo.

Las pruebas de succión bajo carga aplicada son simples y no requieren equipo especializado. La mayoría de los suelos exhiben succiones de campo entre aproximadamente 15 y 1500 psi (100 y 10000 kPa) (Nelson y Miller, 1992).

2.6. Succión del suelo

La succión total en un suelo consta de dos partes, la succión osmótica y la succión matricial.

$$h = H(h_o, h_c) \quad (2.4)$$

Donde h_o es la succión osmótica y h_c la succión matricial.

La succión osmótica en la arcilla resulta de las fuerzas ejercidas sobre las moléculas de agua como resultado de la actividad química del suelo. La Figura 2.2 ilustra la naturaleza de succión osmótica. En dicha figura, el agua se muestra en contacto con una solución de sal a través de una membrana semipermeable, que es una membrana permeable a moléculas de agua pero no al soluto. La concentración de la solución provoca una atracción a las moléculas de agua y, por tanto, una tendencia de que el flujo de agua en la solución pase a través de la membrana semipermeable.

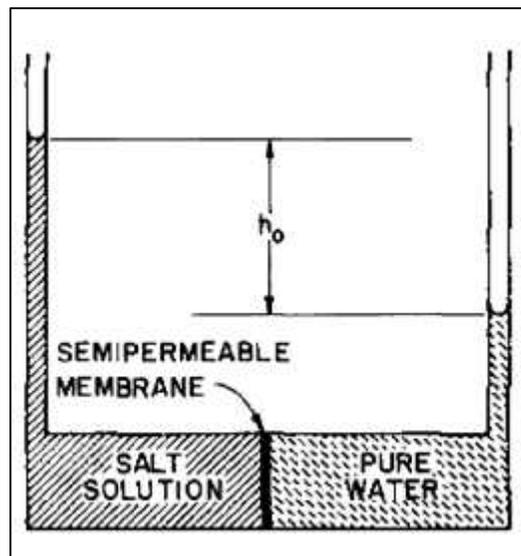


Figura 2.2 Desarrollo de la presión osmótica a través de una membrana semipermeable (Nelson y Miller, 1992).

El equilibrio se alcanza cuando la cabeza de presión hidrostática (h_o) de la solución llega a ser suficientemente grande como para equilibrar las fuerzas osmóticas que tienden a conducir el agua en la solución. Este diferencial de presión es la presión osmótica, Ω , dado por:

$$\Omega = \rho_s \cdot g \cdot h_o = RT[C_S] \quad (2.5)$$

Donde Ω = Presión osmótica

ρ_s = Densidad de masa del soluto

g = Aceleración de la gravedad

h_o = Cabeza de presión osmótica

R = Contante universal de los gases

T = Temperatura absoluta

$[C_S]$ = Concentracion molar del soluto

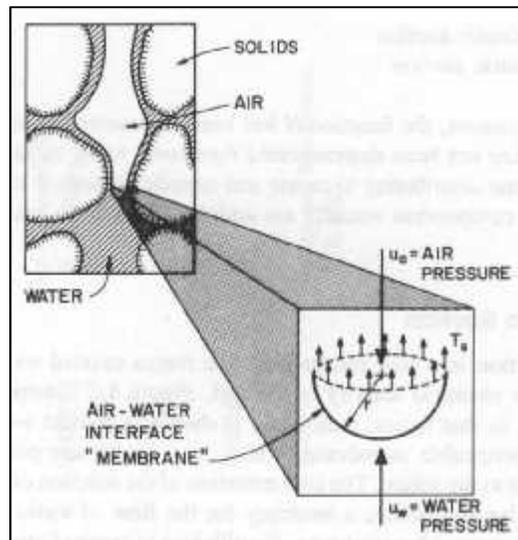


Figura 2.3 Interfase aire-agua en el suelo (Nelson y Miller, 1992).

La Figura 2.3 muestra la interfaz aire-agua existente en un suelo no saturado. El diagrama de cuerpo libre de esta membrana se muestra en la vista ampliada. El término $(u_a - u_w)$ se denomina succión matricial, además de las fuerzas de tensión superficial también existen fuerzas de adsorción ejercidas sobre las moléculas de agua por la superficie de las partículas del suelo. Estas fuerzas de adsorción toman en cuenta el hecho de que la curvatura de la película de agua a lo largo de la cara de las partículas es en realidad en la dirección opuesta a la de la película entre las partículas individuales, como se muestra en la Figura 2.3. Las fuerzas de

adsorción permiten la tracción relativamente alta tensiones a ser generado en el agua del suelo que puede ser significativamente mayor que una atmósfera.

La parte inferior del canal de aire en la Figura 2.3 se muestra en el punto más estrecho entre las partículas del suelo. Si la diferencia entre el aire y la presión del agua ($u_a - u_w$) se incrementa más allá del punto en que el tensión superficial puede mantener la interfase aire-agua que “atravesará” el estrecho espacio entre las partículas y se moverá hacia abajo a un punto donde existe un espacio más pequeño, en ese punto el radio será más pequeño y tendrá un valor mayor de succión ($u_a - u_w$). Si la presión de aire se aumenta o la presión del agua se reduce en el suelo, éste se drenara hasta que el agua retroceda los espacios de poros que son lo suficientemente pequeños para “fomentar la succión”.

La succión total es una función tanto de la succión matricial y osmótica del suelo. Para la mayoría de aplicaciones prácticas en la ingeniería geotécnica la gama de contenidos de agua del suelo es tal que los cationes adsorbidos son generalmente completamente hidratados y las fuerzas osmóticas son bastante constantes. En consecuencia, dentro de la gama de contenidos de agua encontradas en problemas más prácticos, no se producen cambios significativos en la succión osmótica (Krahn y Fredlund, 1972). Los cambios en la succión total que se producirán son los que se deben únicamente a los cambios en la succión matricial (Nelson y Miller, 1992).

$$\text{Es decir } \Delta u_o = 0, \quad \Delta u = H \Delta u_o, \Delta u_c = \Delta u_c \quad (2.6)$$

2.7. Consolidación-expansión, análisis de volumen constante y procedimientos edométricos

Las pruebas de predicción de expansión más comunes implican el uso del aparato de consolidación unidimensional, o edómetro. Dos tipos básicos de pruebas edométricas de expansión pueden ser definidas como sigue:

La prueba de consolidación-expansión implica una carga inicial de una muestra no saturada a un esfuerzo prescrito. Se deja la muestra a expandirse bajo la carga cuando se añade agua. La carga inicial puede representar una sobrecarga, sobrecarga más la carga estructural, o algún otro tipo de sobrecarga arbitrario. Después de la expansión, la muestra se carga adicionalmente y se descarga de la manera convencional. La presión de expansión se define generalmente como la presión necesaria para comprimir la muestra completamente expandida de nuevo a su volumen inicial. Una gráfica idealizada de datos de prueba de consolidación de expansión se muestra en la Figura 2.4. En la figura σ'_s representa el esfuerzo al que se humedece

la muestra y σ'_0 representa la presión de expansión. De acuerdo con la definición anterior se observa que debido a que a las presiones de fluido de poro en exceso se les permite llegar a cero, no es necesario diferenciar entre el esfuerzo total y efectivo en la Figura 2.4.

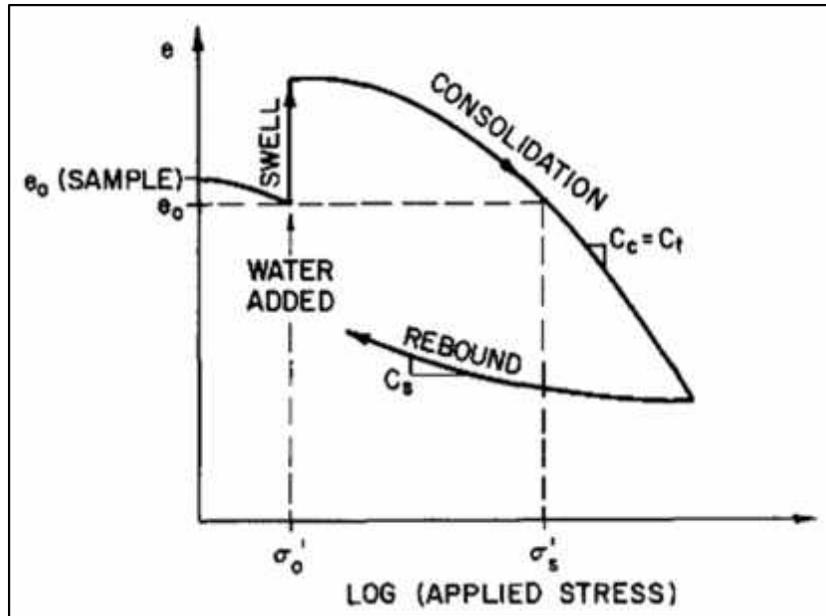


Figura 2.4 Gráfico típico de resultados de pruebas de consolidación-expansión (Nelson y Miller, 1992).

El procedimiento de la prueba de volumen constante o de presión de expansión implica inundar la muestra en el edómetro mientras que la prevención de la muestra de la expansión. La presión de expansión se reporta como el esfuerzo máximo aplicado requerido para mantener el volumen constante. Una vez que la presión de expansión deja de aumentar después de la inmersión, la muestra puede ser recuperada por eliminación de carga completa o la eliminación carga incremental. Alternativamente, puede ser cargada más allá de la presión de expansión y se descarga siguiendo el procedimiento de ensayo de consolidación convencional. Gráficas idealizadas de datos de prueba de volumen constante se muestran en la Figura 2.5 (Porter y Nelson, 1980).

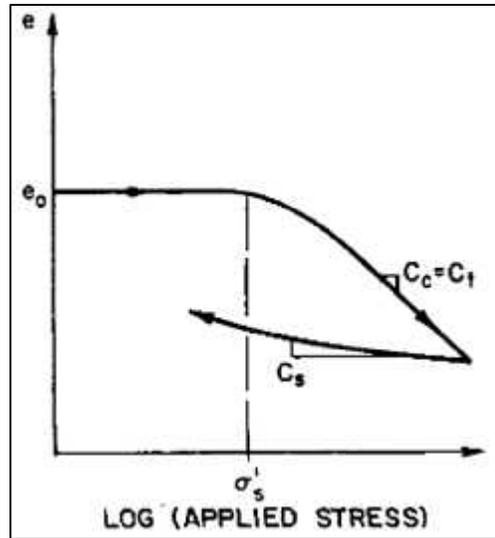


Figura 2.5 Resultados típicos de volumen constante (Porter y Nelson, 1980).

El análisis de ensayos edométricos debe tener en cuenta la carga y la secuencia de humectación, la presión de sobrecarga, perturbación de la muestra, y la compresibilidad del aparato. Sólo el esfuerzo total puede ser controlado con consolidómetros convencionales. La succión matricial es llevada a cero durante la inundación, pero no se mide antes de eso. Los resultados del ensayo se pueden interpretar en términos de la teoría del esfuerzo efectivo convencional después de que la muestra se ha equilibrado con el agua libre disponible. Sin embargo, las condiciones de esfuerzo de frontera inicial y final *in situ*, deben interpretarse en términos de tensiones efectivas y de succión. Si se utilizan procedimientos edométricos de prueba, la perturbación de la muestra, y los cambios tanto en succión y esfuerzo total se deben considerar en el análisis eficaz del esfuerzo.

Dos procedimientos de prueba edométricos se han desarrollado que toman en cuenta tanto la succión como los cambios totales de esfuerzo en el análisis de esfuerzo. El ensayo de doble edómetro, desarrollado por investigadores de Sudáfrica (Jennings *et al.*, 1973), donde ambas condiciones iniciales y finales de esfuerzo se tiene en cuenta. También se ha desarrollado un procedimiento simplificado basado en la prueba de doble edómetro. El uso de pruebas de edómetro doble para proporcionar parámetros para la predicción de expansión tiene la ventaja de simular condiciones de campo para la succión. Sin embargo, las cuestiones relativas las correcciones que han de aplicarse con el fin de correlacionar las dos curvas de la prueba de edómetro doble proporcionarían serias limitaciones (Nelson y Miller, 1992).

2.8. Procedimientos empíricos

Estos generalmente se basan en datos de pruebas de la región geográfica en particular en el que se desarrollaron. Van der Merwe (1964) desarrolló una fórmula usando potencial expansión y un factor de reducción para tener en cuenta la disminución de expansión con relación a la profundidad. La capa de suelo expansivo se divide en n capas, y la expansión total se estima por la ecuación (2.7).

$$\rho = \sum_{i=1}^{i=n} F_i \cdot PE_i \tag{2.7}$$

Donde F_i = factor de reducción para i capa

PE_i = potencial de expansión para i capa

La variable F_i se determina a partir Figura 2.6b mientras que el valor del potencial de PE_i se determina mediante la obtención de una clasificación del suelo de la Figura 2.6a basada en el índice de plasticidad y el contenido de arcilla y la Tabla 2.1.

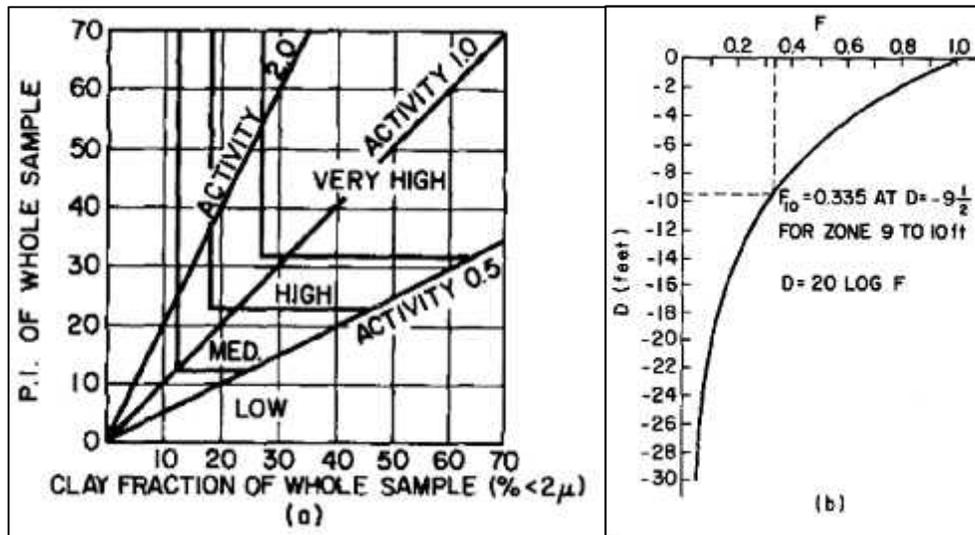


Figura 2.6 Relaciones para uso en el método de predicción de expansión empírica de Van der Merwe: (a) potencial de expansión y (b) factor de reducción (Van der Merwe, 1964).

Tabla 2.1 Clasificación de PE (Van der Merwe, 1964)

Clasificación	Valor de PE
Muy alto	1 pulgada por pie de profundidad
Alto	1/2 pulgada por pie de profundidad
Medio	1/4 pulgada por pie de profundidad
Bajo	0 pulgada por pie de profundidad

La curva del factor de reducción (Figura 2.6b) fue desarrollada para un área en Sudáfrica mediante métodos de ensayo de doble edómetro. Este método se sigue utilizando en Sudáfrica. Sin embargo, no se consideran las condiciones iniciales del suelo tales como contenido de agua, succión o densidad. Se debe utilizar sólo como un indicador de la expansión, y no para las predicciones cuantitativas.

Schneider y Poor (1974), desarrollaron relaciones estadísticas para arcillas de Texas entre la expansión medida para diferentes sobrecargas y el índice de plasticidad y contenido de agua. Presentaron las ecuaciones que se muestran en la Tabla 2.2 para la predicción de la expansión por ciento (S_p). Los métodos empíricos tienen la gran desventaja de que se basan en una cantidad limitada de datos y en realidad sólo se aplican en la región para la que fueron desarrollados. Se debe tener precaución en su uso. Su valor principal es como un indicador del potencial de expansión.

Tabla 2.2 Predicción del porcentaje de expansión (Schneider y Poor, 1974)

Sobrecarga adicional (pies)	$\log S_p$
0	$0.90 (PI / w) - 1.19$
3	$0.65 (PI / w) - 0.93$
5	$0.51 (PI / w) - 0.76$
10	$0.41 (PI / w) - 0.69$
20	$0.33 (PI / w) - 0.62$

2.9. Propiedades de suelos expansivos en Querétaro

Ayala (2008) presentó una investigación donde planteó una metodología para tomar en cuenta el asentamiento generado por un edificio, en donde las cargas originadas por peso propio superaban a las fuerzas de expansión del suelo. Entre su metodología, realizó la predicción de expansión del suelo de la zona de Jurica, Querétaro. El suelo fue clasificado como arcilla y bajo distintos tipos de condiciones iniciales entre los que destacan la profundidad y la humedad, obtuvo graficas de esfuerzos verticales contra el porcentaje de deformación entre otras como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

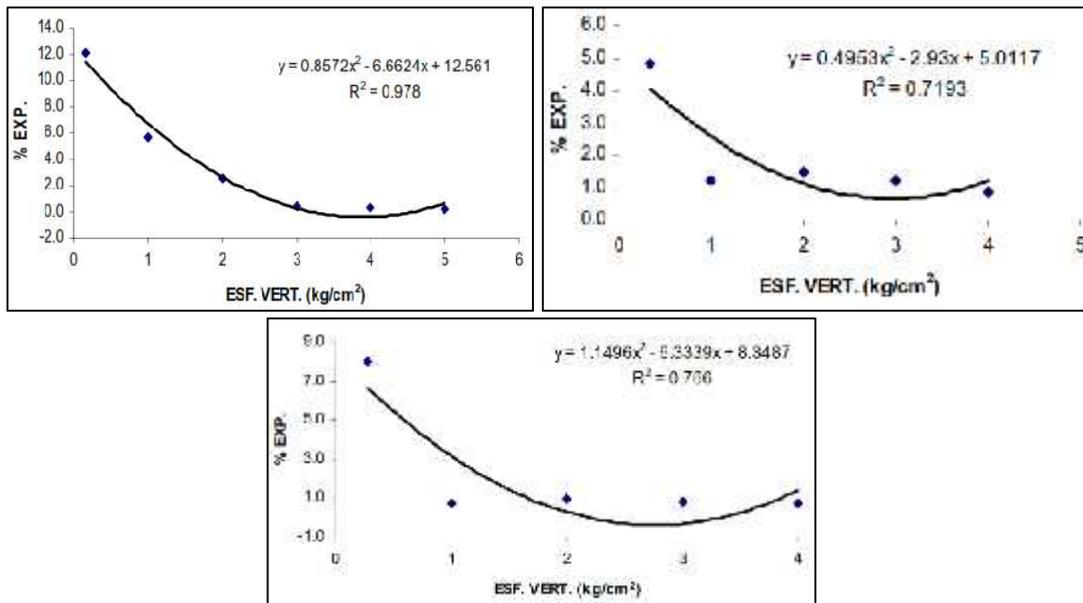


Figura 2.7 Graficas para los diferentes esfuerzos verticales a una profundidad de 1m, 1.5 m y 2m (Ayala, 2008)

2.10. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación, denominado R^2 es una medida del grado de fiabilidad o bondad del ajuste del modelo ajustado a un conjunto de datos. El coeficiente permite interpretar una variable como la proporción o porcentaje de variación total en dicha variable respecto a su media, que es explicada por un modelo de regresión. Es usual expresar esta medida en tanto por ciento, multiplicándola por cien. Por su definición, es una medida acotada, siendo sus límites $0 < R^2 < 1$.

Un R^2 igual a uno significa un ajuste lineal perfecto, esto es que la variación total de la variable es explicada por el modelo de regresión. El valor cero indica la no representatividad del modelo lineal (Martínez, 2005). De la gráficas de la Figura 2.8 se toma en consideración la ecuación correspondiente a la gráfica cuyo coeficiente de determinación resulta más apropiado (Figura 2.8)

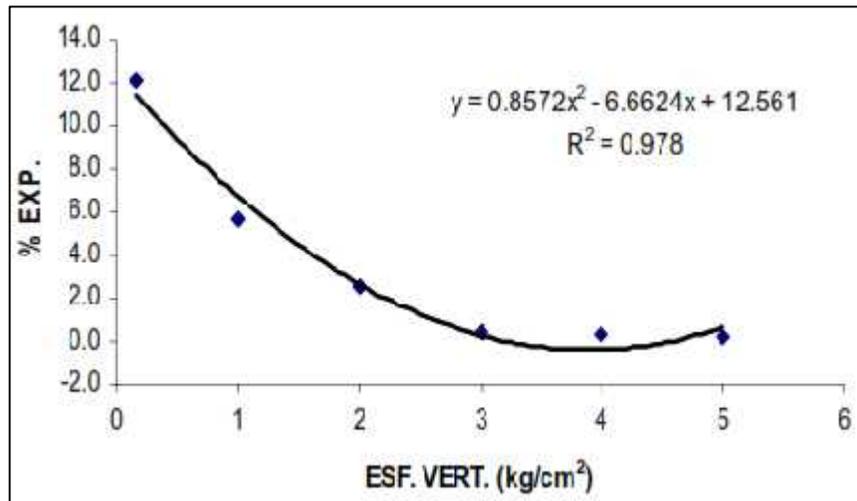


Figura 2.8 Grafica esfuerzo contra % expansión con el mejor coeficiente de determinación (Ayala, 2008).

De la Figura 2.8 se puede obtener la ecuación para el cálculo de la expansión para un suelo de tipo arcilla expansiva del área de Querétaro la cual es la siguiente:

$$\%Expansión = 0.8572\sigma^2 - 6.6624\sigma + 12.56 \quad (2.8)$$

CAPITULO 3

PROPLEMAS DE CONTACTO

3. PROBLEMAS DE CONTACTO

3.1. Antecedentes de la problemática de contacto

Los problemas de contacto involucran interacción entre superficies de uno o más cuerpos físicos, los cuales por lo general son deformables. La superficie de contacto como bien correspondiente a las condiciones de frontera es usualmente desconocida y debe ser determinada como parte de una solución. Comportamientos mecánicos de objetos en contacto son definidos por varias formas, propiedades de densidad del material, características de la superficie y acciones externas.

Estos factores primarios pueden volverse dependientes de otros parámetros físicos como la temperatura y el tiempo pero también del estado de contacto. Recíprocamente, la respuesta mecánica de cada objeto individual tiene una influencia sobre las dimensiones de la superficie de contacto como bien de la intensidad y naturaleza de la interacción de la superficie. Los problemas de contacto son entonces caracterizados por su alta dependencia no lineal (Zéhil y Gavin, 2013).

Tradicionalmente, la gente solo describe el problema de contacto entre campos locales de cuerpo, y el problema de contacto simple entre dos cuerpos en un sistema integral coordinado. La descripción tradicional del método ha sido bien usada para describir el problema de contacto entre cuerpos, los cuales pueden ser trasladados. Sin embargo, esto puede no ser descrito en los problemas de contacto entre cuerpos, en los cuales no solo se trasladan sino también rotan debido a un torque. Para tratar con el problema, siempre tenemos que hacer tratamientos extra. El tratamiento siempre depende de la experiencia. Si las personas no pueden tratar el problema apropiadamente ellos no pueden obtener la solución correcta (Zhi-hua, 2004).

Rodríguez-Tembleque *et al.*, (2010) trabajaron en un tratamiento numérico para simular el contacto 3D sobre problemas contacto-deslizantes, basándose en el método de elemento de frontera (Boundary Element Method - BEM) para calcular los coeficientes de influencia elásticos y funciones sobre el argumento Lagrangiano para el cumplimiento de las restricciones de contacto.

Se han planteado problemáticas en dos y tres dimensiones. Zéhil y Gavin, (2013) realizaron un algoritmo para resolver diversos problemas de contacto, en dos y tres dimensiones. Estas fueron alternativas poderosas y bien establecidas como aproximaciones de elemento finito basadas en optimización restringida.

Kim *et al.*, (2014) trabajaron con problemas de contacto sobre vigas. Mostraron que la extensión de la región de contacto es de proporción fija al espesor de la viga y es independiente de las cargas concentradas predichas por la teoría de vigas clásica así como que la distribución de presiones de contacto en esta región tiene una forma universal, la cual es bien aproximada por simples expresiones algebraicas.

3.2. Esfuerzos de contacto

El estado de esfuerzo en la frontera de contacto es caracterizado por la geometría de contacto del cuerpo y es clasificado como contacto completo o incompleto. Los componentes del esfuerzo en la frontera de contacto completo incrementan infinitamente pero aquellos del contacto incompleto se desvanecen hasta la nulidad. Los esfuerzos de contacto pueden ser evaluados de la relación entre los desplazamientos y tracciones sobre la superficie de contacto que constituyen ecuaciones integrales singulares. Esto dependerá del ángulo de contacto en la frontera, la desigualdad entre el material de los cuerpos en contacto y la condición de fricción en la superficie de contacto (Jang *et al.*, 2016).

Normalmente los problemas de contacto completo pueden ser analizados usando métodos asintóticos que fueron originalmente aplicados a problemas de corte penetrantes (Williams, 1952). Como método alternativo para evaluar los esfuerzos por contacto, el análisis por elemento finito puede ser usado.

3.3. Tipos de contacto

Se presentan tres perfiles básicos en la formulación de problemas de contacto, primeramente la perforación plana (Figura 3.1a). Se asume que la perforación tiene una base plana de ancho $2b$ con esquinas cuadradas, esta es suficientemente larga en la dirección Z para que las condiciones de estiramiento plano prevalecen. En adición se restringe a que la perforación no tiene inclinación, la interfase permanece paralela a la superficie no deformada del sólido (Zisis *et al.*, 2014).

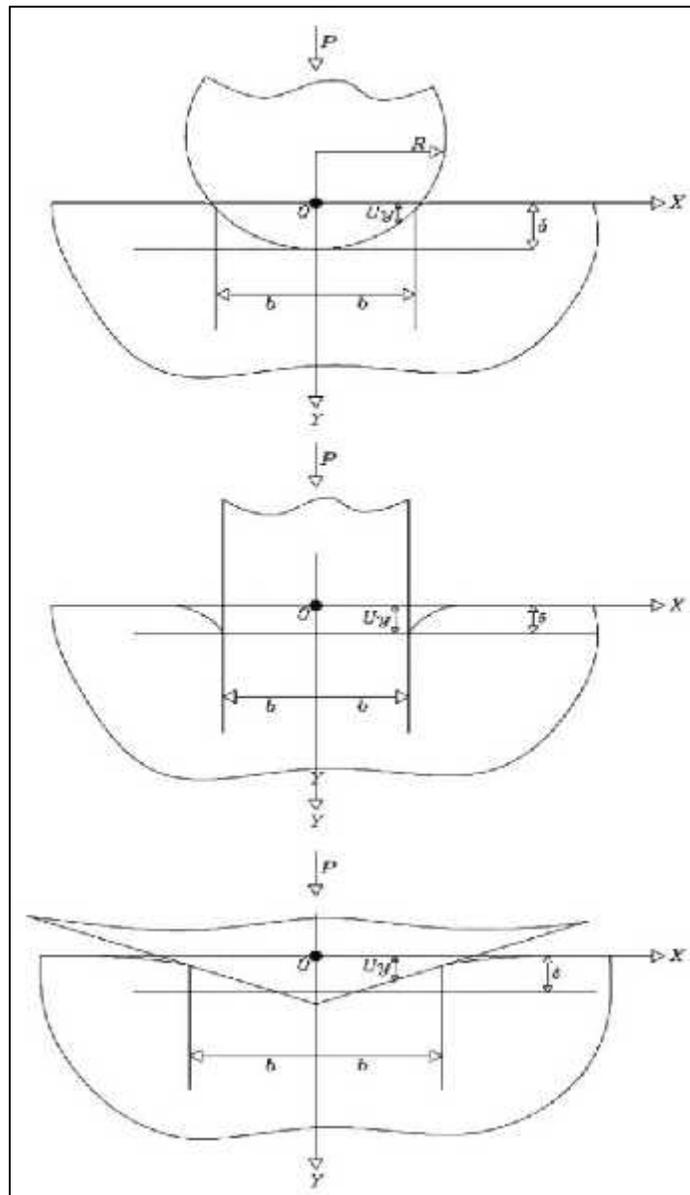


Figura 3.1 Perforación en un semiespacio por un cuerpo rígido (Zisis et al., 2014).

Después, se examina un cuerpo penetrante rígido cilíndrico de radio R con un eje paralelo al eje Z y que presenta contacto con un semiplano bajo la acción de una fuerza P (Figura 3.1a). Ambos cuerpos hacen contacto sobre una longitud de cuerda de ancho $2b$ paralela al eje Z (Zisis et al., 2014). En la elasticidad clásica de Hertz, se considera este caso como el límite de un contacto elíptico cuando un eje de la elipse llega a ser considerablemente mayor que el otro eje (Hills y Nowell, 1994).

Finalmente consideramos una cuña superficial del cuerpo penetrante presionando sobre las fronteras y en contacto con el semiplano bajo la acción de la fuerza P (Figura 3.1c) (Zisis *et al.*, 2014).

3.4. Clasificación del contacto según la rigidez del material

El contacto puede ser clasificado de dos formas atendiendo a la rigidez de los materiales flexible-flexible y rígido-flexible. En el caso flexible-flexible, ambos o todos los cuerpos que contacta son deformables y tienen rigidez similar. Cuando una o más de las superficies que contacta son tratadas como rígidas, es decir, tiene una rigidez muy superior con relación al cuerpo deformable con que contacta, estamos en presencia del contacto rígido-flexible. En ambos casos de contacto es necesaria la compatibilidad, esta previene que las superficies de contacto se penetren la una en la otra (ANSYS, 2013).

3.5. Elementos de contacto

Existen tres tipos elementales de contacto, nodo-nodo, nodo-superficie y superficie-superficie. El contacto nodo-nodo donde se implica que la localización final del contacto sea conocida de antemano. Estos elementos nodo-nodo son empleados para modelar problemas en los cuales las dos superficies están alineadas, la cantidad de deslizamiento es despreciable y las deflexiones y rotaciones de las dos superficies permanecen pequeñas.

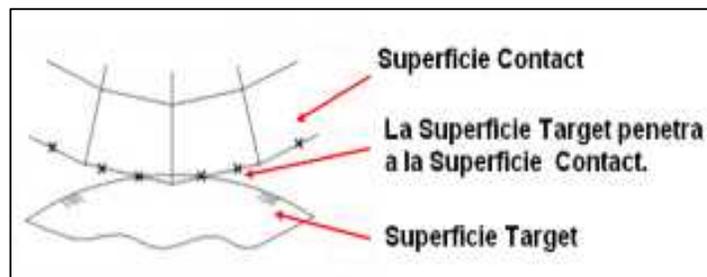


Figura 3.2 Interacción cuando el contacto que se establece es rígido-flexible y superficie-superficie (ANSYS, 2013)

En los elementos nodo-superficie las áreas de contacto son desconocidas y se permite el deslizamiento. Los elementos de contacto de este tipo se usan típicamente para modelar aplicaciones de contacto de un punto hacia una superficie. En los elementos superficie-superficie las áreas de contacto son desconocidas y se permite gran cantidad de deslizamiento. Existen

elementos superficie-superficie para contacto entre cuerpos rígido-flexible y flexible-flexible. Estos elementos usan el concepto de “*target surface*” y “*contact surface*” para formar un par de contacto (Figura 3.2). Usan por defecto el método de Lagrangiano Aumentado para asegurar la compatibilidad de la deformación (ANSYS, 2013).

3.6. Métodos de solución para problemas de contacto

Existen varios métodos para la solución de los problemas de contacto. Uno de los métodos es el Método de Penalización, que utiliza un resorte para forzar la compatibilidad en el contacto. La rigidez del resorte (rigidez del contacto) se denomina parámetro de penalización. El otro método es el de Multiplicador de Lagrange, este añade un grado de libertad adicional (la presión de contacto), para satisfacer la condición de impenetrabilidad. Y la combinación de ambos métodos, el de penalización y el de multiplicador de Lagrange, se denomina el Lagrangiano Aumentado. El método Lagrangiano Aumentado es el más aplicado cuando el contacto se realiza superficie-superficie y además es el que el “*Contact Manager*” de ANSYS sitúa como primera variante en estos casos. Este método en las primeras iteraciones determina el contacto en base a la rigidez de la penalización, una vez que el equilibrio es establecido, se verifica la tolerancia a la penetración, en este punto si es necesario se aumenta la presión de contacto y se continúan las iteraciones (ANSYS, 2013).

CAPITULO 4

SOFTWARE ANSYS

4. SOFTWARE ANSYS

4.1. Método de elementos finitos

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no (ANSYS, 2014).

4.2. Conceptos generales del ANSYS

ANSYS es un programa para el cálculo computacional basado en el MEF, con aplicabilidad a una amplia variedad de problemas habituales en la ingeniería. Este programa cuenta con más de 100.000 líneas de código que le permiten la implementación de análisis estáticos y dinámicos en cálculos de estructuras, así como en problemas de transferencia de calor, fluidos y electromagnetismo. Como es habitual en todos los programas para cálculo por elementos finitos ANSYS dispone de tres módulos de trabajo:

Pre-procesador: Donde se prepara el modelo para el cálculo. En él se realizan las operaciones de:

- Dibujo del modelo, o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD que genere ficheros compatibles. - Selección del tipo de elemento o elementos a emplear.
- Selección de los materiales a emplear, que pueden obtenerse por librerías, o ser definidos por el usuario.

Solución: Es la parte del programa que realiza todo el cálculo del MEF y genera las soluciones. Los pasos que abarca son los siguientes:

- Selección del tipo de cálculo a realizar, por ejemplo si es un análisis transitorio, en régimen armónico, estático, de pandeo, etc.
- Configuración de los parámetros de cálculo.

- Selección de intervalos de tiempo, norma del error, número de iteraciones, etc.
Introducción a ANSYS características generales y fuentes de error.

Post-procesador: es la herramienta que permite la representación gráfica de los resultados, así como resultados indirectos que se pueden obtener operando las soluciones del modelo. Pese a la potencia computacional aportada por el programa, el factor principal para conseguir una aceptable aproximación de los resultados finales con los reales pasará inevitablemente por la aplicación de unos conocimientos mínimos por parte del usuario en cuanto a los métodos empleados por el programa (ANSYS, 2014).

4.3. Familias de elementos en ANSYS

Una familia de elementos engloba a un cierto tipo de elementos con características comunes, tales como:

- Geometría (elementos bidimensionales, tridimensionales, planos, etc.).
- Número de nodos (afecta al número de puntos para los cuales se realizará la aproximación exacta de la solución, y por tanto a las funciones de forma que aproximarán los valores de la misma en el resto del sistema continuo).
- Grados de libertad de los nodos.

Los elementos BEAM son elementos uniaxiales que pueden estar sometidos a tensión, compresión y flexión. De entre todos ellos los tipos de la serie 180 que incluye los tipos BEAM188 y BEAM189 son muy utilizados para elementos barra. Estos incluyen los efectos de la deformación por cortante y de rigidización por tensión

El elemento BEAM188 es apropiado para analizar estructuras esbeltas o moderadamente delgadas, basándose en la teoría de Timoshenko para vigas. Los efectos de la deformación tangencial se incluyen en este tipo de elemento. El BEAM188 es un elemento 3-D lineal o cuadrático (2 o 3 nodos, estando el tercero destinado a orientar el elemento) como se muestra en la Figura 4.1, con 6 o 7 grados de libertad en cada nodo.

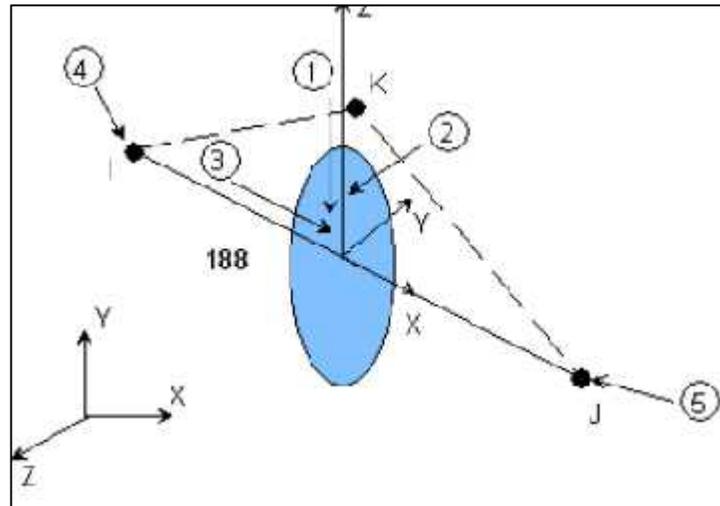


Figura 4.1 Elemento BEAM188 (ANSYS, 2014).

Los elementos SHELL encuentran gran aplicación en el modelado de estructuras hechas a partir de láminas o en elementos de pared delgada, como es el ejemplo de la Figura 4.2. Algunas variaciones de este elemento pueden utilizarse para modelar varias capas de elementos delgados, como ocurre en el modelado de materiales compuestos (ANSYS, 2014)

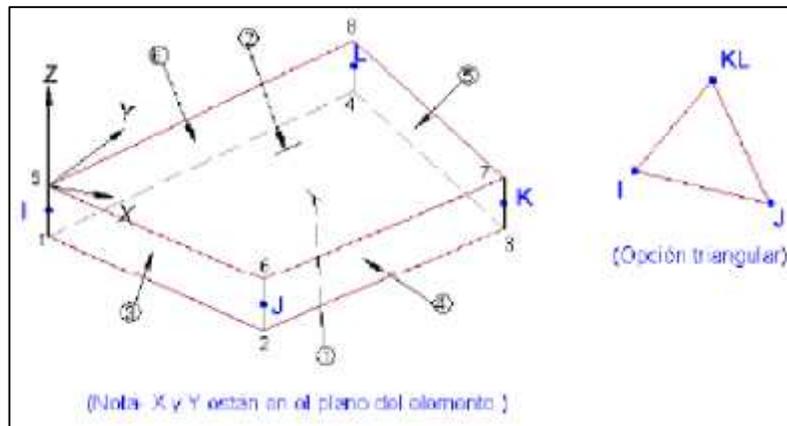


Figura 4.2 Elemento SHELL63 (ANSYS, 2014).

CAPITULO 5

METODOLOGIA

5. METODOLOGÍA

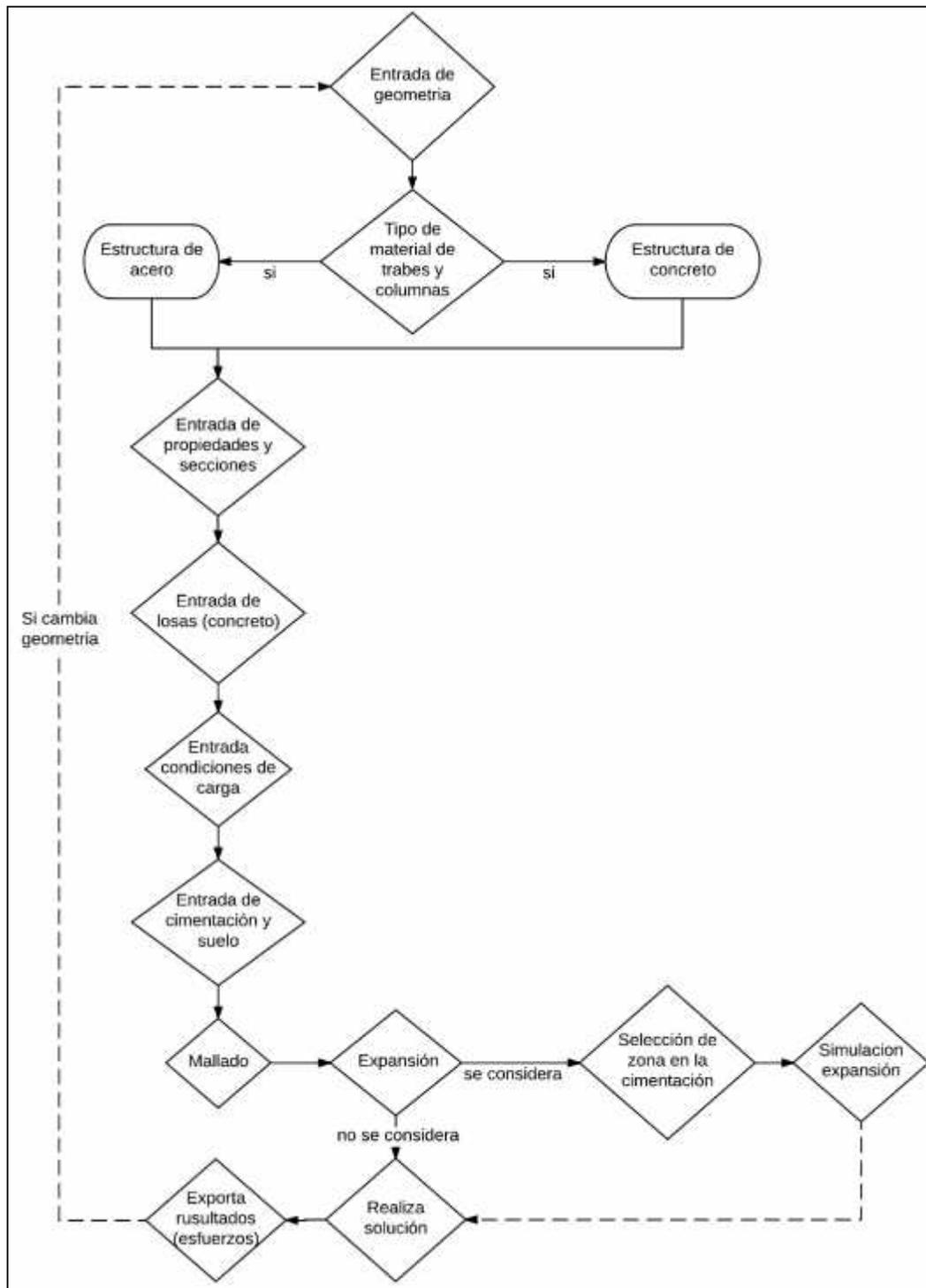


Figura 5.1 Diagrama de flujo de ejecución general del código APDL.

A continuación se presenta la secuencia de paso seguida para la realización de la presente investigación:

- 1) Definición de parámetros iniciales.
- 2) Escritura del código APDL (Ansys Parametrical Design Language) con las siguientes características:
 - 1) Modelación de estructura de concreto.
 - 2) Modelación de la cimentación.
 - 3) Modelación del suelo (efecto Winkler).
 - 4) Solución del modelo
 - 5) Aplicación de desplazamiento
 - 6) Análisis de esfuerzos en las zonas elegidas.
- 3) Recopilación de los resultados del análisis.

5.1. Definición de parámetros iniciales

Las dimensiones iniciales fueron propuestas para la estructura (Tabla 5.1), así como los parámetros del suelo y dimensiones de la cimentación debido a que se utilizó una losa de cimentación se tuvo cuidado de no exceder las dimensiones de la edificación, para así poder considerar este tipo de cimentación como adecuada.

Tabla 5.1 Datos iniciales considerados en la modelación

Datos iniciales de la estructura	Valores	Datos iniciales del suelo	Valores
Altura de edificio	9 mts	Tipo de suelo	Arcilla expansiva
Niveles del edificio	3	Módulo de reacción	2000 t/m3
Largo del edificio	18 mts		
Ancho del edificio	18 mts		
Material trabes y columnas	Concreto (300kg/cm2)		
Perfil de trabes y columnas	Rectangular		
Peralte losas de entrepiso	0.1 mts		
Material losas de entrepiso	Concreto (250kg/cm2)		
Peralte losas de cimentación	0.3 mts		

5.2. Escritura del código APDL

5.2.1. Modelación de estructura de concreto

El esqueleto de la estructura se realizó con base en marcos regulares, al inicio del código se solicita al usuario el número y dimensiones de dichos marcos, así como el número de niveles de la estructura para la captura de las variables iniciales (Figura 5.2)

Multi-Prompt for Variables

INDIQUE DIMENSIONES GENERALES DEL MARCO

NUMERO DE NIVELES DEL MARCO

NNIV

ALTURA DE UN NIVEL (M)

HNIV

NUMERO DE CRUJAS EN X

NCRUX

LONGTUD DE CRUJA EN X(M)

LCRUX

NUMERO DE CRUJAS EN Z

NCRUZ

LONGTUD DE CRUJA EN Z(M)

LCRUZ

OK Cancel

Figura 5.2 Macro de ingreso de variables iniciales

Las cargas permanentes fueron introducidas sobre el edificio, dependiendo de la reglamentación utilizada. Así como las cargas pertinentes para cada nivel (ya sean cargas puntuales o cargas por metro lineal de muro, se dan dos opciones, muro de tabla roca o muro de vibroblock comprimido) (Figura 5.3 y Figura 5.4).

INDIQUE CARGAS POR APLICAR SOBRE EL EDIFICIO

CARGA VIVA AZOTEA (T/M2)

CAZ

CARGA VIVA ENTREPISO (T/M2)

CENI

C. MUERTA TOTAL OSA CIML (T/M2)

EMPJ

OK Cancel

Figura 5.3 Macro de ingreso de cargas vivas y muertas

ENTER TYP OF W. LOAD (TAB. ARCOA BRICOR) : CMU 1 - [2]

OK

Figura 5.4 Macro de ingreso de cargas debidas a muros

Las propiedades de los materiales fueron ingresado para cada tipo de elemento estructural a considerar, ya sean trabes o columnas. Para el caso de estudio se consideraron estructuras de concreto (Figura 5.5).

PROPIEDADES DE CONCRETO EN COLUMNAS	
RESISTENCIA DE CONCRETO (CC/CM ²)	
FC	300
MODULO DE TOISSON	
MPDTC	0.1
PESO VOL. CONCRETO (TON/M ³)	
PVOLC	2.4
COEF. EXP. VOL. CONCRETO	
COEVC	0.0001
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 5.5 Macro de ingreso de propiedades de columnas

El código permite entre la selección de secciones de concreto o perfiles de acero (sección HSS, I y tubular), luego de realizar dicha selección fueron ingresadas las dimensiones de los perfiles seleccionados (Figura 5.6)

DIMENSIONES DE SECCIONES SELECCIONADAS	
PERALTE COLUMNAS (M)	
PERC	0.5
ANCHICO COLUMNAS (M)	
ANC	0.25
PERALTE TRABES (M)	
PERT	0.4
ANCHICO TRABES (M)	
ANT	0.2
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 5.6 Macro de ingreso de dimensiones de las secciones seleccionadas

El programa solicita las propiedades y dimensiones de las losas, tanto de entrepiso como de azotea. El código únicamente contempla losas macizas de concreto por lo que únicamente se requieren el peralte y las propiedades del concreto de dicha losa (Figura 5.7).

PROPIEDADES DE LOSAS DE ENTREPISO Y AZOTEA	
PERALTE DE LA LOSA (M)	
PERL	<input type="text" value="0.1"/>
PESO VOLUMETRICO LOSA (T/M3)	
PVOLI	<input type="text" value="2.4"/>
RESISTENCIA DEL CONCRETO (KG/CM2)	
FCU	<input type="text" value="250"/>
MODULO DE ELASTICIDAD	
MPOICL	<input type="text" value="0.1"/>
COEF. EXP. VOL. CONCRETO	
COEPVCL	<input type="text" value="0.0001"/>

Figura 5.7 Macro de ingresos de propiedades y dimensiones de las losas.

Se realizó una visualización de los elementos de la estructura (trabes y columnas) en los cuales se utilizan elementos de tipo barra (LINK188) para su modelación. Se verificaron las dimensiones proporcionadas para evitar errores (Figura 5.8)

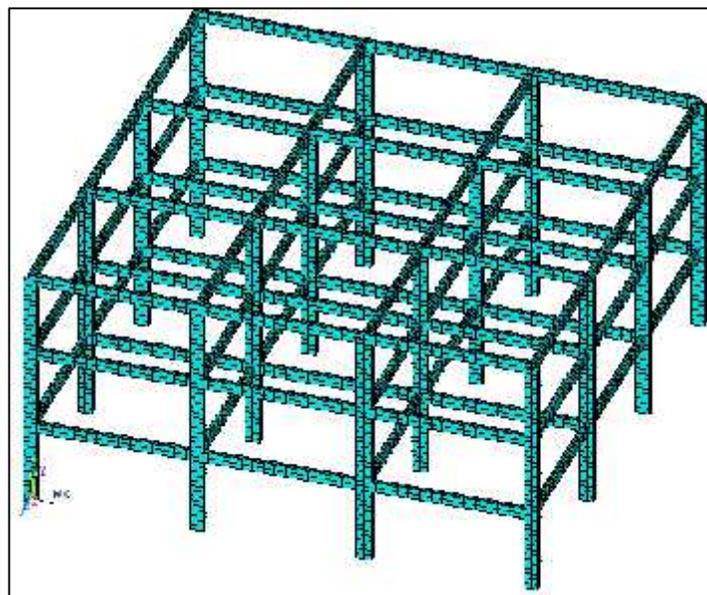


Figura 5.8 Visualización de elementos trabe y columna

De igual manera se realizó una visualización de los elementos losas en los cuales se utilizan elementos de tipo placa (SHELL63) y se observa sus dimensiones para evitar errores (Figura 5.9).

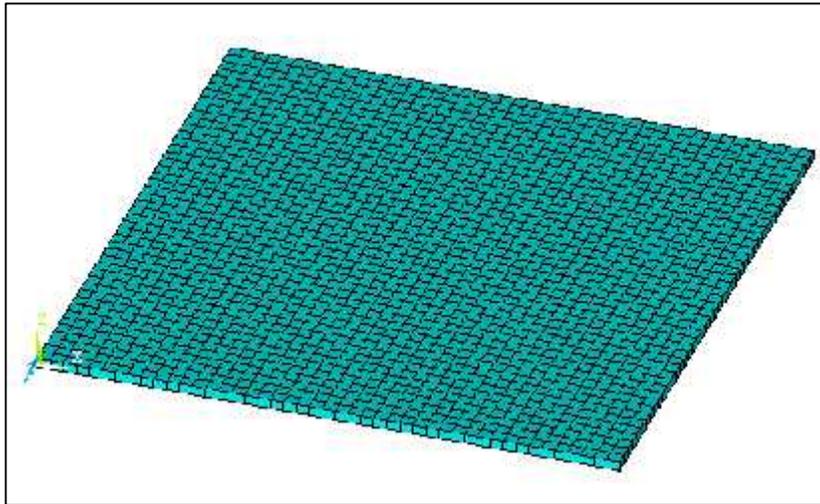


Figura 5.9 Visualización de elemento losa

5.2.2. Modelación de la cimentación

Se introdujeron las dimensiones de la losa, el código únicamente contempla una losa de cimentación por lo que solo se requiera el peralte de la misma. De igual manera se ingresan las propiedades pertenecientes al suelo (Figura 5.10) y se visualizan los elementos (Figura 5.11)

PARAMETROS DE LOSA DE CIMENTACION Y SUELO	
CAP. CARGA DEL SUELO (T/M2)	
CAPMAX	<input type="text" value="10"/>
MOD. REACCION DEL SUELO (T/M3)	
KSUFIQ	<input type="text" value="2000"/>
PERALTE LOSA CIMENTACION (M)	
PERLZ	<input type="text" value="0.3"/>
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 5.10 Macro de ingreso para variables de la losa de cimentación y el suelo

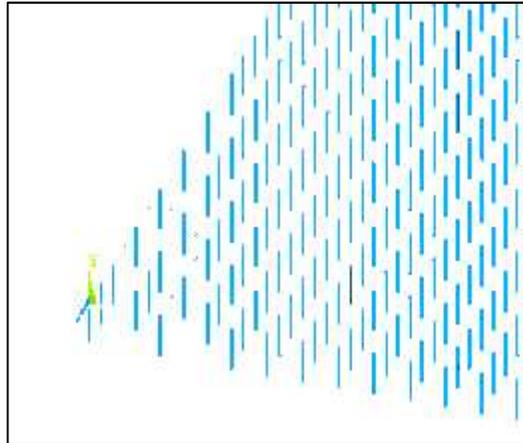


Figura 5.11 Visualización de elementos link que simulan el suelo

5.2.3. Solución de modelo

El programa corre la primera solución, arrojando los esfuerzos sin la presencia de expansión (Figura 5.12)

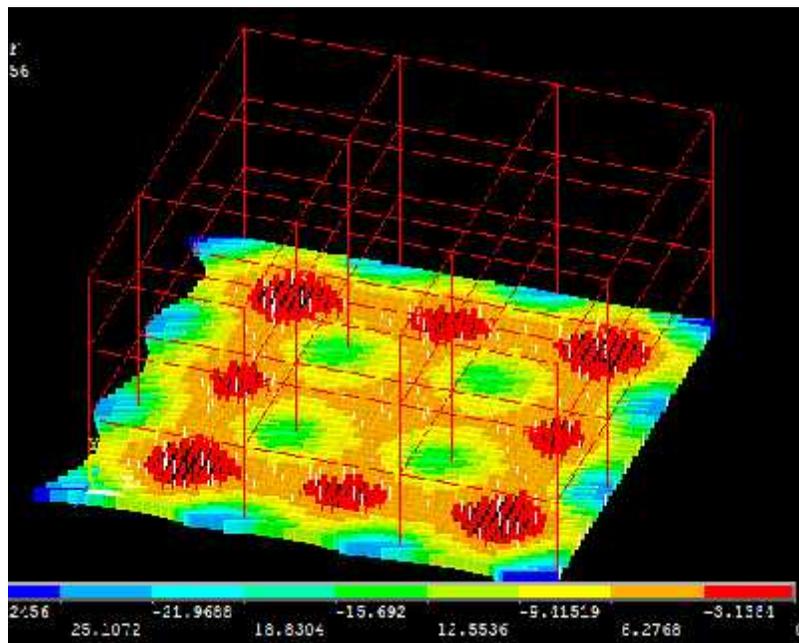


Figura 5.12 Esfuerzos sin considerar expansión

5.2.4. Aplicación de desplazamiento

Para la simulación de una expansión en una zona aleatoria se agregó un desplazamiento el cual correspondería a la expansión del suelo. Aleatoriamente se seleccionó

un link, el cual se tomó de referencia para el cálculo del valor del desplazamiento utilizando el valor de esfuerzo de contacto obtenido en el primer análisis y la ecuación (2.8)

Se tomó un link cuyo esfuerzo de contacto es 6.27, se substituyó en la ecuación obteniendo lo siguiente:

$$\%Exp = 0.8572(6.27)^2 - 6.6624 \cdot 6.27 + 12.56 = 4.72 \approx 5\% \quad (5.1)$$

Como se menciona en la misma Figura 2.8 se tomó una profundidad de 1 metro, por lo que se obtuvo una expansión aproximada de $0.05 \cdot 1 = 0.05\text{mts} = 5\text{cm}$. La cual se agregó como desplazamiento vertical para posteriormente realizar la solución del modelo utilizando los mismos parámetros iniciales con excepción del desplazamiento.

5.2.5. Análisis de esfuerzos en las zonas elegidas

Posteriormente se realizó la exportación de los ambos resultados los cuales fueron guardados en vectores mediante el programa para su fácil exportación hacia archivos de Excel. El programa permite al usuario decidir, si se requiere, la impresión de los diagramas de esfuerzos bajo las condiciones de carga como por ejemplo las fuerzas normales en columnas (Figura 5.13)

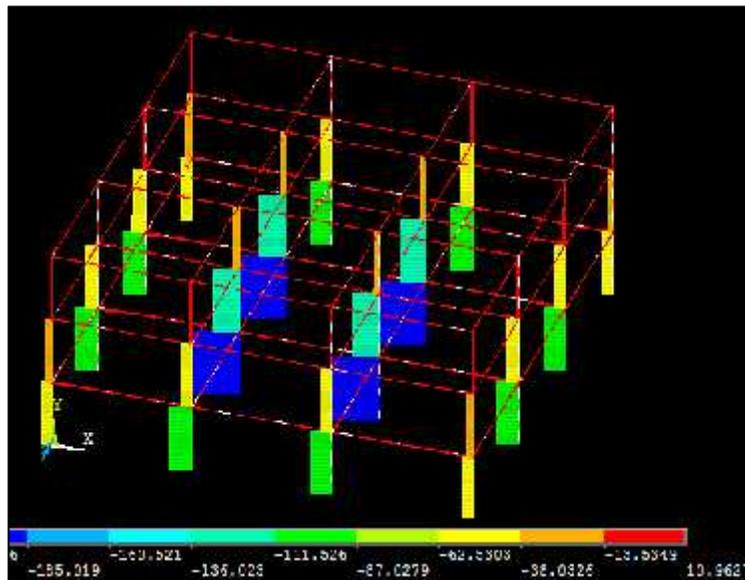


Figura 5.13 Ploteo de esfuerzos normales en columnas

5.3. Recopilación de los resultados del análisis.

Se realizaron los pasos antes mencionados realizando una variación de las zonas elegidas, realizando el cálculo consecutivo de los esfuerzos y presentados en tablas para su fácil visualización.

CAPITULO 5
RESULTADOS Y
CONCLUSIONES

6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1. Presentación de resultados condensados

A continuación se presentan los esfuerzos de los elementos aledaños donde se presenta la expansión

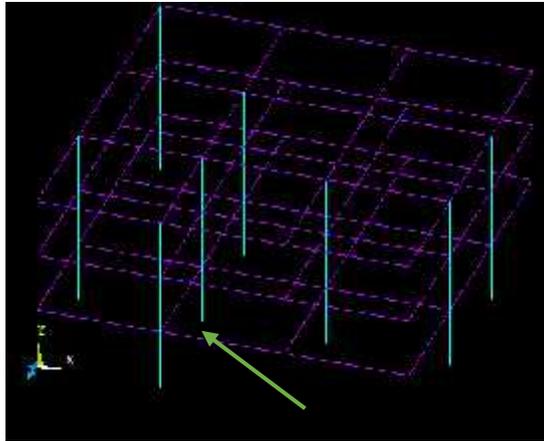


Figura 6.1 Primera iteración de expansión

Tabla 6.1 Comparación de esfuerzos de contacto primera iteración

# De Elemento (Link)	Esfuerzo(Ton/m2)	
	No expansión	Expansión
10650	-9.7371	-13.339827
10651	-11.2354	-15.16779
10652	-11.9493	-15.773076
10653	-11.3862	-15.599094
10654	-10.0446	-13.56021
10694	-8.7712	-11.577984
10695	-9.9087	-13.574919
10696	-10.4002	-14.04027
10697	-10.0601	-13.279332
10698	-9.0792	-12.438504
10742	-7.5329	-10.169415
10743	-8.3782	-11.059224
10744	-8.7404	-11.974348

10745	-8.5293	-11.514555
10746	-7.8397	-10.348404
10788	-6.3097	-8.644289
10789	-6.948	-9.3798
10790	-7.2279	-9.540828
10791	-7.098	-9.72426
10792	-6.6142	-8.92917
10834	-5.2802	-6.969864
10835	-5.7795	-7.917915
10836	-6.0062	-8.10837
10837	-5.9284	-7.825488
10838	-5.582	-7.64734

Tabla 6.2 Comparación de Fuerzas normales primera iteración

# De Elemento (Columna)	Fuerza Normal (Ton)	
	No expansión	Expansión
361	-38.03	-47.1572
362	-38.03	-47.1572
363	-38.03	-47.1572
364	-38.03	-47.1572
365	-38.03	-47.1572
366	-38.03	-47.1572
367	-38.03	-47.1572
368	-38.03	-47.1572
369	-38.03	-47.1572
370	-38.03	-47.1572
371	-38.03	-47.1572
372	-38.03	-47.1572
373	-38.03	-47.1572

Tabla 6.3 Comparación de momentos primera iteración

# De Elemento (Trabes)	Momento en X (Ton*m)	
	No expansión	Expansión
500	-13.4	-15.812

501	-6.78	-7.797
502	-0.5	-0.595
503	2.25	2.655
504	5.55	6.3825
505	7.59	9.0321
506	6.07	7.1626
507	2.75	3.1625
508	1.3	1.547
509	-0.76	-0.8968
510	-3.7	-4.255
511	-5.75	-6.8425
512	-13.7	-16.166

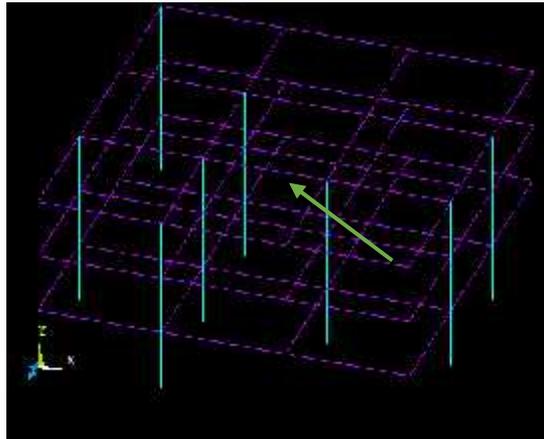


Figura 6.2 Segunda iteración de expansión

Tabla 6.4 Comparación de esfuerzos de contacto segunda iteración

# De Elemento (Link)	Esfuerzo(Ton/m2)	
	No expansión	Expansión
11300	-12.7371	-17.449827
11301	-14.0354	-19.228498
11302	-14.9993	-20.549041
11303	-14.3862	-19.709094
11304	-12.8446	-17.597102
11344	-11.8212	-16.195044

11345	-12.9087	-17.684919
11346	-13.2002	-18.084274
11347	-13.1101	-17.960837
11348	-12.0792	-16.548504
11392	-10.3329	-14.156073
11393	-11.4282	-15.656634
11394	-11.7404	-16.084348
11395	-11.3293	-15.521141
11396	-10.8897	-14.918889
11438	-9.3097	-12.754289
11439	-9.748	-13.35476
11440	-10.2779	-14.080723
11441	-10.098	-13.83426
11442	-9.4142	-12.897454
11484	-8.3302	-11.412374
11485	-8.7795	-12.027915
11486	-8.8062	-12.064494
11487	-8.9784	-12.300408
11488	-8.582	-11.75734

Tabla 6.5 Comparación de Fuerzas normales segunda iteración

# De Elemento (Columna)	Fuerza Normal (Ton)	
	No expansión	Expansión
361	-18.73	-22.8506
362	-18.73	-22.8506
363	-18.73	-22.8506
364	-18.73	-22.8506
365	-18.73	-22.8506
366	-18.73	-22.8506
367	-18.73	-22.8506
368	-18.73	-22.8506
369	-18.73	-22.8506
370	-18.73	-22.8506
371	-18.73	-22.8506
372	-18.73	-22.8506
373	-18.73	-22.8506

Tabla 6.6 Comparación de momentos segunda iteración

# De Elemento (Trabes)	Momento en X (Ton*m)	
	No expansión	Expansión
500	-11.926	-14.07268
501	-5.8986	-6.960348
502	-0.455	-0.5369
503	2.0025	2.36295
504	4.8285	5.69763
505	6.9069	8.150142
506	5.4023	6.374714
507	2.3925	2.82315
508	1.183	1.39594
509	-0.6764	-0.798152
510	-3.219	-3.79842
511	-5.2325	-6.17435
512	-12.193	-14.38774

6.2. Discusión de resultados

Se pueden observar en las tablas de resultados como al considerar la expansión las fuerzas de los elementos seleccionados, que son las aledañas a la aplicación de la expansión se ven incrementadas en cierta medida. En los esfuerzos de contacto al ejercer presión por parte del suelo, este se ve incrementado por la fuerza de contacto extra que proporciona el suelo. En las fuerzas normales se observan incrementos de hasta 25% en las fuerzas normales correspondientes a la columna que se encuentra arriba del punto de aplicación de la expansión. En los momentos flexionantes se toman los elementos en contacto con la columna antes mencionada y se observan incrementos de entre 15% hasta un 20% en los valores del momento.

6.3. Conclusiones

Según los datos recabados de las diferentes iteraciones evaluadas se puede verificar que la hipótesis argumentada en este documento es válida, debido a que la estructura presenta

incrementos en los esfuerzos de contacto en la cimentación y elementos mecánicos de la estructura analizada cuando en ella se considera el efecto de la expansión.

El incremento de los esfuerzos es mayor dependiendo de qué tan cercanos están los elementos a la zona afectada por la expansión como se observó en los esfuerzos de contacto donde la expansión actúa directamente. De igual manera se tiene que para las fuerzas normales de las columnas, donde la fuerza de empuje del suelo afectó la compresión de dichas columnas, se vieron incrementados sus valores.

En el caso de los momentos flexionantes se observaron incrementos menores, lo cual se debe a que no se encuentran en contacto directo con la zona afectada por la expansión sino que las fuerzas transmitidas en las columnas llegan en parte a las vigas aledañas, lo que causa un incremento en el momento flexionante pero de menor grado que en las fuerzas normales de la columna.

El programa permite al usuario calcular los esfuerzos que un suelo expansivo ejerce sobre una edificación dada; la cual gracias al algoritmo, puede variar conforme su configuración para adecuarse lo mejor posible al caso de estudio que se requiera.

De acuerdo a todo lo anterior se sugiere la consideración de los efectos de expansión, si se trata de cimentaciones sobre suelos expansivos al momento de diseño ya que como se observó se muestra significativa en la repercusión de los esfuerzos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSYS Inc. 2014. ANSYS Mechanical User's Guide. ANSYS Manual.15317:724–746. Available from: <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>
2. Ayala Ibarra Tania 2008, Influencia del potencial de expansión en la predicción de asentamientos (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro
3. Bode, C., R. Hirschauer, and S. A. Savidis. 2002. Soil-structure interaction in the time domain using halfspace Green's functions. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 22:283–295.
4. Boulanger, R. W., C. J. Curras, S. Member, B. L. Kutter, D. W. Wilson, A. Member, and A. Abghari. 1999. Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments And Analyses. 125:750–759.
5. Damgaard, M., V. Zania, L. V. Andersen, and L. B. Ibsen. 2014. Effects of soil-structure interaction on real time dynamic response of offshore wind turbines on monopiles. *Eng. Struct.* 75:388–401. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.006>
6. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE* 103 (GT5):447-466. (Consultado en *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*)
7. Fredlund, D. G. (1979). Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. 2nd Canadian Geotech. Colloquium, *Canadian Geotech. J.*, V.16, No. 1:121-139. (Consultado en *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*).
8. Galvín, P., and J. Domínguez. 2007. Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 31:931–941.
9. Galvín, P., and A. Romero. 2014. A MATLAB toolbox for soil-structure interaction analysis with finite and boundary elements. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 57:10–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.10.009>
10. Grange, S., P. Kotronis, and J. Mazars. 2009. A macro-element to simulate dynamic Soil-Structure Interaction. *Eng. Struct.* 31:3034–3046. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.007>
11. Gun, H. 2004. Elasto-plastic static stress analysis of 3D contact problems with friction by using the boundary element method. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 28:779–790.
12. Hills, D., Nowell, D., 1994. *Mechanics of Fretting Fatigue*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

13. Jennings, J. E. B., Firtu, R. A., Ralph, T. K., and Nagar, N. (1973). An improved method for predicting heave using the oedometer test. Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa, Israel 2:149-154. (Consultado en Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering)
14. Kim, J. H., Y. J. Ahn, Y. H. Jang, and J. R. Barber. 2014. Contact problems involving beams. *Int. J. Solids Struct.* 51:4435–4439.
15. Krahn, J., and Fredlund, D. G. (1971). On total, matric and osmotic suction. *Soil Sci.* 114(5):339-345. (Consultado en Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering)
16. Kuklík, P. 2011. Preconsolidation, structural strength of soil, and its effect on subsoil upper structure interaction. *Eng. Struct.* 33:1195–1204. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.041>
17. Li, B., Y. Chen, and J. Chen. 2016. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM). *Soil Tillage Res.* 158:177–185.
18. Lu, Y., A. M. Marshall, and I. Hajirasouliha. 2016. A simplified nonlinear sway-rocking model for evaluation of seismic response of structures on shallow foundations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 81:14–26. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.11.002>
19. Martínez Rodríguez Elena, 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal, *Anuario Jurídico y Económico Escorialense*, XXXVIII (2005) 315-332/ISSN:1133-3677
20. My li ski, A., and M. Wróblewski. 2016. Structural optimization of contact problems using Cahn–Hilliard model. *Comput. Struct.* Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794916300931>
21. Nakhaei, M., and M. A. Ghannad. 2008. The effect of soil – structure interaction on damage index of buildings. *Eng. Struct.* 30:1491–1499.
22. Porter, A. A., and Nelson, J. D. (1980). Strain controlled testing of soils. Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils, ASCE and Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng., Denver, June: 34-44. (Consultado en Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering)
23. Rodríguez-Tembleque, L., R. Abascal, and M. H. Aliabadi. 2010. A boundary element formulation for wear modeling on 3D contact and rolling-contact problems. *Int. J. Solids Struct.* 47:2600–2612.
24. Romero, A., P. Galvín, and J. Domínguez. 2013. 3D non-linear time domain FEM-BEM approach to soil-structure interaction problems. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 37:501–512.

25. Salvat, N., A. Batailly, and M. Legrand. 2016. Two-dimensional modeling of unilateral contact-induced shaft processional motions in bladed-disk/casing systems. *Int. J. Non. Linear. Mech.* 78:90–104. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.10.001>
26. Troshchenko, V.T., Tsybanev, G.V., Khotsyanovsky, A.O., 1994. Two-parameter model of fretting fatigue crack growth. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 17, 15–23.
27. Van der Merwe, D. H. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and the percentage clay fraction of soils. *Civil Eng. South Africa* 6:103-107. (Consultado en *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*).
28. Williams, M.L., 1952. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension. *J. Appl. Mech.* 19, 526–528.
29. Zéhil, G. P., and H. P. Gavin. 2013. Simple algorithms for solving steady-state frictional rolling contact problems in two and three dimensions. *Int. J. Solids Struct.* 50:843–852.
30. Zhi-hua, L. U. 2004. A new static mechanics model to solve contact problems an mechanical system*. *Appl. Math. Mech.* 25:1314–1322.
31. Zisis, T., P. a. Gourgiotis, K. P. Baxevanakis, and H. G. Georgiadis. 2014. Some basic contact problems in couple stress elasticity. *Int. J. Solids Struct.* 51:2084–2095. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.02.016>.

ANEXOS

Código APDL

```
/NOPR
  /PMETH,OFF,0
    KEYW,PR_SET,1
    KEYW,PR_STRUC,1
  /GO
/NOPR

!DATOS DEL MARCO
*CREATE,DATOS_MARCO

/PREP7
  MULTIPRO,'START',6
    *CSET,1,3,NNIV,'NUMERO DE NIVELES DEL MARCO',3
    *CSET,4,6,HNIV,'ALTURA DE UN NIVEL (M)',3
    *CSET,7,9,NCRUJ,'NUMERO DE CRUJIAS EN X',3
    *CSET,10,12,LCRUJ,'LONGITUD DE CRUJIA EN X(M)',6
    *CSET,13,15,NCRUJZ,'NUMERO DE CRUJIAS EN Z',3
    *CSET,16,18,LCRUJZ,'LONGITUD DE CRUJIA EN Z(M)',6
    *CSET,61,62,'INDIQUE DIMENSIONES',' GENERALES DEL MARCO'
  MULTIPRO,'END'
*END

!CARGAS DE LA ESTRUCTURA
*CREATE,CARGAS
  MULTIPRO,'START',3
    *CSET,1,3,CAZ,'CARGA VIVA AZOTEA (T/M2)',0.15
    *CSET,4,6,CENT,'CARGA VIVA ENTREPISO (T/M2)',0.25
    *CSET,7,9,CMPB,'C. MUERTA TOT LOSA CIM. (T/M2)',0.5
    *CSET,61,62,'INDIQUE CARGAS POR',' APLICAR SOBRE EL EDIFICIO'

  MULTIPRO,'END'
  NA=(NCRUJ*LCRUJ)+(NCRUJZ*LCRUJZ)
  *DIM,CM,,NNIV-1
```

```

*MSG,UI,
SE PROCEDE A INGRESAR LAS CARGAS MUERTAS %/&
POR PISO INICIANDO EN EL PRIMER NIVEL %/&

/ WAIT,2

*DO,J,1,NNIV-1,1
  *ASK,CML,CARGA PERMA. DE PISO %J% (TON),0.5
  *ASK,CML1,TIPO DE MURO(1:TABLAROCA 2:BLOCK),2
  *IF,CML1,EQ,1,THEN
    *ASK,ML,METROS DE MURO DEL NIVEL %J% (M),100
    CM(J)=(CML+ML*HNIV*.02)/NA
  *ELSE
    *ASK,ML,METROS DE MURO DEL NIVEL %J% (M),100
    CM(J)=(CML+ML*HNIV*.15)/NA
  *ENDIF
*ENDDO
*ASK,CFAC,FACTORIZAR CARGAS?(1:SI 2:NO),1

*END

!DATOS DEL MATERIAL Y SECCIONES UTILIZADAS EN LA ESTRUCTURA
*CREATE,MAT_SECC_M
  *ASK,MATCOL,MATERIAL COLUMNAS (1:CONCR 2:ACERO),1
  *IF,MATCOL,EQ,1,THEN
    MULTIPRO,'START',4
      *CSET,1,3,FC,'RESISTENCIA DE CONCRETO (KG/CM2)',300
      *CSET,4,6,MPOIC,'MODULO DE POISSON',0.10
      *CSET,7,9,PVOLC,'PESO VOL. CONCRETO (TON/M3)',2.40
      *CSET,10,12,COEXVC,'COEF. EXP. VOL. CONCRETO',1E-04
      *CSET,61,62,'PROPIEDADES DE ',' CONCRETO EN COLUMNAS'
    MULTIPRO,'END'
    MODULC=140000*SQRT(FC)

  *ASK,MATTR,MATERIAL TRABES (1:CONCR 2:ACERO),1
  *IF,MATTR,EQ,1,THEN
    MULTIPRO,'START',4
      *CSET,1,3,FCTR,'RESISTENCIA DE CONCRETO (KG/CM2)',250
      *CSET,4,6,MPOICTR,'MODULO DE POISSON',0.10
      *CSET,7,9,PVOLCTR,'PESO VOL. CONCRETO (TON/M3)',2.40
      *CSET,10,12,COEXVCTR,'COEF. EXP. VOL. CONCRETO',1E-04
      *CSET,61,62,'PROPIEDADES DE ',' CONCRETO EN TRABES'

```

MULTIPRO,'END'
 MODULCTR=140000*SQRT(FCTR)

MULTIPRO,'START',4
 *CSET,1,3,PERC,'PERALTE COLUMNAS (M)',0.50
 *CSET,4,6,ANC,'ANCHO COLUMNAS (M)',0.25
 *CSET,7,9,PERT,'PERALTE TRABES (M)',0.40
 *CSET,10,12,ANT,'ANCHO TRABES (M)',0.20
 *CSET,61,62,'DIMENSIONES DE ',' SECCIONES

SELECCIONADAS'

MULTIPRO,'END'

*ELSEIF,MATTR,EQ,2,THEN

MULTIPRO,'START',4
 *CSET,1,3,MODULATR,'MODULO DE ELASTICIDAD

(TON/M2)',2.1E+07

*CSET,4,6,MPOIATR,'MODULO DE POISSON',0.25
 *CSET,7,9,PVOLATR,'PESO VOL. ACERO (TON/M3)',7.8
 *CSET,10,12,COEXVATR,'COEF EXP VOL ACERO',1E-04
 *CSET,61,62,'PROPIEDADES DE ',' ACERO EN TRABES'

MULTIPRO,'END'

*ASK,TIPOSECT,SECCION TIPO (1:IPR 2:CAJA 3:TUBO),1

*IF,TIPOSECT,EQ,1,THEN

MULTIPRO,'START',6

*CSET,1,3,PERC,'PERALTE COLUMNAS (M)',0.50
 *CSET,4,6,ANC,'ANCHO COLUMNAS (M)',0.25
 *CSET,7,9,PERT,'PERALTE DE TRABES (M)',0.4
 *CSET,10,12,ANT,'ANCHO DE TRABES (M)',0.2
 *CSET,13,15,ESPT,'ESPESOR PATIN TRABES (M)',0.025
 *CSET,16,18,ESAT,'ESPESOR ALMA TRABES (M)',0.025
 *CSET,61,62,'DIMENSIONES DE ',' SECCIONES

SELECCIONADAS'

MULTIPRO,'END'

*ELSEIF,TIPOSECT,EQ,2,THEN

MULTIPRO,'START',5

*CSET,1,3,PERC,'PERALTE COLUMNAS (M)',0.50
 *CSET,4,6,ANC,'ANCHO COLUMNAS (M)',0.25
 *CSET,7,9,PERT,'PERALTE TRABES (M)',0.3
 *CSET,10,12,ANT,'ANCHO TRABES (M)',0.2
 *CSET,13,15,ESPT,'ESPESOR TRABES (M)',0.025

*CSET,61,62,'DIMENSIONES DE ',' SECCIONES

SELECCIONADAS'

MULTIPRO,'END'

*ELSEIF, TIPOSECT, EQ, 3, THEN

MULTIPRO,'START',4

*CSET, 1, 3, PERC, 'PERALTE COLUMNAS (M)', 0.50

*CSET, 4, 6, ANC, 'ANCHO COLUMNAS (M)', 0.25

*CSET, 7, 9, RIT, 'RADIO INT. TRABES (M)', 0.375

*CSET, 10, 12, RET, 'RADIO EXT. TRABES (M)', 0.4

*CSET, 61, 62, 'DIMENSIONES DE ', ' SECCIONES

SELECCIONADAS'

MULTIPRO,'END'

*ENDIF

*ENDIF

*ELSEIF, MATCOL, EQ, 2, THEN

MULTIPRO,'START',4

*CSET, 1, 3, MODULA, 'MOD. DE ELASTICIDAD (TON/M2)', 2.1E+07

*CSET, 4, 6, MPOIA, 'MODULO DE POISSON', 0.25

*CSET, 7, 9, PVOLA, 'PESO VOL. ACERO (TON/M3)', 7.8

*CSET, 10, 12, COEXVA, 'COEF EXP VOL ACERO', 1E-04

*CSET, 61, 62, 'PROPIEDADES DE ', ' ACERO EN COL. Y TRABES'

MULTIPRO,'END'

*ASK, TIPOSEC, SECCION TIPO (1:IPR 2:CAJA 3:TUBO), 1

*IF, TIPOSEC, EQ, 1, THEN

MULTIPRO,'START',8

*CSET, 1, 3, PERC, 'PERALTE DE COLUMNAS (M)', 0.5

*CSET, 4, 6, ANC, 'ANCHO DE COLUMNAS (M)', 0.25

*CSET, 7, 9, ESPC, 'ESPESOR PATIN COLUMNAS (M)', 0.025

*CSET, 10, 12, ESAC, 'ESPESOR ALMA COLUMNAS (M)', 0.025

*CSET, 13, 15, PERT, 'PERALTE DE TRABES (M)', 0.4

*CSET, 16, 18, ANT, 'ANCHO DE TRABES (M)', 0.2

*CSET, 19, 21, ESPT, 'ESPESOR PATIN TRABES (M)', 0.025

*CSET, 22, 24, ESAT, 'ESPESOR ALMA TRABES (M)', 0.025

*CSET, 61, 62, 'DIMENSIONES DE ', ' SECCIONES

SELECCIONADAS'

MULTIPRO,'END'

*ELSEIF, TIPOSEC, EQ, 2, THEN

MULTIPRO,'START',6

*CSET, 1, 3, PERC, 'PERALTE COLUMNAS (M)', 0.3

*CSET, 4, 6, ANC, 'ANCHO COLUMNAS (M)', 0.3

*CSET, 7, 9, ESPC, 'ESPESOR COLUMNAS (M)', 0.025

*CSET, 10, 12, PERT, 'PERALTE TRABES (M)', 0.3

*CSET, 13, 15, ANT, 'ANCHO TRABES (M)', 0.2

```

*CSET,16,18,ESPT,'ESPESOR TRABES (M)',0.025

*CSET,61,62,'DIMENSIONES DE ',' SECCIONES
SELECCIONADAS'
MULTIPRO,'END'

*ELSEIF,TIPOSEC,EQ,3,THEN
MULTIPRO,'START',4
*CSET,1,3,RIC,'RADIO INT. COLUMNAS (M)',0.475
*CSET,4,6,REC,'RADIO EXT. COLUMNAS (M)',0.5
*CSET,7,9,RIT,'RADIO INT. TRABES (M)',0.375
*CSET,10,12,RET,'RADIO EXT. TRABES (M)',0.4
*CSET,61,62,'DIMENSIONES DE ',' SECCIONES
SELECCIONADAS'
MULTIPRO,'END'
*ENDIF
*ENDIF
*END

!DATOS DE LOSAS DE ENTREPISO, AZOTEA Y LOSA DE CIMENTACIÓN
*CREATE,DATOS_LOSA
MULTIPRO,'START',5
*CSET,1,3,PERL,'PERALTE DE LA LOSA (M)',0.10
*CSET,4,6,PVOLL,'PESO VOLUMETRICO LOSA (T/M3)',2.4
*CSET,7,9,FCL,'RESISTENCIA DEL CONCRETO (KG/CM2)',250
*CSET,10,12,MPOICL,'MODULO DE POISSON',0.10
*CSET,13,15,COEFVCL,'COEF. EXP. VOL. CONCRETO',1E-04
*CSET,61,62,'PROPIEDADES DE LOSAS ',' DE ENTREPISO Y AZOTEA'
MULTIPRO,'END'
MODULCL=140000*SQRT(FCL)

MULTIPRO,'START',3
*CSET,1,3,CAPMAX,'CAP. CARGA DEL SUELO (T/M2)',10
*CSET,4,6,KSUELO,'MOD. REACCION DEL SUELO (T/M3)',2000
*CSET,7,9,PERLZ,'PERALTE LOSA CIMENTACION (M)',0.30
*CSET,61,62,'PARAMETROS DE LOSA ',' DE CIMENTACION Y SUELO'
MULTIPRO,'END'
*END

!GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA
*CREATE,GEOMETRIA

```

```

K,1,0,0,0
K,NCRUJ+1,LCRUJ*NCRUJ,0,0
*IF,NCRUJ,GT,1,THEN
    KFILL
    KGEN,NNIV+1,1,NCRUJ+1,1, ,HNIV
*ELSE
    KGEN,NNIV+1,1,NCRUJ+1,1, ,HNIV
*ENDIF

```

```

!LINEAS MARCOS EN EJES X-Y
L,1,NCRUJ+2
LGEN,NNIV,1,1,1, ,HNIV
*GET,LINS1,LINE,0,COUNT
LGEN,NCRUJ+1,1,LINS1,1,LCRUJ
L,NCRUJ+2,NCRUJ+3
*GET,LINS2,LINE,0,COUNT
LGEN,NCRUJ,LINS2,LINS2,1,LCRUJ
*GET,LINS3,LINE,0,COUNT
LGEN,NNIV,LINS2,LINS3,1,,HNIV
*GET,LIFI,LINE,0,COUNT
LGEN,NCRUJZ+1,1,LIFI,1,,,-LCRUJZ
NUMMRG,KP
NUMCMP,KP

```

```

!LINEAS MARCOS EN EJES Z-Y
L,NCRUJ+2,(NCRUJ+1)*(NNIV+1)+2
*GET,LINS4,LINE,0,COUNT
LGEN,NCRUJZ,LINS4,LINS4,1,,,-LCRUJZ
*GET,LINS5,LINE,0,COUNT
LGEN,NNIV,LINS4,LINS5,1,,HNIV
*GET,LINS6,LINE,0,COUNT
LGEN,NCRUJ+1,LINS4,LINS6,1,LCRUJ
NUMMRG,KP
NUMCMP,KP
NUMCMP,LINE
*END

```

```

!CREACION DE AREAS PARA LOSAS
*CREATE,LOSAS
AL,LINS2,LINS6+1,LIFI+LINS2,LINS4
AGEN,NCRUJ,1,1,1,LCRUJ
*GET,A1,AREA,0,COUNT
AGEN,NCRUJZ,1,A1,1,,,-LCRUJZ

```

```
*GET,A2,AREA,0,COUNT
AGEN,NNIV,1,A2,1,,HNIV
NUMCMP,KP
NUMMRG,KP
GPLOT
*END

!AREAS PARA CIMENTACION
*CREATE,CIMENTACION
AGEN,2,1,A2,1,,-(HNIV+PERL/2)
  NUMMGR,ALL
  NUMCMP,ALL
*END

!ASIGNACION DE PROPIEDADES MARCO
*CREATE,PREP_MALLA_M
  *IF,MATCOL,EQ,1,THEN
    !COLUMNAS CONCRETO
    SECNUM,1
    SECTYPE,1,BEAM,RECT
    SECDATA,ANC,PERC,2,2
    *IF,MATTR,EQ,1,THEN
      !TRABES CONCRETO
      SECNUM,2
      SECTYPE,2,BEAM,RECT
      SECDATA,ANT,PERT,2,2

    *ELSEIF,MATTR,EQ,2,THEN
      *IF,TIPOSECT,EQ,1,THEN
        !TRABES ACERO IPR
        SECNUM,2
        SECTYPE,2,BEAM,I
        SECDATA,ANT,ANT,PERT,ESPT,ESPT,ESAT

      *ELSEIF,TIPOSECT,EQ,2,THEN
        !TRABES ACERO CAJA
        SECNUM,2
        SECTYPE,2,BEAM,HREC
        SECDATA,ANT,PERT,ESPT,ESPT,ESPT,ESPT

    *ELSEIF,TIPOSECT,EQ,3,THEN
```

```
      !TRABES ACERO TUBO
      SECNUM,2
      SECTYPE,2,BEAM,CTUBE
      SECDATA,RIT,RET,8
      *ENDIF
    *ENDIF
  *ELSEIF,MATCOL,EQ,2,THEN
    *IF,TIPOSEC,EQ,1,THEN
      !COLUMNAS ACERO IPR
      SECNUM,1
      SECTYPE,1,BEAM,I
      SECDATA,ANC,ANC,PERC,ESPC,ESPC,ESAC
      !TRABES ACERO IPR
      SECNUM,2
      SECTYPE,2,BEAM,I
      SECDATA,ANT,ANT,PERT,ESPT,ESPT,ESAT

    *ELSEIF,TIPOSEC,EQ,2,THEN
      !COLUMNAS ACERO CAJA
      SECNUM,1
      SECTYPE,1,BEAM,HREC
      SECDATA,ANC,PERC,ESPC,ESPC,ESPC,ESPC
      !TRABES ACERO CAJA
      SECNUM,2
      SECTYPE,2,BEAM,HREC
      SECDATA,ANT,PERT,ESPT,ESPT,ESPT,ESPT

    *ELSEIF,TIPOSEC,EQ,3,THEN
      !COLUMNAS ACERO TUBO
      SECNUM,1
      SECTYPE,1,BEAM,CTUBE
      SECDATA,RIC,REC,8
      !TRABES ACERO TUBO
      SECNUM,2
      SECTYPE,2,BEAM,CTUBE
      SECDATA,RIT,RET,8
    *ENDIF
  *ENDIF
*END

!CREACION ELEMENTOS MARCO
*CREATE,MALLADO_MARCO
  NDI = 15
```

ET,1,BEAM188

```

*IF,MATCOL,EQ,1,THEN
  MP,EX,1,MODULC
  MP,PRXY,1,MPOIC
  MP,DENS,1,PVOLC/9.81
  MP,ALPX,1,COEXVC
  *IF,MATTR,EQ,1,THEN
    MP,EX,2,MODULCTR
    MP,PRXY,2,MPOICTR
    MP,DENS,2,PVOLCTR/9.81
    MP,ALPX,2,COEXVCTR
  *ELSEIF,MATTR,EQ,2,THEN
    MP,EX,2,MODULATR
    MP,PRXY,2,MPOIATR
    MP,DENS,2,PVOLATR/9.81
    MP,ALPX,2,COEXVATR
  *ENDIF
*ELSEIF,MATCOL,EQ,2,THEN
  MP,EX,1,MODULA
  MP,PRXY,1,MPOIA
  MP,DENS,1,PVOLA/9.81
  MP,ALPX,1,COEXVA

  MP,EX,2,MODULA
  MP,PRXY,2,MPOIA
  MP,DENS,2,PVOLA/9.81
  MP,ALPX,2,COEXVA
*ENDIF
LESIZE,ALL,,NDI

```

!PLANO X-Y

```

*DO,I,0,NCRUJZ,1
  K,I+10000,-1,(NNIV*HNIV)+1,-I*LCRUJZ
  !TRABES
  LSEL,S,LOC,Z,-I*LCRUJZ
  *DO,J,0,NCRUJ,1
    LSEL,U,LOC,X,J*LCRUJ
  *ENDDO
  LSEL,U,LOC,Y,-(PERL/2)
  LATT,2,,1,,I+10000,2
  LSEL,ALL

  !COLUMNAS
  LSEL,S,LOC,Z,-I*LCRUJZ

```

```
*DO,J,0,NNIV,1
      LSEL,U,LOC,Y,J*HNIV
*ENDDO
LSEL,U,LOC,Y,-(PERL/2)
LATT,1,,1,,I+10000,1
LSEL,ALL
*ENDDO

!PLANO TRABES Z-Y
*DO,I,0,NCRUJ,1
      K,I+20000,I*LCRUJ,(NNIV*HNIV)+1,1
      LSEL,S,LOC,X,I*LCRUJ
*DO,J,0,NCRUJZ,1
      LSEL,U,LOC,Z,-J*LCRUJZ
*ENDDO
LSEL,U,LOC,Y,-(PERL/2)
LATT,2,,1,,I+20000,2
LSEL,ALL
*ENDDO
LMESH,ALL
*END
```

```
*CREATE,PREP_MALLA_L
      ET,2,SHELL63
      R,1,PERL
      R,2,PERLZ

      MP,EX,3,MODULCL
      MP,PRXY,3,MPOICL
      MP,DENS,3,PVOLL/9.81
      MP,ALPX,3,COEFVCL

      SECNUM,3
      SECTYPE,3,SHELL
      SECDATA,PERL,3

      !TOTAL DE ELEMENTOS BARRA
      *GET,ELEMB,ELEM,0,COUNT
*END
```

```
!MALLADO LOSAS DE ENTREPISO Y AZOTEA
```

```
*CREATE,MALLADO_LOSAS
  MSHAPE,0,2D
  MSHKEY,1
  ASEL,S,AREA,,ALL
  ASEL,U,LOC,Y,-(PERL/2)
  AATT,3,1,2,,3
  AMESH,ALL
  ASEL,ALL
*END
```

```
*CREATE,CON_FRON
  FINISH
  /SOLU
  ANTYPE,0
  ACEL,,9.81

  *IF,CFAC,EQ,1,THEN
    ASEL,S,LOC,Y,HNIV*NNIV
    SFA,ALL,2,PRES,CAZ*1.40
    ASEL,ALL
    *DO,I,1,NNIV-1,1
      ASEL,S,LOC,Y,HNIV*I
      SFA,ALL,2,PRES,(CENT+CM(I))*1.40
      ASEL,ALL
    *ENDDO
  APLOT
  *GET,NUMEL,ELEM,0,NUM,MAX
  /TITLE,MARCO EN 3D. %NUMEL% ELEMENTOS FINITOS

  !PLOTEAR LAS PRESIONES
  /PSF,PRES,NORM,2,0,1
  /PBC,ALL, ,1
  EPLT

  *ELSEIF,CFAC,EQ,2,THEN
    ASEL,S,LOC,Y,HNIV*NNIV
    SFA,ALL,2,PRES,CAZ
    *DO,I,1,NNIV-1,1
      ASEL,S,LOC,Y,HNIV*I
      SFA,ALL,2,PRES,CENT+CM(I)
      ASEL,ALL
    *ENDDO
  APLOT
  *GET,NUMEL,ELEM,0,NUM,MAX
```

```
/TITLE,MARCO EN 3D. %NUMEL% ELEMENTOS FINITOS

!PLOTAR LAS PRESIONES
/PSF,PRES,NORM,2,0,1
/PBC,ALL, ,1
EPLOT
*ENDIF
*END

*CREATE,PLACA_CIM
  FINISH
  /PREP7
  NSEL,ALL
  *GET,NODET,NODE,0,COUNT
  ESLA
  *GET,ETOT1,ELEM,0,COUNT
  ETOT2=ETOT1/NNIV
  !COPIA PRIMER NIVEL A LOSA DE CIMENTACION
  EGEN,2,NODET,ELEMB+1,ELEMB+ETOT2,1,,1,,,-(HNIV)
  NUMMRG,NODE
  NUMCMP,NODE
  ASEL,ALL
  ESEL,ALL
  EPLOT
  NUMMRG,NODE
  NUMCMP,NODE
*END

*CREATE,CARGAS_CIM
  *IF,CFAC,EQ,1,THEN
    ESEL,S,ELEM,,ELEMB+ETOT1+1,ELEMB+ETOT1+ETOT2,1

    SFE,ALL,2,PRES,,(CMPB)*1.40
    ESEL,ALL
    EPLOT
  *ELSEIF,CFAC,EQ,2,THEN
    ESEL,S,ELEM,,ELEMB+ETOT1+1,ELEMB+ETOT1+ETOT2,1

    SFE,ALL,2,PRES,,CMPB
    ESEL,ALL
    EPLOT
```

```

*ENDIF
*END

*CREATE,SOPORTE
  *GET,NODET2,NODE,0,COUNT
  N,NODET2+1,0,-0.5,0                                !CREA PRIMER NODO
PARA RESORTE
  AR1=(LCRUJ*LCRUJZ)/(NDI*NDI)                        !AREA DE CADA CUADRO
  AT1=(KSUELO*AR1*0.5)/MODULCL                       !AREA TRIB PARA
RESORTES INTERNOS
  AT2=0.5*(KSUELO*AR1*0.5)/MODULCL                 !AREA TRIB PARA RESORTES
BORDES
  AT3=0.25*(KSUELO*AR1*0.5)/MODULCL                !AREA TRIB PARA RESORTES
ESQUINAS

  ET,3,LINK180                                       !ELEMENTO PARA EL
RESORTE
  R,3,AT1
  R,4,AT2
  R,5,AT3

  TYPE,3
  REAL,3
  MAT,3

  !GENERACION DE SOPORTES EN LA LOSA DE CIMENTACION
  E,NODET2+1,1
  *GET,ELEK1,ELEM,0,COUNT
  EGEN,(NCRUJ*NDI)+1,NODET2+2,ELEK1,ELEK1,1,,,,,LCRUJ/NDI
  NUMMRG,NODE
  NUMCMP,NODE
  *GET,ELEK2,ELEM,0,COUNT
  *GET,NODET3,NODE,0,COUNT

  EGEN,(NCRUJZ*NDI)+1,NODET3+1,ELEK1,ELEK2,1,,,,,-LCRUJZ/NDI
  NUMMRG,NODE
  NUMCMP,NODE
  *GET,ELEK4,ELEM,0,COUNT
  ELEK3=ELEK4-(NCRUJ*NDI)

  ESEL,S,TYPE,,3

  !AREAS ESQUINAS

```

```

ESEL,S,ELEM,,ELEK1,ELEK2,1
ESEL,A,ELEM,,ELEK1,ELEK3,(NCRUJ*NDI)+1
ESEL,A,ELEM,,ELEK2,ELEK4,(NCRUJ*NDI)+1
ESEL,A,ELEM,,ELEK3,ELEK4,1
EMODIF,ALL,REAL,4
!ASIGNA MEDIA AREA
!AREAS BORDE
ESEL,R,ELEM,,ELEK1,ELEK2,(NCRUJ*NDI)
ESEL,A,ELEM,,ELEK3,ELEK4,(NCRUJ*NDI)
EMODIF,ALL,REAL,5
!ASIGNA CUARTO DE
AREA

ESEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Z,-(NCRUJZ*LCRUJZ)
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE
NUMCMP,NODE
SAVE,TRES
*END

*CREATE,EXPANSION
MULTIPRO,'START',1
    *CSET,1,3,SOEX,'EXPANSION DEL SUELO(1:SI 2:NO)',1
MULTIPRO,'END'
*IF,SOEX,EQ,1,THEN
    *USE,SELEC_LINKS
    *USE,SUJETA_LINKS
    *USE,SOLUCION
    *USE,FZA_SOP
    *USE,ESF_CONT
*ELSE
    RNUM=0
    *USE,SUJETA_LINKS

```

```
*USE,SOLUCION
*USE,FZA_SOP
*USE,ESF_CONT
*ENDIF
*END

*CREATE,SUJETA_LINKS
  FINISH
  /SOLU
*IF,RNUM,EQ,0,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,-0.5
  D,ALL,ALL
  NSEL,ALL
*ELSE
  NSEL,S,LOC,Y,-0.5
  NSEL,U,D,UY,DISP
  NSEL,U,D,UY,0.75*DISP
  NSEL,U,D,UY,0.5*DISP
  NSEL,U,D,UY,0.25*DISP
  D,ALL,ALL
  NSEL,ALL
*ENDIF
*END

*CREATE,SOLUCION
  ESEL,ALL
  NSEL,ALL
  FINISH
  /SOLU
  SOLVE
*END

*CREATE,FZA_SOP
  FINISH
  /POST1
  ESEL,ALL
  *GET,TOTEL,ELEM,0,COUNT
  *DIM,NORMS,,TOTEL
  ESEL,ALL
```

```
ESEL,S,REAL,,3,5,1
ETABLE,FSOP,SMISC,1

!VECTOR DE ALMACENAMIENTO DE LAS NORMALES DE SOPORTES
*VGET,NORMS,ELEM,,ETAB,FSOP
*END

*CREATE,ESF_CONT
  FINISH
  /POST1
  !VECTOR NORMS CONTIENE LAS NORMALES DE LINKS
  !AREAS TRIB SOPORTES INT-BORD-ESQ: AR1 0.5AR1 0.25AR1
  ESEL,ALL
  *DIM,ESFCON,,TOTEL
  !LINKS ESQUINAS
  ESEL,S,REAL,,5
  *DO,J,1,TOTEL,1
    *IF,ESEL(J),EQ,1,THEN
      ESFCON(J)=NORMS(J)/(0.25*AR1)
    *ENDIF
  *ENDDO

  !LINKS BORDES
  ESEL,ALL
  ESEL,S,REAL,,4
  *DO,J,1,TOTEL,1
    *IF,ESEL(J),EQ,1,THEN
      ESFCON(J)=NORMS(J)/(0.5*AR1)
    *ENDIF
  *ENDDO

  !LINKS INTERNOS
  ESEL,ALL
  ESEL,S,REAL,,3
  *DO,J,1,TOTEL,1
    *IF,ESEL(J),EQ,1,THEN
      ESFCON(J)=NORMS(J)/AR1
    *ENDIF
  *ENDDO
  ESEL,ALL
```

```
!VECTOR ESFCON CONTIENE LOS ESFUERZOS DE CONTACTO DE LA
CIMENTACION
!IMPRESION DE RESULTADOS:
MULTIPRO,'START',1
    *CSET,1,3,FOTOS,'IMPRIMIR RESULTADOS (1:SI 2:NO)',2
MULTIPRO,'END'
*IF,FOTOS,EQ,1,THEN
    JPGPRF,800,100,1
    /SHOW,JPEG
*ENDIF

!VISUALIZACION
/VIEW,1,1,2,3
ETABLE,ADIF,VOLU
*VPUT,ESFCON,ELEM,,ETAB,ADIF
/TITLE,ESFUERZOS DE CONTACTO SOBRE LA CIMENTACION (T/M2)
PLLS,ADIF,ADIF,-1
/WAIT,3
*END

*CREATE,ESF_CONT_MAX
ESEL,ALL
ECMAX1=0
*DO,I,1,TOTEL,1
    *IF,ECMAX1,LT,-1*ESFCON(I),THEN
        ECMAX1 = -1*ESFCON(I)
    *ENDIF
*ENDDO
/TITLE,ESFUERZOS DE CONTACTO MAXIMO SOBRE LA CIMENTACION ES
%ECMAX1% (T/M2)
*END

*CREATE,SELEC_LINKS
FINISH
/PREP7
DISP=0.1
MULTIPRO,'START',1
    *CSET,1,3,SELEM,'SELEC DE LINK(1:RAND 2:MANUAL)',1
MULTIPRO,'END'
*IF,SELEM,EQ,1,THEN
    RNUM=NINT(RAND(ELEK1,ELEK4))
*ELSE
```

```
MULTIPRO,'START',1
      *CSET,1,3,RNUM,'NUMERO DE LINK',ELEK1
MULTIPRO,'END'
*ENDIF

*GET,NODET4,NODE,0,COUNT
TNP=NODET4-NODET2
*VGET,COX,NODE,,LOC,X
*VGET,COZ,NODE,,LOC,Z
*DIM,COOR,,TNP,3
K=1
EMTO=ELEK1
*DO,I,1,TNP,1
      COOR(K,1)=EMTO
      COOR(K,2)=COX(NODET2+I)
      COOR(K,3)=ABS(COZ(NODET2+I))
      K=K+1
      EMTO=EMTO+1
*ENDDO

SPX=LCRUJ/NDI
SPZ=LCRUJZ/NDI

EL=1+RNUM-ELEK1
*DIM,CT,,2
CT(1)=COOR(EL,2)
CT(2)=COOR(EL,3)

FINISH
/SOLU

ESEL,S,ELEM,,RNUM
NSLE
!INSEL,R,LOC,Y,-0.5
D,ALL,UY,DISP
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

*DO,I,1,3,1
      *IF,I,EQ,1,THEN
          NSEL,S,LOC,X,CT(1)-SPX*I,CT(1)+SPX*I,SPX
          NSEL,R,LOC,Z,-CT(2)-SPZ*I,-CT(2)+SPZ*I,SPZ
          NSEL,R,LOC,Y,-0.5
          NSEL,U,NODE,,NODET2+EL
```

```
ESLN
NSLE
D,ALL,UY,0.75*DISP
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
*ELSEIF,I,EQ,2,THEN
NSEL,S,LOC,X,CT(1)-SPX*I,CT(1)+SPX*I,SPX
NSEL,R,LOC,Z,-CT(2)-SPZ*I,-CT(2)+SPZ*I,SPZ
NSEL,R,LOC,Y,-0.5
NSEL,U,NODE,,NODET2+EL
NSEL,U,D,UY,0.75*DISP
ESLN
NSLE
D,ALL,UY,0.50*DISP
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
*ELSEIF,I,EQ,3,THEN
NSEL,S,LOC,X,CT(1)-SPX*I,CT(1)+SPX*I,SPX
NSEL,R,LOC,Z,-CT(2)-SPZ*I,-CT(2)+SPZ*I,SPZ
NSEL,R,LOC,Y,-0.5
NSEL,U,NODE,,NODET2+EL
NSEL,U,D,UY,0.75*DISP
NSEL,U,D,UY,0.50*DISP
!ESLN
!NSLE
D,ALL,UY,0.25*DISP
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
*ENDIF
*ENDDO
*END

*CREATE,RESULTADOS
FINISH
/POST1
!CONFIGURACION DEFORMADA DE LA ESTRUCTURA
SET,1
/TITLE,CONFIGURACION DEFORMADA DEL MARCO
PLDISP,2
/WAIT,1
```

*COEF=(PERL **2)/6*

!MOMENTOS EN LOSAS:

ESLA

/TITLE,ESFUERZOS SX (T/M2). MOMENTOS X = %COEF% x SX (T-M)

/EFACET,1

PLNSOL, S,X, 0,1.0

/WAIT,1

/TITLE,ESFUERZOS SY (T/M2). MOMENTOS Y = %COEF% x SY (T-M)

/EFACET,1

PLNSOL, S,Z, 0,1.0

/WAIT,1

ESEL,ALL

ESEL,S,REAL, ,2

/TITLE,ESFUERZOS SX (T/M2). MOMENTOS X = %COEF% x SX (T-M) CIM

/EFACET,1

PLNSOL, S,X, 0,1.0

/WAIT,1

/TITLE,ESFUERZOS SY (T/M2). MOMENTOS Y = %COEF% x SY (T-M) CIM

/EFACET,1

PLNSOL, S,Z, 0,1.0

ESEL,ALL

/WAIT,1

!ELEMENTOS MECANICOS DE LA ESTRUCTURA

ESEL,S,TYPE,,1

/ESHAPE,0

/EFACET,1

ETABLE,NI,SMISC,1

ETABLE,NF,SMISC,14

ETABLE,MIX,SMISC,4

ETABLE,MFX,SMISC,17

ETABLE,MIY,SMISC,2

ETABLE,MFY,SMISC,15

ETABLE,MIZ,SMISC,3

ETABLE,MFZ,SMISC,16

ETABLE,VIY,SMISC,6

ETABLE,VFY,SMISC,19

ETABLE,VIZ,SMISC,5
ETABLE,VFZ,SMISC,18

AVPRINT,0
/TITLE,FZAS NORMALES MARCO (TON)
PLLS,NI,NF,-1
/WAIT,1

AVPRINT,0
*/TITLE,MOMENTOS TORSIONANTES EN X (TON*M)*
PLLS,MIX,MFX,-1
/WAIT,1

AVPRINT,0
*/TITLE,MOMENTOS FLEXIONANTES EN Y (TON*M)*
PLLS,MIY,MFY,-1
/WAIT,1

AVPRINT,0
*/TITLE,MOMENTOS FLEXIONANTES EN Z (TON*M)*
PLLS,MIZ,MFZ,-1
/WAIT,1

AVPRINT,0
/TITLE,FZAS CORTANTES MARCO EN Y (TON)
PLLS,VIY,VFY,-1
/WAIT,1

AVPRINT,0
/TITLE,FZAS CORTANTES MARCO EN Z (TON)
PLLS,VIZ,VFZ,-1
/WAIT,1
ESEL,ALL

**END*

**USE,DATOS_MARCO*
**USE,CARGAS*
**USE,MAT_SECC_M*
**USE,DATOS_LOSA*
**USE,GEOMETRIA*

**USE,LOSAS*
*!*USE,CIMENTACION*
**USE,PREP_MALLA_M*
**USE,MALLADO_MARCO*
**USE,PREP_MALLA_L*
**USE,MALLADO_LOSAS*
**USE,CON_FRON*
**USE,PLACA_CIM*
**USE,CARGAS_CIM*
**USE,SOPORTE*
**USE,EXPANSION*
*!*USE,RESULTADOS*