

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

**“Estudio de la interacción suelo-
estructura en el rango elástico e
inelástico de una zapata aislada
mediante modelos físicos a escala y
mediante elementos finitos”**

Ing. Mary Yorley González Sandoval

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2015

“Estudio de la interacción suelo-estructura en el rango elástico e inelástico de una zapata aislada mediante modelos físicos a escala y mediante elementos finitos”

Ing. Mary Yorley González Sandoval

Trabajo de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural

Director:
Ing. Jaime Erasmo Garzón Moreno

Línea de Profundización

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado “Estudio de la interacción suelo-estructura en el rango elástico e inelástico de una zapata aislada mediante modelos físicos a escala y mediante elementos finitos” presentado por Mary Yorley González Sandoval, en cumplimiento del requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería estructural, fue aprobado por el director del proyecto dirigido y por el jurado correspondiente.

Ing. Jaime Erasmo Garzón Moreno

I.C.

Director del trabajo de grado

Ing. Sandra Rocío Jerez Barbosa

Ph.D.

Jurado

Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra

Ph.D.Msc

Jurado

Bogotá D.C. Febrero de 2015

DEDICATORIA

A Dios por haberme llenado de fe,
por darme la oportunidad,
la fortaleza y la perseverancia para
culminar esta meta tan importante en mi vida.

A mis padres y mi esposo por éste apoyo incondicional,
a mis hermanos y amigos que siempre creyeron en mí.

MARY YORLEY GONZÁLEZ SANDOVAL

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios, por permitirme no desfallecer en los momentos de crisis durante estos largos años de estudio, sacrificio y entrega. Hoy siento mi corazón lleno de satisfacción por haber cumplido esta meta, ser Magister en Ingeniería civil con énfasis en Ingeniería estructural.

A mi madre y a mi padre (QEPD), por nunca haber perdido la fé y ese apoyo incondicional durante el avance de mi formación, facilitándome siempre los medios para alcanzar el éxito, sin su ayuda hubiera sido imposible.

A mi esposo, por haber creído en mí, por su paciencia y apoyo en todo momento de la mano de Dios.

Al Doctor German Ricardo Santos Granados por haber confiado en mí y haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de grado.

A los ingenieros Pedro Nel Quiroga y Nancy Torres, docentes de la Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito, por todos sus aportes y enseñanzas para llegar a los resultados de este trabajo.

Al Ingeniero Jaime Garzón, docente de la Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito, por su guía, sus aportes y la confianza que fueron de vital importancia en el desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero Mauricio Moreno Herrán, por sus aportes y trabajo en equipo para el desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero Diego Alejandro Sequera Gutiérrez, egresado de la Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá, por su asesoría y enseñanzas durante el modelamiento en el programa ANSYS.

Al señor Ramón Torres, auxiliar de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por su dedicación y apoyo incondicional durante la realización de los ensayos de laboratorio.

A las ingenieras Sandra Campagnoli y Claudia Rios Reyes por sus aportes y colaboración con el Laboratorio de Suelos para la obtención de importantes resultados.

A todas aquellas personas que de una u otra forma, hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Contenido

Pág.

Contenido	VII
Lista de Figuras	VIII
Lista de tablas	XIII
1. OBJETIVOS	4
1.1. General.....	4
1.2. Específicos	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
3. METODOLOGÍA	20
4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL	22
4.1. Análisis platina 3/8" sobre resortes.....	26
4.2. Análisis platina 1/4" sobre resortes.....	32
4.3. Análisis platina 3/8" sobre recebo.....	37
4.4. Análisis platina 1/4" sobre recebo.....	44
5. ANÁLISIS MATEMÁTICO	51
5.1. Modelo platinas sobre resortes.....	52
5.1.1. Platina 1/4" y 3/8" sobre resortes	55
5.2. Modelo platinas sobre recebo.....	63
5.2.1. Platina 1/4" sobre recebo	71
5.2.2. Platina 3/8" sobre recebo	77
5.2.3. Análisis de los datos de entrada	83
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
6.1. Conclusiones.....	90
6.2. Recomendaciones	91
7. BIBLIOGRAFÍA.....	93
8. ANEXOS.....	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2-1: Distribución de presiones en zapatas.....	6
Figura 2-2: Evaluación de los coeficientes de Balastro	10
Figura 2-3: Estructura del ensayo de un modelo físico (zapatas aisladas).....	17
Figura 2-4: Estructura del ensayo para cimentación aislada (zapatas en concreto)	18
Figura 2-5: Estructura del ensayo análisis de zapatas aisladas sobre resortes (verificación según NSR-10)	18
Figura 3-1: Modelo tipo de platina metálica sobre resortes.....	20
Figura 3-2: Modelo tipo de platina metálica sobre recebo.....	21
Figura 3-3: Diagrama unifilar de modelamiento para SAP2000 y ANSYS.....	21
Figura 4-1: Proceso del ensayo a compresión en un resorte tipo.....	22
Figura 4-2: Construcción de muertos de concreto.....	23
Figura 4-3: Excavación de material natural.....	24
Figura 4-4: Compactación inicial, intermedia y final del material de relleno	24
Figura 4-5: Instalación de columnas IPE360	25
Figura 4-6: Armado de viga IPE360.....	25
Figura 4-7: Montaje de viga IPE360.....	26
Figura 4-8: Anclaje de viga IPE360.....	26
Figura 4-9: Base metálica con resortes 1.....	27
Figura 4-10: Ensayo a compresión de la platina 3/8" apoyada sobre resortes.....	27
Figura 4-11: Deformación de la platina 3/8" apoyada sobre resortes	28
Figura 4-12: Deformación de los resortes 1.....	28
Figura 4-13: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 3/8" sobre resortes.....	29
Figura 4-14: Deformación observada en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes	30
Figura 4-15: Gráfica de carga (kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes	30
Figura 4-16: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes	31
Figura 4-17: Base metálica con resortes 2	32
Figura 4-18: Ensayo a compresión de la platina 1/4" apoyada sobre resortes.....	32

Figura 4-19: Deformación de la platina 1/4" apoyada sobre resortes	33
Figura 4-20: Deformación de los resortes 2.....	33
Figura 4-21: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 1/4" sobre resortes	34
Figura 4-22: Deformación observada en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes	35
Figura 4-23: Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes	35
Figura 4-24: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes	36
Figura 4-25: Platina 3/8" sobre recebo.....	37
Figura 4-26: Toma de muestra para densidad y compactación del recebo 1	38
Figura 4-27: Instalación de deformímetros en platina 3/8"	38
Figura 4-28: Deformación en viga IPE360 durante el ensayo de platina 3/8".....	39
Figura 4-29: Deformación del recebo y platina durante el ensayo de platina 3/8.....	39
Figura 4-30: Fisuración en el recebo durante el ensayo de platina 3/8	39
Figura 4-31: Zonas de sobreesfuerzo en la platina 3/8 después del ensayo.....	40
Figura 4-32: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 3/8" sobre recebo	41
Figura 4-33: Deformación observada en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo	42
Figura 4-34: Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo	42
Figura 4-35: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo	43
Figura 4-36: Platina 1/4" sobre recebo.....	44
Figura 4-37: Toma de muestra para densidad y compactación del recebo 2	44
Figura 4-38: Deformación en viga IPE360 durante el ensayo de platina 1/4".....	45
Figura 4-39: Deformación del recebo y platina durante el ensayo de platina 1/4.....	45
Figura 4-40: Fisuración en el recebo durante el ensayo de platina 1/4	45
Figura 4-41: Zonas de sobreesfuerzo en la platina 1/4 después del ensayo.....	46
Figura 4-42: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 1/4" sobre recebo	47

Figura 4-43: <i>Deformación observada en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo</i>	48
Figura 4-44: <i>Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo</i>	49
Figura 4-45: <i>Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo</i>	50
Figura 5-1: <i>Geometría de la platina de 630 mm x 630 mm en espesores de 1/4" y 3/8"</i>	52
Figura 5-2: <i>Propiedades del acero A-36</i>	53
Figura 5-3: <i>Herramienta "Spring" y sus parámetros de entrada</i>	53
Figura 5-4: <i>Resortes ubicados en el modelo de platina 1/4" y 3/8"</i>	54
Figura 5-5: <i>Mallado del modelo de platina 1/4" y 3/8"</i>	54
Figura 5-6: <i>Condiciones de frontera del modelo de platina 1/4" y 3/8"</i>	55
Figura 5-7: <i>Esfuerzos generados sobre la platina 1/4" y 3/8"</i>	56
Figura 5-8: <i>Deformación generada en la platina 1/4" y 3/8"</i>	56
Figura 5-9: <i>Ubicación de deformímetros en la platina 1/4" y 3/8"</i>	57
Figura 5-10: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 1 y 4</i>	57
Figura 5-11: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 3 y 6</i>	58
Figura 5-12: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 2 y 5</i>	58
Figura 5-13: <i>Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 1 y 4</i>	59
Figura 5-14: <i>Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 3 y 6</i>	59
Figura 5-15: <i>Deformación generada en la platina 3/8" en el punto 2</i>	60
Figura 5-16: <i>Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 1/4"</i>	61
Figura 5-17: <i>Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 3/8"</i>	62
Figura 5-18: <i>Deformación generada en las platinas 1/4" y 3/8"</i>	62
Figura 5-19: <i>Propiedades acero A36 para modelo 3D ANSYS de platina 3/8" y 1/4" sobre recebo</i>	63
Figura 5-20: <i>Propiedades del recebo para modelo 3D ANSYS de platina 3/8" y 1/4" sobre recebo</i>	63
Figura 5-21: <i>Modelos para simular la plasticidad de los materiales</i>	64
Figura 5-22: <i>Curva esfuerzo-deformación del recebo</i>	64
Figura 5-23: <i>Geometría general de la platina 3/8" y 1/4" apoyada sobre el colchón de recebo</i>	65
Figura 5-24: <i>Empotramiento en el contorno del relleno de recebo</i>	65
Figura 5-25: <i>Contactos definidos entre el pistón y la platina 3/8" y 1/4"</i>	66

Figura 5-26: <i>Contactos definidos entre la platina 3/8" y 1/4" y el recebo</i>	67
Figura 5-27: <i>Herramienta para el Mallado o discretización de los elementos</i>	67
Figura 5-28: <i>Herramienta para el Mallado o discretización de los elementos - "Refinement"</i>	68
Figura 5-29: <i>Vista Detalle del control de Refinamiento</i>	68
Figura 5-30: <i>Mallado o discretización de los elementos - "Mapped Face Meshing"</i>	69
Figura 5-31: <i>Mallado o discretización de los elementos - "Edge Sizing"</i>	69
Figura 5-32: <i>Mallado o discretización de los elementos - General</i>	70
Figura 5-33: <i>Mallado o discretización de los elementos – Mapeado de la platina</i>	70
Figura 5-34: <i>Mallado o discretización de los elementos – Refinamiento de la parte superior del Recebo</i>	71
Figura 5-35: <i>Condiciones de frontera de la platina 1/4"</i>	72
Figura 5-36: <i>Items seleccionados de las deformaciones obtenidas para la platina 1/4"</i> ..	72
Figura 5-37: <i>Estado de esfuerzos en el modelo con la platina 1/4"</i>	73
Figura 5-38: <i>Estado de esfuerzos locales en la platina 1/4"</i>	73
Figura 5-39: <i>Deformación en el modelo de la platina 1/4"</i>	74
Figura 5-40: <i>Deformación de la platina 1/4"</i>	74
Figura 5-41: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 1, 3, 4 y 6</i>	75
Figura 5-42: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en el punto 5</i>	75
Figura 5-43: <i>Deformación generada sobre la platina 1/4" en el punto 2</i>	76
Figura 5-44: <i>Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 1/4"</i>	77
Figura 5-45: <i>Condiciones de frontera de la platina 3/8"</i>	78
Figura 5-46: <i>Items seleccionados de las deformaciones obtenidas para la platina 3/8"</i> ..	78
Figura 5-47: <i>Estado de esfuerzos en el modelo con la platina 3/8"</i>	79
Figura 5-48: <i>Estado de esfuerzos locales en la platina 3/8"</i>	79
Figura 5-49: <i>Deformación en el modelo de la platina 3/8"</i>	80
Figura 5-50: <i>Deformación de la platina 3/8"</i>	80
Figura 5-51: <i>Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 1, 3, 4 y 6</i>	81
Figura 5-52: <i>Deformación generada sobre la platina 3/8" en el punto 5</i>	81
Figura 5-53: <i>Deformación generada sobre la platina 3/8" en el punto 2</i>	82
Figura 5-54: <i>Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 3/8"</i>	83
Figura 5-55: <i>Rango en el cual se varió el módulo de elasticidad del recebo</i>	85
Figura 5-56: <i>Rango en el cual se varió el coeficiente de Poisson del recebo</i>	85
Figura 5-57: <i>Puntos de diseño para los cuales se evaluó una solución</i>	86

Figura 5-58: <i>Variación del punto 4 para la platina 3/8" con respecto al módulo de elasticidad del recebo</i>	86
Figura 5-59: <i>Variación del punto 4 para la platina 3/8" con respecto al coeficiente de Poisson del recebo</i>	87
Figura 5-60: <i>Variación del punto 5 para la platina 3/8" con respecto al módulo de elasticidad del recebo</i>	87
Figura 5-61: <i>Variación del punto 5 para la platina 3/8" con respecto al coeficiente de Poisson del recebo</i>	88
Figura 5-62: <i>Análisis de sensibilidad</i>	88

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1. Número de nodos y elementos después del mallado para platina 1/4" y 3/8"</i>	55
<i>Tabla 2. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 1/4"</i>	60
<i>Tabla 3. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 3/8"</i>	60
<i>Tabla 4. Cantidad de nodos y elementos obtenidos para la Platina 3/8" y 1/4"</i>	71
<i>Tabla 5. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 1/4"</i>	76
<i>Tabla 6. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 3/8"</i>	82

INTRODUCCIÓN

En primera instancia se debe conocer qué significa la interacción suelo-estructura en ingeniería. Se define como un mecanismo por medio del cual la estructura influye en los movimientos del terreno base¹. Con este trabajo se pretende ayudar a resolver uno de los problemas específicos del análisis estructural en las metodologías de diseño de cimentaciones con zapatas aisladas, considerando la flexibilidad de ellas.

“Se puede decir que la interacción, puede ser elástica o inelástica. Inicialmente, la interacción elástica existe cuando se cumplen dos condiciones de contacto:

- Igualdad de deformaciones entre los dos cuerpos en la zona de contacto.
- La presión de contacto que se produce entre los cuerpos, o reacción del uno sobre el otro, ha de ser tal que la deformación inducida por estas tensiones cumpla la primera condición o condición de deformación”².

Por otra parte, la interacción inelástica del suelo con la estructura es un fenómeno que a diferencia de la interacción elástica, representa la modificación de la respuesta natural de un sistema estructural debido a que el suelo modifica las condiciones de apoyo iniciales consideradas fijas y el amortiguamiento total de la edificación.

“La distribución real de presiones de una zapata sobre el suelo, y por lo tanto, las reacciones de este, constituyen un tema complejo que depende de muchas variables, en particular de la rigidez de la zapata y de las características tensión-deformación del suelo”³.

¹ A. SORIANO. Física de la tierra, num.1. pág. 287-238 Ed. Univ. Compl. Madrid. 1989.

² SANTOS MIÑÓN J. Revista de obras públicas. Pág. 181-191. Febrero-Marzo 1980.

³ J.CALAVERA. Libro cálculo de estructuras de cimentación. 4th Ed. INTEMAC. 2000.

Comúnmente los ingenieros estructurales diseñan los cimientos asumiendo un empotramiento perfecto (completa rigidez), lo cual no corresponde al verdadero comportamiento del sistema. Para entender el problema se deberá analizar cómo determinar la afectación de las propiedades en un sistema estructural, teniendo en cuenta que el suelo realmente no produce ni empotramiento perfecto ni tampoco libertad completa en los cimientos.

El comportamiento del suelo es realmente no lineal. Sus características dinámicas y sus deformaciones, la distribución de presiones en el contacto cimiento-suelo y el tipo de sistema estructural interactúan entre sí. En los análisis se deberían considerar las características no lineales y la absorción de energía del suelo, teniendo en cuenta un modelo tridimensional 3D del sistema del cimiento y el suelo unidos.

De igual forma, diferentes autores como Nii Allotey y M. Hesham El Nagar, E. Celebi, F. Goktepe y N. Karahan, Manuel J. Freire Tellado, Manuel Delgado Vargas, entre otros hablan de cómo la deformación del suelo puede hacer que lo que se ha considerado en los modelos de cálculo un empotramiento se comporte en realidad como una articulación.

Para comprender mejor el mecanismo de interacción suelo-estructura han surgido diferentes métodos de análisis, que tienen que ver con el análisis numérico, diferencias finitas y elementos finitos, modelos particulares, entre otros, con el fin de hacer predicciones cualitativas y cuantitativas que permitan realizar el diseño estructural de los cimientos sobre bases más lógicas y más certeras que las obtenidas mediante la hipótesis de una completa rigidez uniforme.

La mayoría de estudios realizados se aplican a los casos de cimentación por vigas flotantes en modelos planos y cimentación con losas en modelos 3D.

Debido a lo anterior, en este trabajo se pretende estudiar el problema, haciendo una investigación mediante modelos físicos a escala y modelos matemáticos por elementos finitos utilizando el programa ANSYS, con el fin de conocer el comportamiento de una cimentación superficial sobre un suelo verdadero y aplicando la metodología de Winkler mediante el uso de resortes, utilizando dos tipologías de platinas metálicas que representan el cimienta para ambos casos. Por otra parte, tener en cuenta las deformaciones relativas del suelo y el cimienta después de someterse a cargas monotónicas.

1. OBJETIVOS

1.1. General

- Estudiar el comportamiento elástico e inelástico en la interacción suelo-estructura, mediante ensayos sobre dos placas base metálicas de diferente espesor, apoyadas sobre resortes y apoyadas sobre recebo; y mediante un modelo matemático por elementos finitos de las mismas condiciones.

1.2. Específicos

- Investigar sobre los diferentes métodos de análisis utilizados por diferentes autores en la solución del problema generado por la condición elástica e inelástica del suelo en la interacción.
- Desarrollar dos tipologías de modelos físicos a escala que permitan evaluar en forma experimental la interacción suelo - estructura mediante la simulación de una zapata aislada utilizando dos platinas de acero colocadas sobre recebo y por otra parte, estudiar el comportamiento del mismo cimiento reemplazando el recebo por una cama de resortes para simular el comportamiento del mismo.
- Analizar por elementos finitos en el programa ANSYS los modelos experimentales para comparar resultados, representando la realidad del problema.
- Generar un comparativo de resultados y conclusiones según los puntos anteriores.

2. MARCO TEÓRICO

En nuestro medio es muy común el diseño de cimentaciones superficiales, teniendo en cuenta varios parámetros como son las cargas de la estructura, las condiciones y características del suelo así como el tipo de cimiento a implementar con un análisis de costos, pero sin estudiar la interacción real del suelo con la estructura⁴. Todas las obras de ingeniería se construyen apoyándose en el terreno y las cargas de las edificaciones se transmiten a la cimentación.

Interacción suelo - estructura

“La interacción suelo – estructura es el efecto que tienen en la respuesta estática y dinámica de la estructura las propiedades del suelo que da apoyo a la edificación, sumado a las propiedades de rigidez de la cimentación y de la estructura”⁵.

Diferentes estudios han demostrado que el suelo no es infinitamente rígido y no tiene un comportamiento netamente elástico. Por este motivo, la interacción del suelo con la estructura ha sido un fenómeno que últimamente ha tomado bastante importancia donde se ha buscado entender qué ocurre en el plano entre la cimentación y el suelo de soporte, tratando de encontrar la presión de contacto o reacción del suelo, pero existe una gran dificultad y es que las condiciones de contorno o de frontera se expresan en tensiones y deformaciones y no pueden resolverse por los métodos usuales⁶.

Suelo de fundación

La clasificación del suelo es muy importante y de acuerdo a su tipología se tiene una capacidad portante máxima para resistir esfuerzos, debido a las diferentes propiedades físicas del mismo. “Un suelo grueso tiene un comportamiento friccionante y un suelo fino tiene un comportamiento cohesivo.

⁴ PECK, HANSON AND THORNBURN. Ingeniería de cimentaciones. Publicado por Limusa 2009.

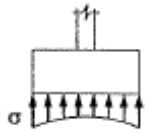
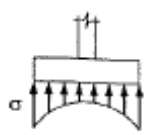
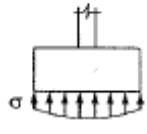
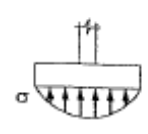
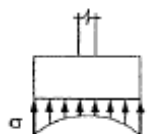
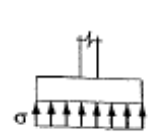
⁵ “Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, NSR-10: Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008) y Decreto 926 de 2010” – Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, 2010.

⁶ SANTOS MIÑÓN J. Revista de obras públicas. Pág. 181-191. Febrero-Marzo 1980.

Por otra parte, la estructura le transmite todas las cargas al suelo y este las debe resistir. Posteriormente, los esfuerzos se distribuyen en el estrato de suelo hasta una profundidad apreciable y a esta zona se le denomina bulbo de presiones (*Boussinesq* fue el primero en estudiar la distribución de esfuerzos en el suelo, su hipótesis se basa en que el suelo es homogéneo e isotrópico), la profundidad del bulbo de presiones depende del ancho de la zapata (si la zapata es rectangular la profundidad del bulbo es dos veces el ancho de la zapata, si la zapata es de longitud infinita la profundidad del bulbo de presiones es de tres veces el ancho de la zapata)⁷.

El comportamiento del suelo es realmente no lineal. Sus características y sus deformaciones, la distribución de presiones en el contacto cimiento-suelo y el tipo de sistema estructural interactúan entre sí. A continuación se muestra la distribución de presiones según el tipo de suelo y el tipo de cimiento:

Figura 2-1: Distribución de presiones en zapatas

TIPO DE SUELO	TIPO DE ZAPATA	
	RÍGIDA	FLEXIBLE
COHESIVO		
GRANULAR		
ROCA		

Fuente: Tomado de J. Calavera., Cálculo de estructuras de cimentación. 4th Ed. INTEMAC. 2000

⁷ VIASUS ARTEAGA C., LÓPEZ PALOMINO P., "Evaluación interacción suelo estructura mediante un modelo físico (zapatas aisladas)", Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito". 2008.

La forma de la distribución de las presiones de contacto depende de varios factores, tal como:

- ✓ El grado de rigidez de la fundación: Una fundación rígida bajo carga presenta una variación lineal de las deflexiones, mientras que una fundación flexible no ofrece resistencia a la flexión y su forma deflectada sigue todas las depresiones del contacto de la fundación con el suelo de soporte.
- ✓ La forma o disposición de la fundación: Se considera con mayores ventajas las fundaciones de forma regular (circular, cuadrada, rectangular o trapezoidal).
- ✓ El tipo de suelo: Los suelos cohesivos (limos y arcillas saturados) se consideran un medio elástico homogéneo y generalmente presentan un módulo elástico constante mientras que para los suelos no cohesivos (gravas y arenas tanto secas como sumergidas) el módulo elástico depende de manera compleja del régimen de esfuerzos.
- ✓ La distribución de cargas aplicadas: Depende de la disposición geométrica de las cargas actuantes y de la rigidez de la estructura soportada⁸.

Las posibles deformaciones que se esperan bajo los cimientos principalmente no son proporcionales a los esfuerzos transmitidos y además van presentando cambios a través del tiempo. Esto debido al comportamiento específico de cada tipo de cimiento, bien sea rígido o flexible así como de las propiedades mecánicas del suelo y del desempeño del conjunto suelo-cimiento interactuando ante las diferentes sollicitaciones de carga.

Con base en estos parámetros se han definido diferentes metodologías que permiten estudiar la interacción del suelo con la estructura, aplicable al diseño estructural de cimentaciones superficiales.

Metodologías y procedimientos de análisis

En muchas metodologías no se está considerando la flexibilidad del sistema suelo-cimentación debido al comportamiento del suelo. Comúnmente se suele referir a este

⁸ VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.

fenómeno como interacción, suelo-estructura exclusivamente, la parte estática del mismo se refiere a los esfuerzos y deformaciones que se inducen, tanto en el suelo como en la estructura, debidas únicamente a las cargas gravitacionales.

Método del coeficiente de Balastro o modelo de Winkler:

Pensando en el modelamiento del terreno se utiliza el método del Módulo de Balastro o modelo de Winkler, constituyendo un modelo mecánico que parte de la hipótesis de que el asentamiento producido en un punto mantiene una relación lineal con la presión a la que está sometido el suelo, transmitida por la cimentación⁹. Analíticamente,

$$P = k_s \cdot y$$

Donde “P” representa la presión transmitida al terreno, “y” el asentamiento experimentado y “k_s” el factor de proporción entre ambos, conocido como coeficiente o módulo de Balastro, con unidades de kg/cm³ (Fuerza por unidad de volumen). Quiere decir que con éste método se supone que la presión “P”, que actúa en un punto de la interfase fundación-suelo, es una función lineal de la deflexión “y”, del terreno en el mismo punto, con una constante de proporcionalidad, “k_s”¹⁰.

El comportamiento físico del módulo de reacción del terreno o coeficiente de balastro es simulado por una cama de resortes-suelo en la que cada uno de ellos actúa independientemente, en forma desconectada. En las soluciones matemáticas con base en el modelo de *Winkler*, se utiliza una expresión para el módulo de reacción $k = k_s B$, en donde B es el ancho del cimiento.

Entre la variedad de modelos propuestos para representar la respuesta del suelo de fundación, el atribuido a *Winkler* desde 1867 ha recibido la mayor atención y ha sido el más utilizado en la práctica común del diseño¹¹, debido a que ofrece relaciones

⁹ FREIRE TELLADO M.J. Libro Interacción suelo, cimiento y estructura. Univ. De Coruña. 09 julio de 2000.

¹⁰ VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.

¹¹ VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.

matemáticas más simples. Sin embargo, este es un método que no se ajusta exactamente a la realidad experimental del terreno.

✓ Comparación del modelo de *Winkler* con el del semiespacio elástico:

Los estudios más acertados fueron realizados por *Vesic* en 1973 quien encontró que los modelos de *Winkler* representan bastante bien el comportamiento de vigas sobre suelo. También describió los resultados de estudios sobre placas de varios investigadores, donde el momento real en grandes placas parece algo menor que el calculado mediante el modelo de *Winkler*, aunque lo anterior depende del módulo de reacción del suelo.

En el caso de utilizar una viga sobre un suelo representado por el modelo de *Winkler*, sólo se requiere el módulo de reacción k_s , mientras que si se quiere utilizar la misma viga sobre un suelo como un continuo linealmente elástico isotrópico, es necesario conocer el módulo de *Young*, E y la relación de *Poisson*, ν .

El problema de una viga infinita bajo una carga puntual soportada por una subrasante tridimensional linealmente elástica, fue resuelto por *Biot* en 1937 quien sólo evaluó el momento flector máximo en la viga. La solución de *Biot* fue ampliada por *Vesic* en 1961 quien determinó la distribución de la deflexión, pendiente, momento, cortante y presión, a lo largo de la viga. Al dividir la presión de soporte en cualquier punto sobre la viga, por la deflexión, *Vesic* encontró que tal relación era esencialmente constante a lo largo de la viga, lo cual indicó una correspondencia bastante buena entre la solución por el continuo elástico y la de *Winkler* donde se empleara un apropiado valor de k_s , siguiendo la siguiente ecuación:

$$k_s = 0.65 \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$$

En donde E_s y ν_s son el módulo de *Young* y la relación de *Poisson* del suelo de soporte, respectivamente. E es el módulo elástico del material de la viga. I es el momento de inercia de la sección de la viga. B es el ancho de la viga¹².

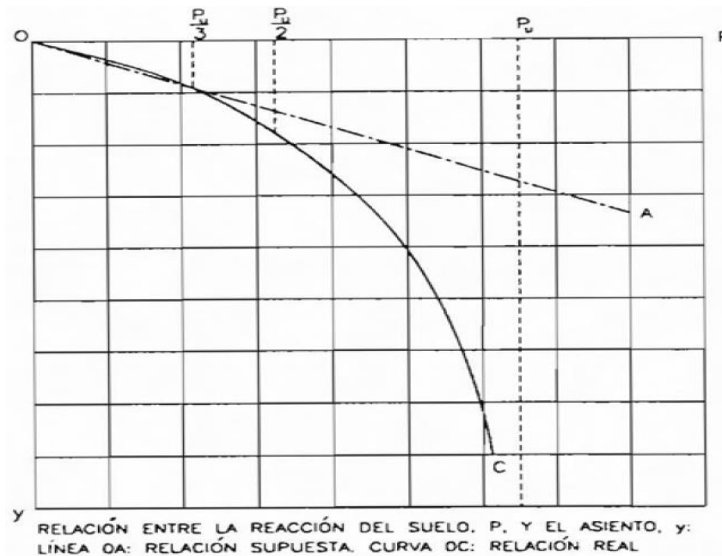
¹² VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.

Según lo anterior, se puede decir que para cimientos cortos o zapatas, la correspondiente viga o placa estructural de fundación, con frecuencia se supone rígida y la repuesta del suelo de soporte se supone igual a la del modelo de *Winkler*. Para vigas o placas más largas, se requiere aplicar la teoría de vigas flexibles sobre fundación elástica. Para cualquier caso no se considera necesario utilizar un método más complejo que el de *Winkler*¹³.

Modelo hiperbólico elástico no lineal:

Aunque es un método más preciso que el método de *Winkler*, no aporta mayor precisión en los resultados, debido a que en la edificación convencional, las tensiones transmitidas al terreno no son altas: la tensión admisible envuelve un doble factor de seguridad suficiente frente a los hundimientos y a los asentamientos excesivos. Por esta razón, la relación reacción del suelo/asentamiento se sitúa en la parte baja de la curva, que corresponde en todos los modelos propuestos, bien sea una recta o bien sustituible por una recta sin error apreciable, tal como se observa en la siguiente gráfica¹⁴:

Figura 2-2: Evaluación de los coeficientes de Balastro



Fuente: FREIRE TELLADO M.J. Libro Interacción suelo, cimiento y estructura. Univ. De Coruña. 09 julio de 2000.

¹³ VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.

¹⁴ FREIRE TELLADO M.J. Libro Interacción suelo, cimiento y estructura. Univ. De Coruña. 09 julio de 2000.

El método caracteriza el suelo únicamente por el valor de un parámetro, el módulo de Balastro, independiente de las fórmulas que permiten su obtención y que varía con el tipo de suelo.

Dentro de las falencias del método se puede indicar que el módulo de deformación del suelo es creciente con la profundidad, mientras que el método supone una correlación lineal entre el asentamiento producido y la tensión con la que reacciona el suelo. Por otra parte, no tiene en cuenta el efecto de la preconsolidación del suelo, en el que para cargas inferiores a la de consolidación el asentamiento sería despreciable.

Lo anterior tiene que ver con la hipótesis fundamental del método que considera el terreno como un fluido, despreciando parámetros tales como el ángulo de fricción interno y la cohesión. Por otra parte, se considera que solamente el terreno bajo el cimiento experimenta deformaciones. Pero aunque esto es una falencia, el método tiene la importancia de que permite ignorar la superposición de los distintos bulbos de presiones de los cimientos de la edificación o de otros cimientos existentes, proporcionando resultados fiables¹⁵.

Modelo de viga sobre una fundación no lineal de Winkler (BNWF):

El modelo de viga sobre una fundación no lineal de *Winkler* (BNWF) es muy utilizado en el análisis de interacción suelo-estructura debido a su simplicidad relativa. En esta metodología, se realizó un modelo dinámico versátil BNWF para el análisis de cimentaciones superficiales y profundas. Se desarrolló un modelo como un módulo autónomo para ser incorporado en un software comercial de análisis estructural no lineal. Las características del modelo fueron los métodos de carga y descarga, desarrollo de una zona estacionaria, el modelamiento de la degradación cíclica y la amortiguación de radiación. El modelo se crea para ser capaz de representar varias características de respuesta observadas en los experimentos de interacción suelo-estructura y demuestra el potencial del mismo como una herramienta útil para los ingenieros diseñadores involucrados en diseño sísmico¹⁶.

¹⁵ FREIRE TELLADO M.J. Libro Interacción suelo, cimiento y estructura. Univ. De Coruña. 09 julio de 2000.

¹⁶ NII ALLOTEY AND M. HESHAM EL NAGAR. *Generalized dynamic Winkler model for nonlinear soil-structure in analysis*. Can. Geotech. J. Vol. 45. 2008.

Los procedimientos usados para el modelamiento de un tramo de suelo continuo discretizado se aproximan a los modelos con resortes lineales “efectivos”. Aunque el desarrollo de la tecnología a nivel computacional ha reducido el tiempo requerido para los cálculos, el enfoque general sigue siendo poco atractivo para muchos ingenieros de diseño estructural. La viga sobre una fundación no lineal de *Winkler* (BNWF) es un mejoramiento del modelo lineal con resortes y es principalmente usada en la práctica para predecir la respuesta estática no lineal de sistemas suelo-estructura. El principal inconveniente del método es la idealización del suelo continuo con reacciones discretas del suelo que son desacopladas; en muchas instancias, las reacciones del suelo a lo largo de varios grados de libertad son también desacopladas. Para aplicaciones sísmicas, el modelo estático BNWF sufre dos desventajas más: 1) una inhabilidad para tener en cuenta el ciclo por ciclo de la respuesta de interacción suelo-estructura y 2) el desempeño insatisfactorio en el modelamiento de problemas que participan en la interacción cinemática considerable y en los efectos de movimiento del terreno. De todos modos, los temas mencionados anteriormente, pueden ser estudiados utilizando modelos dinámicos BNWF.

Varios ensayos de laboratorio teniendo en cuenta experimentos centrifugados de cíclica y sísmica en la interacción suelo-estructura han demostrado que la respuesta ciclo por ciclo es afectada por muchos factores que interactúan simultáneamente y que deben ser considerados por los modelos dinámicos de *Winkler*. Estos factores pueden ser: el endurecimiento y la degradación del suelo cíclico, la flexibilidad estructural y del suelo, el desarrollo de la zona estacionaria y el amortiguamiento de radiación.

Análisis no lineal por elementos finitos para la predicción de la respuesta sísmica de edificaciones considerando la interacción suelo-estructura:

Es un método numérico basado en un método por elementos finitos en dos dimensiones para el análisis de la respuesta sísmica de un sistema infinito de interacción suelo-estructura. Este estudio fue desarrollado para una serie de diferentes escenarios que involucran análisis paramétricos comprensivos incluyendo los efectos de las propiedades reales de los materiales del suelo subyacente sobre las cantidades de respuesta estructural. Las fronteras artificiales viscosas, simulando el proceso de la transmisión de onda a lo largo de la interface truncada de un espacio semi-infinito, fueron adoptadas en la fórmula del elemento finito no lineal en el dominio del tiempo junto con la integral de *Newmark*. La relación de esbeltez de la superestructura y las condiciones de suelo local

así como las características de excitaciones de entrada fueron parámetros importantes para la simulación numérica en esta metodología. El comportamiento mecánico del suelo subyacente que se considera en este modelo de predicción fue simulado por un modelo elasto-plástico no drenado de *Mohr-Coulomb* bajo las condiciones plano-deformación. Para enfatizar en los hallazgos importantes de este tipo de problemas para los ingenieros civiles, se realizaron cálculos sistemáticos con diferentes parámetros controlados con el fin de evaluar directamente la respuesta estructural del sistema de vibración suelo-estructura. Cuando el suelo subyacente se vuelve más rígido, el contenido frecuente del movimiento sísmico tiene un papel importante en la alteración de la respuesta sísmica. El repentino incremento de la respuesta dinámica es más pronunciado para el caso de resonancia, cuando el contenido de frecuencia del movimiento sísmico del suelo es próximo a la del sistema de interacción suelo-estructura. Los efectos en la interacción suelo-estructura bajo diferentes entradas sísmicas son diferentes para todas las condiciones de suelo consideradas y tipologías estructurales¹⁷.

Varios libros y trabajos de investigación se han centrado en los problemas de análisis sísmico dinámico en la interacción suelo-estructura y han sido escritos envolviendo ingeniería geotécnica y sísmica. La influencia de sistemas acoplados de vibración suelo-fundación sobre el comportamiento estructural para el diseño detallado de estructuras ha sido un tema especial de estudios completos que se relacionan con estudios sobre la intersección de vibraciones estructurales y dinámicas del suelo incluyendo la propagación de ondas complejas. Estos análisis han sido reconocidos como trabajos importantes entre investigadores e ingenieros por desarrollar una metodología considerable para los procesos de análisis de interacción suelo-estructura durante los últimos años.

Por otra parte, se han utilizado muchos métodos con la ayuda de programas de cómputo como son el método de diferencias finitas, el método por elementos finitos, el método de volumen delgado de capa-flexible, el método del elemento de frontera y sus procedimientos de acoplamiento, entre otros, con el fin de estudiar y resolver problemas de interacción.

¹⁷ E. Celebi, F. Goktepe, and N. Karahan, *Non-linear finite element analysis for prediction of seismic response of buildings considering soil-structure interaction*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 3495-3505, 2012.

Con el objetivo de analizar el subsuelo y la superestructura dentro del mismo modelo, el proceso numérico directo requiere un gran esfuerzo computacional en un solo paso con la precisión deseada para resolver fórmulas complejas.

El análisis por elementos finitos es muy utilizado para crear modelos matemáticos definidos por funciones de interpolación con el fin de encontrar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales y ecuaciones con integrales de sistemas acoplados en problemas de ingeniería civil.

La geometría de la malla y el espaciamiento del mallado, la medida finita del dominio cerrado así como la radiación de onda y el material de suelo juegan un papel importante en el análisis numérico. Los comportamientos dinámicos esfuerzo-deformación de los suelos, que actúan fuertemente bajo vibraciones de grandes amplitudes forzadas no lineales, tales como cargas sísmicas son considerablemente complejos. Por esto, para simular adecuadamente la respuesta sísmica de los suelos, el modelo constitutivo adoptado debe tener las características esenciales del comportamiento del suelo bajo las condiciones de cargas cíclicas. Por otra parte, el modelo del material de suelo lineal perfectamente elástico con una superficie producida de acuerdo al criterio de falla de Mohr-Coulomb debería implementarse en su forma exacta en el elemento finito geotécnico. Inicialmente, se espera que el suelo sea elástico y el modelo genere esfuerzos normales y a cortante en todos los puntos de Gauss dentro de la malla. Estos esfuerzos se comparan con el criterio de falla de *Mohr-Coulomb*. Si los esfuerzos en un punto de Gauss en particular se encuentran dentro de la envolvente de falla de *Mohr-Coulomb*, entonces se supone que es la ubicación para permanecer elástica, de otra manera para ser flexible.

Análisis de elementos de contacto para estructuras de cimentación:

Conociendo que el suelo es una parte integral de las edificaciones y sabiendo que la interacción de la edificación con el suelo presenta procesos complejos para el suelo, generando gran impacto sobre el comportamiento de la edificación principalmente en su estabilidad, en esta metodología se utilizó el método por elementos finitos con el fin de modelar la estructura y el suelo. Para la creación y análisis del modelo se utilizó el programa ANSYS y su interfaz *Mechanical APDL (ANSYS Parametric Design Language)*.

Las tareas específicas y cálculos relacionados con la interacción de las fundaciones y el subsuelo son posibles mediante la aplicación de ciertos modelos del suelo como son los modelos simples (*Winkler* y *Pasternak*) o modelos más elaborados (modelos del suelo en 3D con consolidación, *creep*, etc). En esta metodología los problemas del contacto entre la fundación y el subsuelo son resueltos por modelos 3D del mismo como un medio espacio elástico. El modelo del subsuelo es también llamado Modelo del suelo de *Boussinesq*.

Se presentan grandes problemas cuando se quiere modelar el medio espacio del suelo. Principalmente surge la pregunta: Cómo modelar el contacto entre la fundación y el subsuelo?. En este método mediante el uso del programa ANSYS para interpretar el problema, se estudiaron tres caminos: El primero fue utilizando conexiones fijas entre nodos. El segundo mediante la aplicación de elementos de contacto denominados CONTAC52 y el tercero usando elementos de contacto CONTA173 con TARGE170. De esta forma, se pretendía conocer el comportamiento de una zapata de cimentación sobre un suelo gravoso elástico.

Para el modelamiento, la primera tarea fue crear el modelo 3D por elementos finitos del espacio medio elástico del subsuelo. Después se colocó una zapata de cimentación sobre dicho espacio como una construcción rígida. Posteriormente, se analizó el contacto entre la fundación y el subsuelo teniendo en cuenta los tipos de elementos de contacto que se pueden utilizar en el ANSYS *Mechanical* APDL. En el programa existen tres posibles tipologías de contactos:

- a) Nodo-nodo
- b) Nodo-superficie
- c) Superficie-superficie

Estos tipos de contactos pueden utilizarse para resolver la interacción entre el subsuelo y la fundación. En este método, se analizaron los tipos de elementos de contacto denominados CONTAC52, CONTA173 con TARGE170.

CONTAC52: Es utilizado para el tipo de contacto nodo-nodo. Este elemento es de dos nodos, los cuales pueden estar juntos o regularmente dilatados. Esto se define como una conexión mutua de los nodos, teniendo tres grados de libertad entre ambos. Por otra parte,

este elemento de contacto es viable para transferir solamente la fuerza normal de las superficies en contacto y la fuerza tangencial en la dirección tangencial.

CONTA173: Es utilizado para el tipo de contacto superficie-superficie. Este elemento es de cuatro nodos, los cuales pueden ser aplicados entre elementos tipo *SOLID* o *SHELL*. El elemento de contacto también se define para tres grados de libertad en cada nodo. Permite el contacto y la movilidad entre las superficies elegidas (TARGE170) generando un par de contacto el cual se puede definir por constantes reales, propiedades del material, etc.

TARGE170: Corresponde a la superficie elegida.

Finalmente con esta metodología, la aplicación del elemento de contacto CONTAC52 presentó varias desventajas como fue el trabajo únicamente con fuerzas de presión, pero con una dificultad para constantemente monitorear presiones, tensiones y esfuerzos, otra desventaja fue que el CONTAC52 se define solamente en puntos. Por otra parte, el elemento CONTA173 con la superficie elegida TARGE170 fue el más avanzado en términos de modelamiento y definición aunque fue necesario definir algunas opciones y datos de entrada. Aplicando el CONTA173 se obtuvieron los mejores resultados, en cuanto a la transferencia de presiones y fuerzas de tensión, así como la dilatación o junta entre la fundación y el suelo. Este elemento de contacto tiene en cuenta la interacción sobre la superficie y no solamente en puntos.

Según este método, en la práctica es suficiente aplicar nodos fijos cuando predomina la carga vertical de la estructura y se puede utilizar el elemento de contacto CONTAC52. Para otros casos más avanzados se recomienda resolver el problema utilizando los elementos de contacto CONTA173 (TARGE170)¹⁸.

Teniendo en cuenta las investigaciones anteriormente mencionadas, mediante este trabajo se espera ir más allá y considerar que la interacción suelo-estructura es realmente

¹⁸ Máleková V., An analysis of contact elements of foundation structures, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia. This paper was supported by Grant Agency VEGA, Project No.1/0629/12.

inelástica y no elástica. De igual forma, dar continuidad a la línea de investigación de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito en este tema.

A continuación se muestran algunos de los estudios similares que se han venido trabajando con el grupo de Investigación de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito: Estudios realizados como el denominado “Evaluación interacción suelo estructura mediante un modelo físico (zapatas aisladas)” por la Ing. Carolina Viasús Arteaga y el Ing. Paulo Marcelo López Palomino, donde evaluaron un modelo real a escala de una cimentación superficial conformada por cuatro zapatas aisladas unidas mediante una viga de amarre y analíticamente realizaron un modelo en el programa SAP2000 con las mismas características del modelo experimental como se muestra en la siguiente figura:

Figura 2-3: Estructura del ensayo de un modelo físico (zapatas aisladas)



Fuente: Tomado de VIASÚS ARTEAGA Carolina, LÓPEZ PALOMINO Paulo, “Evaluación interacción suelo estructura mediante un modelo físico (zapatas aisladas)”, Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. 2008.

El llamado “Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo estructura” por los autores Ing. Rafael Ramón Fernández Castillo y Carlos Arturo Torres Pájaro, los cuales realizaron cuatro (4) modelos físicos de una cimentación aislada (zapatas en concreto) apoyada sobre un sistema de resortes como se muestra a continuación:

Figura 2-4: Estructura del ensayo para cimentación aislada (zapatas en concreto)



Fuente: Tomado de FERNÁNDEZ C. Rafael, TORRES P. Carlos, “Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo estructura”, Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. 2009.

Simultáneamente, también se estudió el trabajo denominado “Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo estructura: una verificación según reglamento NSR-10” por el Ing. Gustavo Alberto López Duque, el cual analizó modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes con tres (3) alturas de zapatas distintas, estudiando la variabilidad en esfuerzos, deformaciones y carga máxima resistida para cada caso como se indica en la siguiente figura:

Figura 2-5: Estructura del ensayo análisis de zapatas aisladas sobre resortes (verificación según NSR-10)



Fuente: Tomado de LÓPEZ DUQUE Gustavo A, “Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo estructura: una verificación según reglamento NSR-10”, Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. 2012.

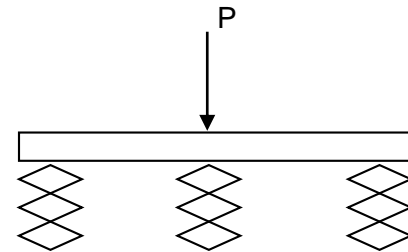
Los estudios anteriores fueron basados en el análisis de interacción suelo estructura en el rango elástico. Con este estudio se pretende pasar del rango elástico al rango inelástico mediante la creación de un modelo real a escala con un recebo construido y analizado mediante ensayos de laboratorio, utilizando placas metálicas delgadas de diferente espesor simulando una zapata aislada flexible que recibe carga gradual apoyada sobre este recebo. Simultáneamente, el análisis de las placas apoyadas sobre resortes y a su vez realizando modelos matemáticos de ambas tipologías en el programa ANSYS.

3. METODOLOGÍA

Se realizó una investigación sobre los métodos de análisis utilizados recientemente para la interacción suelo-estructura elástica e inelástica, con el fin de comprender el mecanismo más a fondo y aplicarlo a la práctica del diseño estructural.

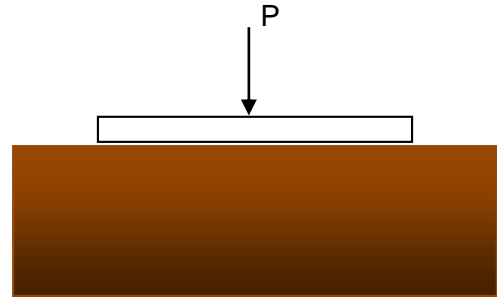
Posteriormente, se planteó la realización de modelos físicos a escala, ensayando *in-situ* dos tipologías de platina metálica de 630 mm x 630 mm y con un espesor de 1/4" y 3/8" respectivamente, cada una apoyada sobre una cama de resortes, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3-1: Modelo tipo de platina metálica sobre resortes



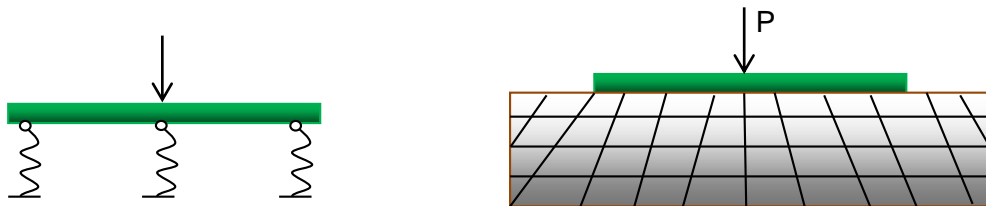
Por otra parte, se construyó un marco metálico en compañía del Ing. Mauricio Moreno Herrán apoyado sobre dos bloques calculados de concreto y se dimensionó mediante análisis matemáticos una matriz de recebo de 2.0 m x 2.0 m x 1.55 m que quedó embebida en el área de suelo existente (Ver anexo 11). Bajo este marco, con las mismas dimensiones de platinas se realizaron dos ensayos apoyando las platinas sobre el recebo, con el fin de obtener la curva esfuerzo-deformación tanto del recebo como de la platina para poder analizar el comportamiento de los dos materiales, como se observa en la siguiente figura:

Figura 3-2: Modelo tipo de platina metálica sobre recebo



Posteriormente, con el fin de validar los ensayos experimentales, se realizaron dos modelos computacionales tridimensionales por elementos finitos en el programa ANSYS, teniendo en cuenta las platinas y la porción de recebo unidos, así como el modelamiento en el mismo programa de las platinas apoyadas sobre resortes, como se observa a continuación:

Figura 3-3: Diagrama unifilar de modelamiento para SAP2000 y ANSYS



Finalmente se obtuvieron importantes conclusiones y recomendaciones, aplicables a la ingeniería estructural de la mano de la ingeniería geotécnica.

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta cómo se planteó el análisis experimental para la interacción suelo-estructura de dos platinas metálicas, una de 1/4" y otra de 3/8" sobre un relleno de recebo y cómo a través del uso de resortes en reemplazo del recebo se obtuvieron diferentes resultados. De los ensayos que se realizaron cabe resaltar que la metodología de resortes con respecto a la del recebo fue independiente y no existió una relación entre las propiedades de los resortes y el recebo.

Para el análisis con resortes se obtuvieron resortes para bicicletas y se hizo el ensayo a compresión de un resorte con el fin de obtener la constante K (Ver anexo 1), tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-1: Proceso del ensayo a compresión en un resorte tipo



Por otra parte, para el análisis de las platinas sobre el recebo fue necesario construir un marco metálico en perfil IPE360 y cimentado sobre muertos de concreto para que mediante la aplicación de carga de manera gradual se pudieran obtener las deformaciones de las platinas con respecto al recebo (Ver anexo 11). Esta estructura fue diseñada y construida en compañía del Ing. Mauricio Moreno Herrán quien es autor del trabajo de grado

denominado “Interacción inelástica suelo-estructura bajo una fundación superficial” donde ensayaría placas de concreto reforzado de dos espesores diferentes sobre el recebo y por otra parte realizaría modelos matemáticos en el programa ANSYS.

A continuación se muestra un resumen del proceso constructivo del marco:

- *Construcción de muertos de concreto:* Teniendo en cuenta la carga máxima de aplicación que el gato hidráulico transmite, se diseñaron dos cimientos de concreto para soportar un marco metálico conformado por elementos IPE360. Las dimensiones para los cimientos fueron de 1.50x1.50x1.25 m utilizando un material de recebo con gravas de varios tamaños en la base, concreto de 21 MPa y acero de refuerzo para su construcción, tal como se observa en la figura:

Figura 4-2: *Construcción de muertos de concreto*



- *Conformación de recebo compactado:* Se colocó recebo en un área de 2.0 m x 2.0 m y con una profundidad de 1.55 m para un grado de compactación al 90% del ensayo *proctor* modificado. Se trabajaron capas de 10 cm. con el uso de vibrocompactador. En la siguiente figura se puede observar el proceso de excavación y el terreno natural existente de tipo arcilloso.

Figura 4-3: *Excavación de material natural*



Una vez excavado el terreno se procedió a colocar el recebo mediante el uso de equipos especializados y conformando las capas de 10 cm. hasta obtener la compactación del 90% al *proctor* modificado, con el fin de no llegar a un recebo tan rígido sino a un terreno semirrígido para obtener mejores resultados sobre los ensayos propuestos.

Figura 4-4: *Compactación inicial, intermedia y final del material de relleno*



Construcción de marco metálico: Se realizó la construcción de un marco metálico mediante el uso de perfiles IPE360, con conexiones pernadas y apoyado sobre los bloques de concreto. Primero se instalaron las columnas, mediante una placa base de 15.8 mm de espesor y con cuatro (4) pernos de 3/4" para cada una, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-5: *Instalación de columnas IPE360*



Simultáneamente, se iban ensamblando dos vigas IPE360 en taller mediante una conexión rígida soldada, como se observa a continuación:

Figura 4-6: *Armado de viga IPE360*



Posteriormente, con la ayuda de un montacarga se trasladó la viga IPE360 y se realizó el ensamble de la misma a las columnas mediante conexiones pernadas a cada lado, con el fin de conformar el marco metálico, de la siguiente manera:

Figura 4-7: Montaje de viga IPE360



Figura 4-8: Anclaje de viga IPE360



Este marco fue diseñado como se describe en el anexo 11, el cual sirvió como sistema de apoyo para la aplicación de carga mediante un gato hidráulico para los ensayos de este trabajo de grado y los ensayos del Ing. Mauricio Moreno Herrán.

4.1. Análisis platina 3/8” sobre resortes

Se escogió una platina de 3/8” de espesor y de 630 mm x 630 mm, para ser apoyada sobre 16 resortes uniformemente distribuidos, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-9: *Base metálica con resortes 1*



Posteriormente, se colocó simplemente apoyada la platina de 3/8" sobre la cama de resortes y se realizó el ensayo a compresión aplicando carga gradualmente mientras se iban leyendo deformaciones en los diferentes puntos, como se observa a continuación:

Figura 4-10: *Ensayo a compresión de la platina 3/8" apoyada sobre resortes*



Con este ensayo se pudo visualizar que la platina sufría una deformación de manera cóncava y los resortes se iban deformando gradualmente en sentido radial, hasta alcanzar una carga de 5000 kg. El comportamiento del sistema fue lineal presentándose una recuperación al 100% tanto en los resortes como en la platina. (Ver anexo 2).

Figura 4-11: *Deformación de la platina 3/8" apoyada sobre resortes*

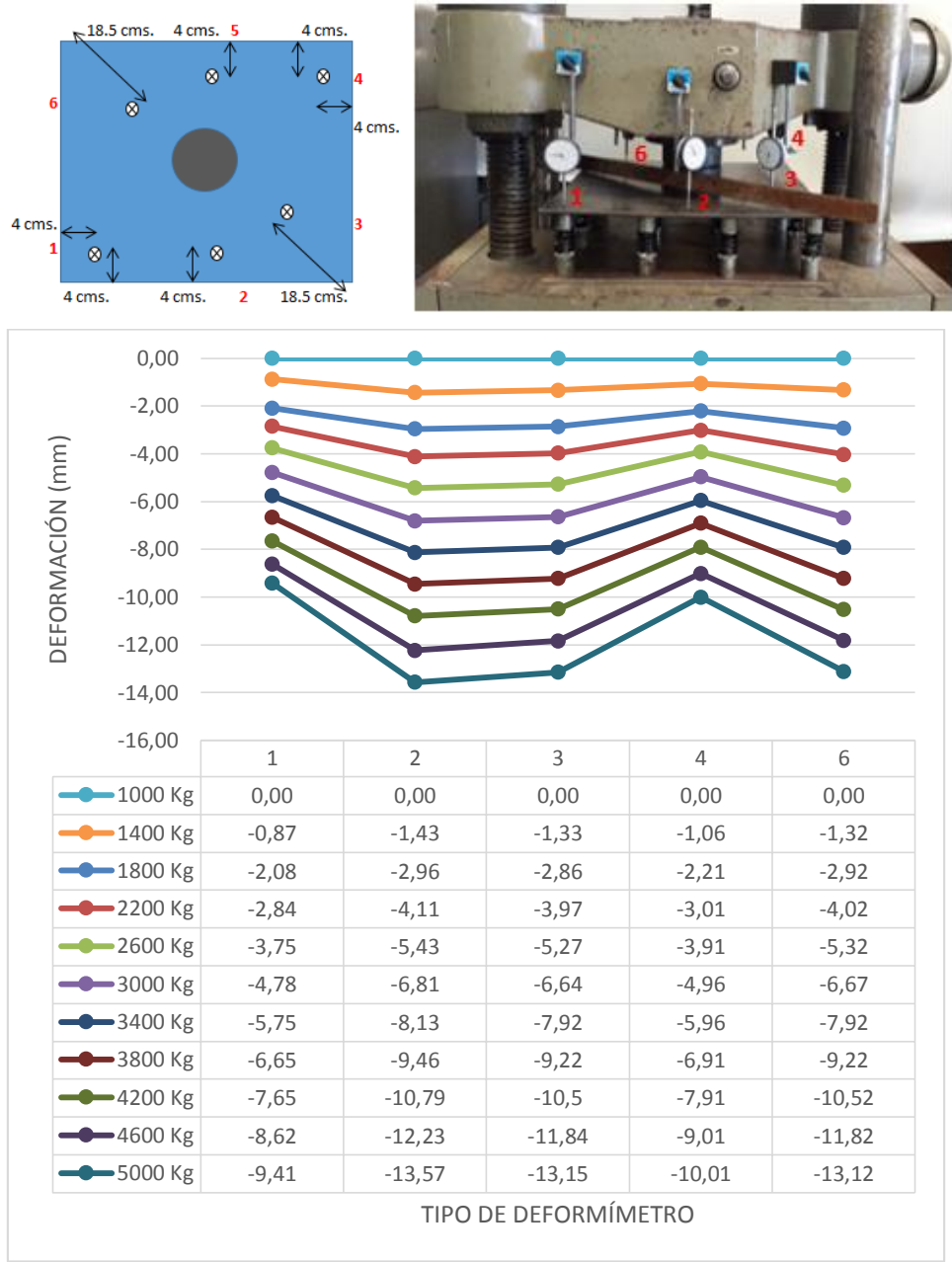


Figura 4-12: *Deformación de los resortes 1*



Las figuras 4-11 y 4-12 simulan están situación. A continuación se muestra el comportamiento del sistema de acuerdo con las cargas aplicadas y las deformaciones obtenidas, mediante la gráfica de deformación (mm) para cada punto de ubicación de deformímetro:

Figura 4-13: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 3/8" sobre resortes



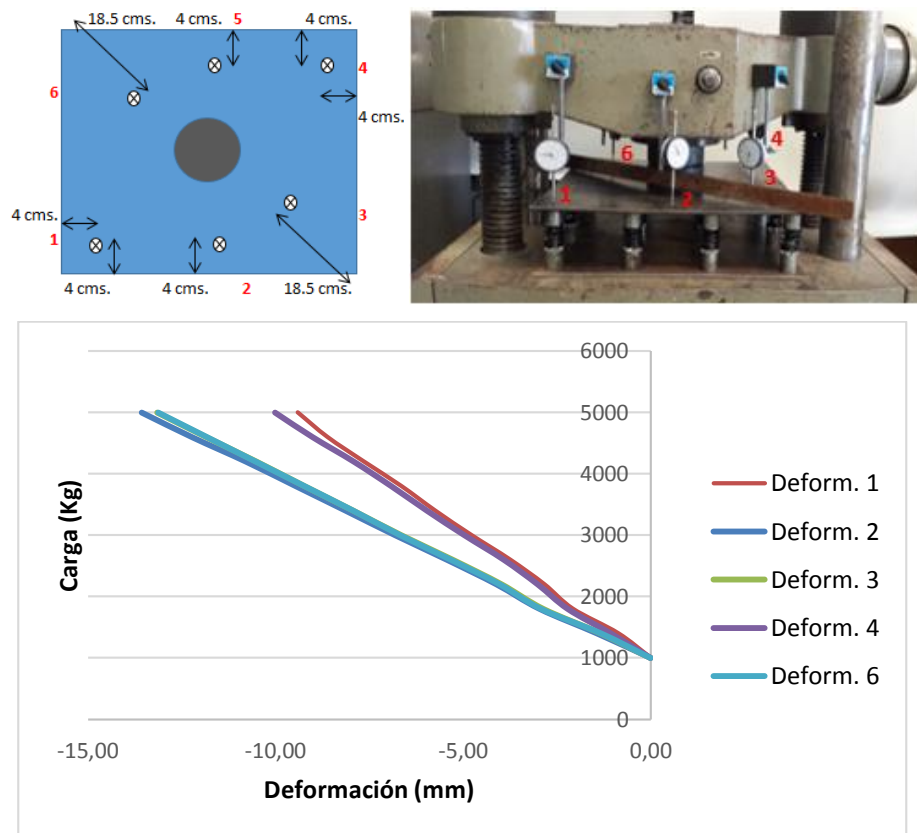
Se puede observar que los resortes ubicados en los puntos 2, 3 y 6 sufrieron mayores deformaciones que los resortes de los puntos 1 y 4. Esto quiere decir que la platina en los puntos 1 y 4 (en sus extremos) sufrió una deformación hacia arriba, mientras que en los puntos 2, 3 y 6 la platina sufrió un hundimiento, lo que reflejó una deformación cóncava de la platina en general, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-14: Deformación observada en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes



Por otra parte, la gráfica de Carga (kg) versus Deformación (mm) corresponde al proceso de carga desde los 1000 kg hasta los 5000 kg en intervalos de 400 kg. Se pudo observar una variación en las deformaciones según la ubicación de cada deformímetro.

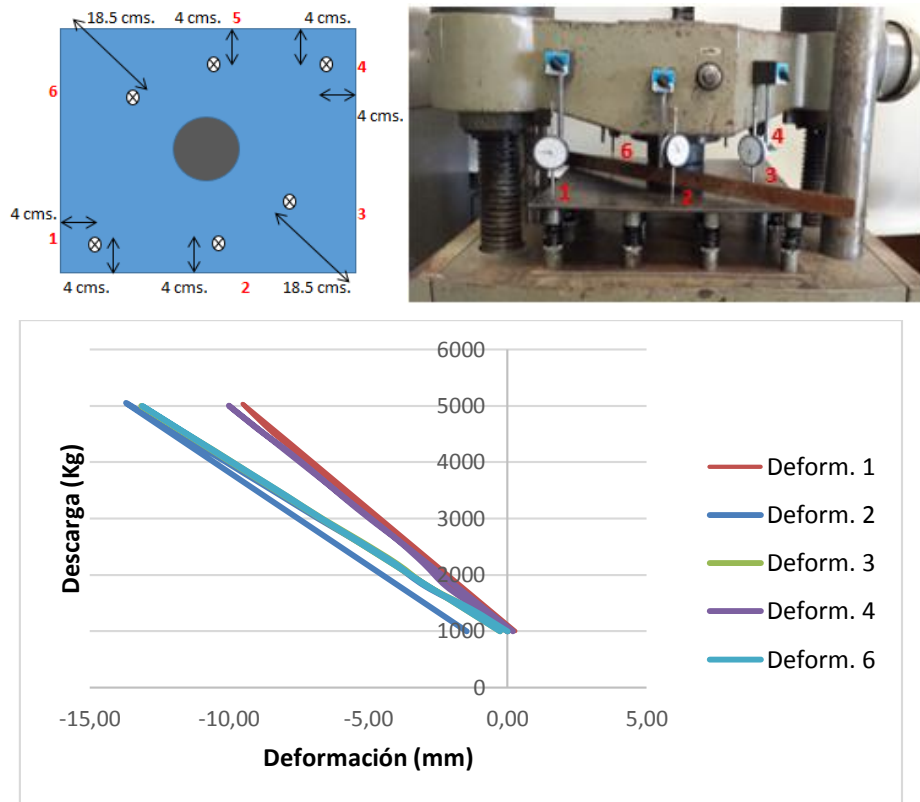
Figura 4-15: Gráfica de carga (kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes



Para los puntos 1 y 4 las deformaciones obtenidas fueron -9.47 y -10.1 mm respectivamente, mientras que para los puntos 2, 3 y 6 fueron de -13.57, -13.15 y -13.12 mm respectivamente. Lo anterior indica, que los resortes cercanos a las puntas de las platinas sufrieron una menor deformación que los resortes ubicados debajo del área de presión que ejercía el pistón.

Por otra parte, se graficó el proceso de carga y descarga, iniciando y retornando a los 1000 kg en intervalos de 400 kg, tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 4-16: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre resortes



Para este caso, se pudo notar que tanto la platina como los resortes se recuperaron completamente y volvieron a su posición inicial sin sufrir deformaciones permanentes. Lo anterior indica un comportamiento elástico y lineal del sistema. Por otra parte, para el punto 5 no se tomaron datos y se partió de que el punto 2 era similar al mismo.

4.2. Análisis platina 1/4" sobre resortes

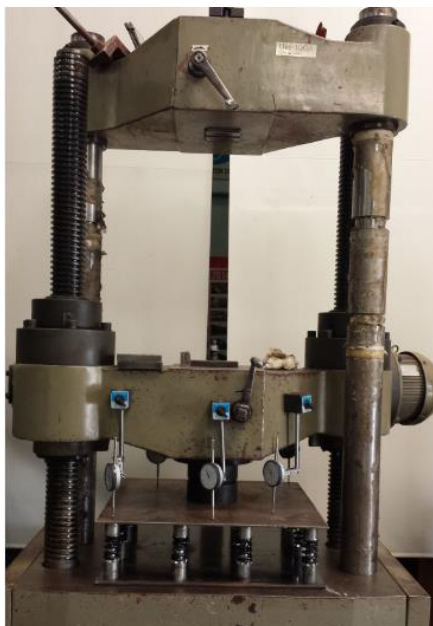
De igual forma que el ensayo anterior, se escogió una platina de 1/4" de espesor y con las mismas dimensiones 630 mm x 630 mm, la cual fue apoyada sobre la base metálica con resortes, como se muestra en la figura:

Figura 4-17: Base metálica con resortes 2



Posteriormente, se realizó el ensayo a compresión aplicando carga gradualmente mientras se iban obteniendo deformaciones en los diferentes puntos, de la siguiente forma:

Figura 4-18: Ensayo a compresión de la platina 1/4" apoyada sobre resortes



Con este ensayo se observó que la platina aunque sufrió una deformación de manera cóncava, esta fue más pronunciada y los resortes fueron deformándose gradualmente en sentido radial pero a una mayor intensidad, hasta alcanzar una carga de 5200 kg. El comportamiento del sistema fue igualmente lineal presentándose una recuperación al 100% tanto en los resortes como en la platina. (Ver anexo 3).

Figura 4-19: Deformación de la platina 1/4" apoyada sobre resortes

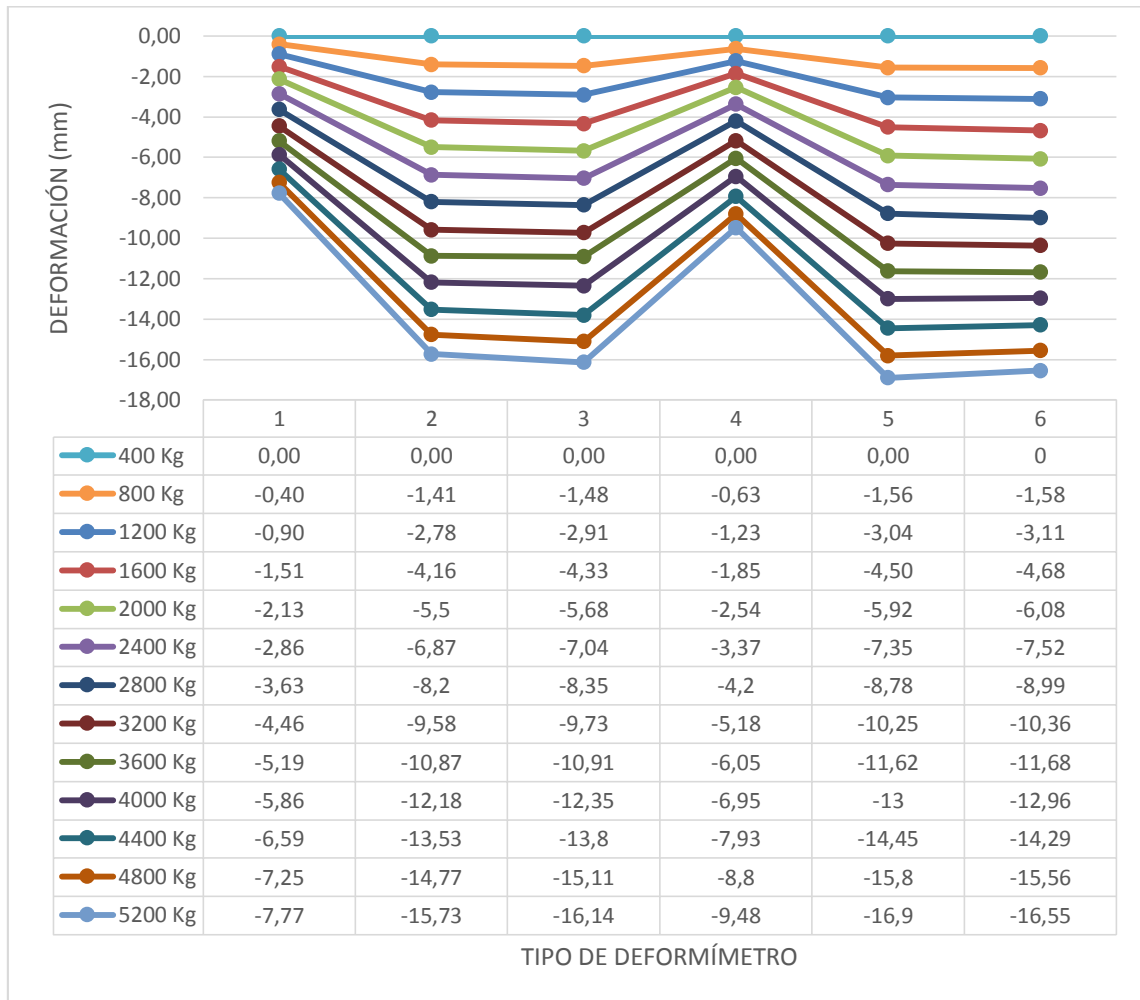
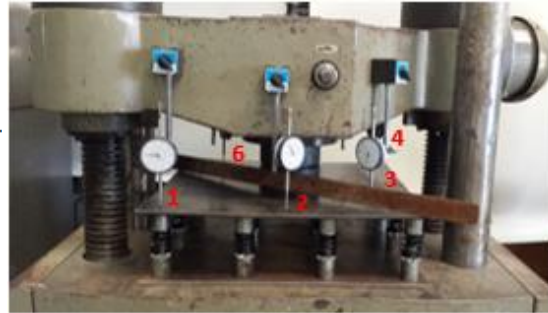
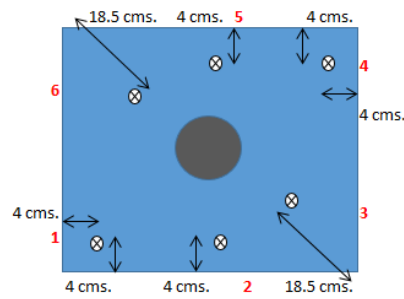


Figura 4-20: Deformación de los resortes 2



Las gráficas obtenidas reflejan lo ensayado (Ver figura 4-19 y 4-20). Posteriormente, se puede observar el comportamiento del sistema de acuerdo a las cargas aplicadas y las deformaciones obtenidas, a través de la gráfica deformación (mm) para cada punto de ubicación de deformímetro:

Figura 4-21: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 1/4" sobre resortes



Se puede observar que los resortes ubicados en los puntos de los deformímetros 2, 3, 5 y 6 sufrieron mayores deformaciones que los resortes de los puntos 1 y 4. Esto quiere decir que de igual forma al ensayo anterior, la platina en los puntos 1 y 4 (en sus extremos),

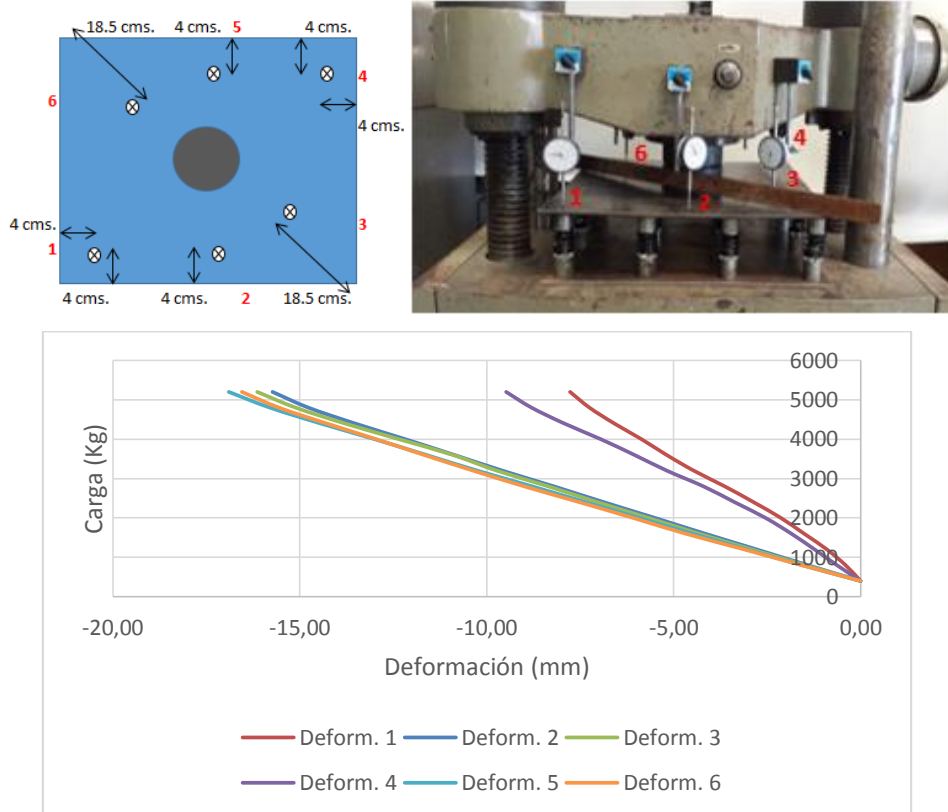
desciende menos que en los puntos 2, 3 y 6, lo que reflejó una deformación cóncava de la platina en general pero más pronunciada, como se indica en la figura a continuación:

Figura 4-22: Deformación observada en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes



Por otra lado, la gráfica de Carga (kg) versus Deformación (mm) corresponde al proceso de carga desde los 400 kg hasta los 5200 kg en intervalos de 400 kg. También se encontraron diferencias en las deformaciones según la ubicación de cada deformímetro.

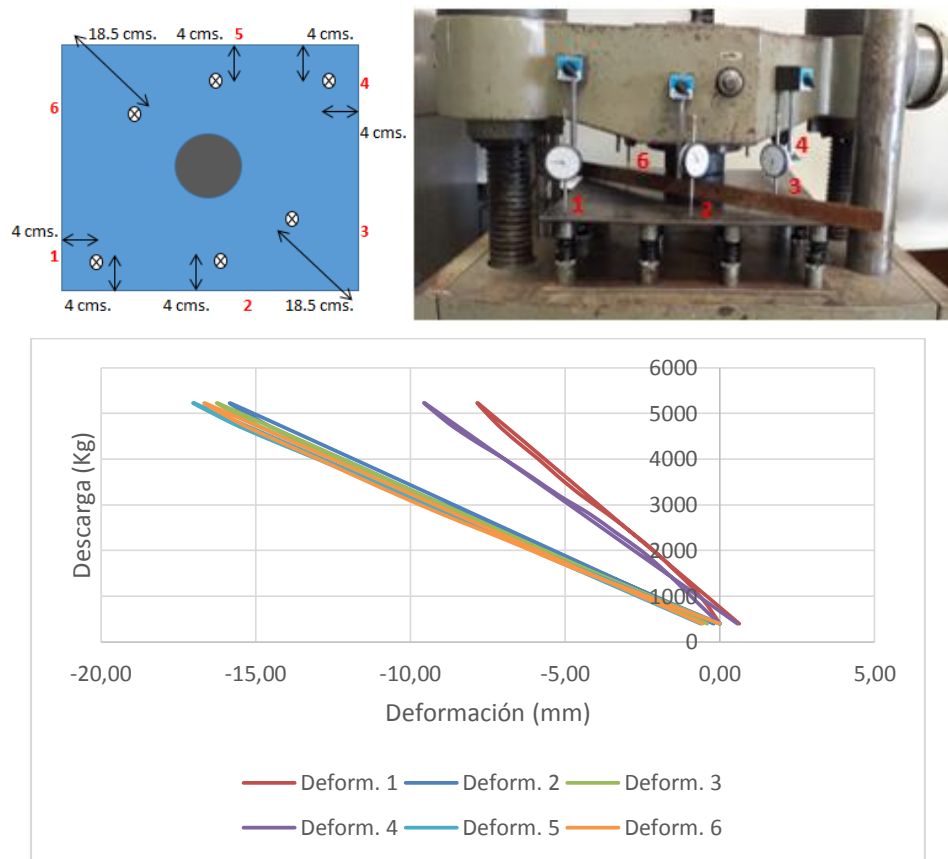
Figura 4-23: Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes



Para los puntos 1 y 4 las deformaciones obtenidas fueron -7.77 y -9.48 mm respectivamente, mientras que para los puntos 2, 3, 5 y 6 fueron de -15.73 , -16.14 , -16.90 y -16.55 mm respectivamente. De manera similar al ensayo anterior, los resortes cercanos a las puntas de la platina sufrieron una menor deformación que los resortes ubicados debajo del área de presión que ejercía el pistón. Sin embargo, se pudo notar que estos resortes tuvieron una mayor deformación, debido a que la platina siendo más delgada se deformó en mayor proporción para las cargas aplicadas.

Igualmente, se graficó el proceso de carga y descarga, iniciando y retornando a los 400 kg en intervalos de 400 kg, como se muestra a continuación:

Figura 4-24: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre resortes



De igual forma, se encontró que tanto la platina como los resortes se recuperaron completamente y volvieron a su posición inicial sin sufrir ningún daño. Lo que también nos representa para este caso, un comportamiento elástico y lineal del sistema.

4.3. Análisis platina 3/8" sobre recebo

Se utilizó la misma platina de 3/8" de diámetro y de 630 mm x 630 mm, pero apoyada directamente sobre el colchón de recebo compactado, con el fin de poder comparar los resultados obtenidos en el laboratorio, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-25: *Platina 3/8" sobre recebo*



Inicialmente, se tomaron muestras de recebo y con la colaboración del equipo de geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería se realizó el ensayo de cono y arena para obtener la densidad y el grado de compactación del recebo antes de cada ensayo (ve anexo 9 y 10), así como se observa en la figura:

Figura 4-26: Toma de muestra para densidad y compactación del recebo 1



Una vez realizado el ensayo al recebo, se procedió a instalar los deformímetros en la platina, sobre los bloques de concreto y sobre la viga IPE360 como se indica a continuación:

Figura 4-27: Instalación de deformímetros en platina 3/8"



Se inició el proceso de aplicación de carga gradualmente mientras se iban tomando medidas de las deformaciones en cada punto de deformímetros, hasta llegar a una carga de 12159 kg, presentándose deflexión en la viga y fisuras en el recebo, así como pandeo en la platina. (Ver anexo 7). A continuación se muestran imágenes de este fenómeno:

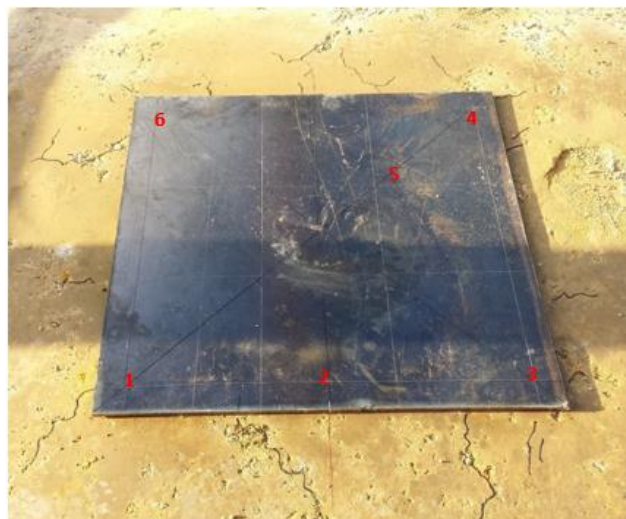
Figura 4-28: Deformación en viga IPE360 durante el ensayo de platina 3/8"



Figura 4-29: Deformación del recebo y platina durante el ensayo de platina 3/8

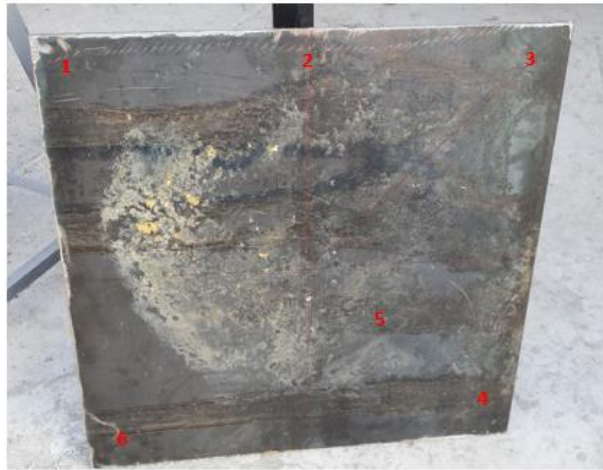


Figura 4-30: Fisuración en el recebo durante el ensayo de platina 3/8



Las fisuras presentadas fueron de manera radial, iniciando su aparición en las esquinas de la platina y posteriormente al tercio de cada cara, con un tamaño máximo de 2 mm, con una longitud de aproximadamente 15 cm., como se puede observar en la figura anterior.

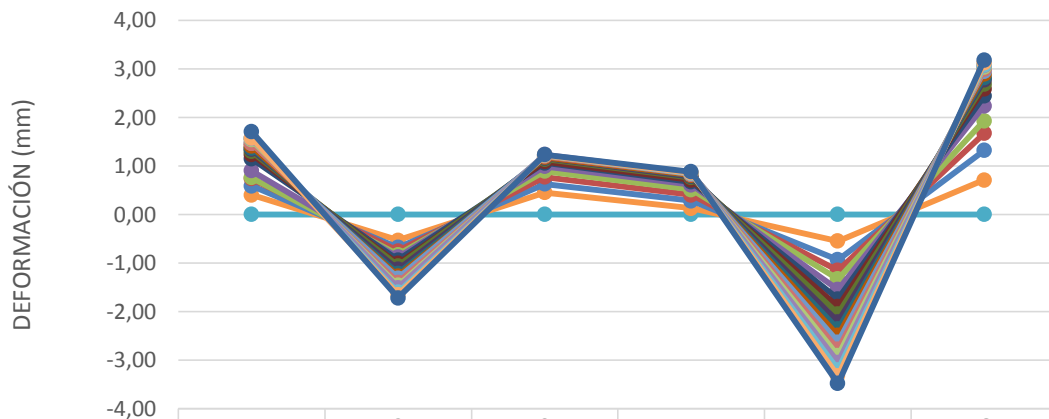
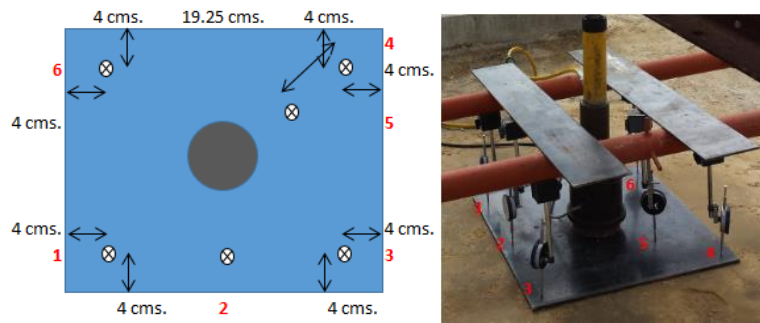
Figura 4-31: Zonas de sobreesfuerzo en la platina 3/8 después del ensayo



Se presentaron zonas de sobreesfuerzo en la platina, principalmente en el eje central donde se encontraba localizado el gato, produciéndose un pequeño descascaramiento de la platina en esta área. Lo anterior indicaría que pudo haber ocurrido fluencia del acero alrededor del pistón.

Las gráficas obtenidas representan este fenómeno. A continuación se muestra el comportamiento del sistema de acuerdo a las cargas aplicadas y las deformaciones obtenidas, mediante la gráfica de deformación (mm) para cada punto de ubicación de deformímetro:

Figura 4-32: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 3/8" sobre recebo



	1	2	3	4	5	6
134 Kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
672 Kg	0,40	-0,53	0,45	0,13	-0,55	0,71
1344 Kg	0,59	-0,68	0,63	0,28	-0,93	1,32
2015 Kg	0,74	-0,75	0,77	0,40	-1,15	1,67
2687 Kg	0,76	-0,83	0,89	0,51	-1,33	1,93
3359 Kg	0,9	-0,88	0,99	0,61	-1,55	2,24
4031 Kg	1,15	-0,94	1,06	0,67	-1,74	2,44
4702 Kg	1,24	-1,01	1,09	0,71	-1,9	2,59
5374 Kg	1,3	-1,06	1,14	0,76	-2,05	2,68
6046 Kg	1,34	-1,13	1,16	0,78	-2,21	2,77
6718 Kg	1,37	-1,21	1,17	0,8	-2,36	2,82
7389 Kg	1,41	-1,27	1,18	0,81	-2,49	2,89
8061 Kg	1,47	-1,31	1,21	0,83	-2,63	2,95
8733 Kg	1,47	-1,4	1,2	0,83	-2,78	2,99
9405 Kg	1,54	-1,46	1,22	0,85	-2,91	3,04
10076 Kg	1,57	-1,51	1,23	0,86	-3,05	3,07
10748 Kg	1,58	-1,6	1,22	0,85	-3,2	3,08
11420 Kg	1,58	-1,65	1,22	0,86	-3,33	3,12
12159 Kg	1,71	-1,72	1,23	0,88	-3,48	3,18

TIPO DE DEFORMÍMETRO

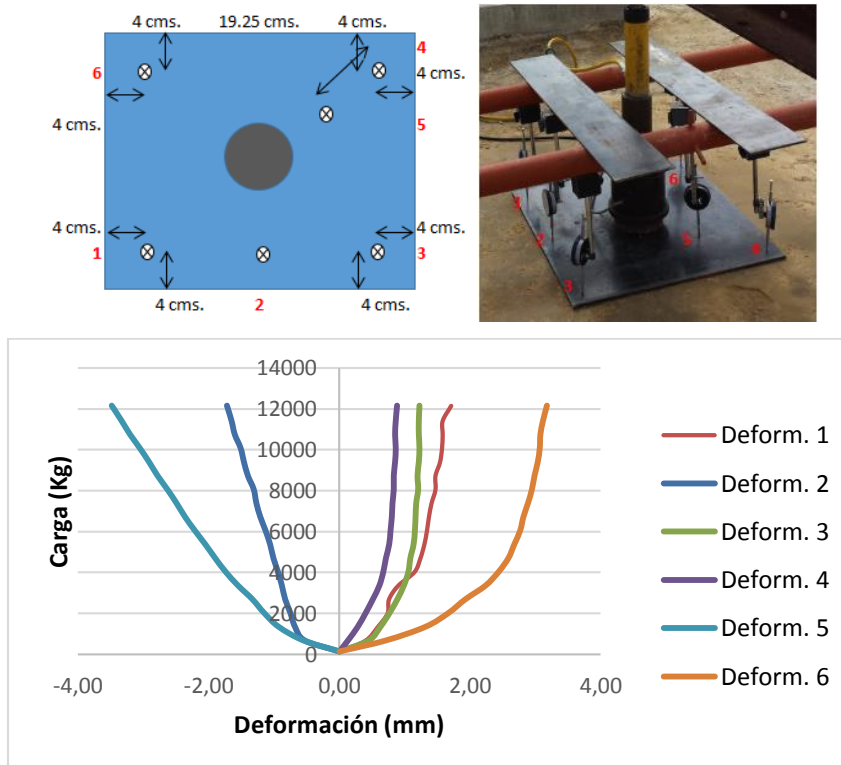
Se puede observar que la platina en los puntos 1, 3, 4 y 6 sufrió deformaciones positivas (hacia arriba) mientras que para los puntos 2 y 5 sufrió deformaciones negativas (hacia abajo). Esto quiere decir que la platina en los puntos 1, 3, 4 y 6 (en sus extremos) sufrió un levantamiento, mientras que en los puntos 2 y 5 sufrió un hundimiento, lo cual se ve reflejado en una deformación cóncava nuevamente de la platina posterior al ensayo, tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 4-33: Deformación observada en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo



Por otra parte, la gráfica de Carga (kg) versus Deformación (mm) corresponde al proceso de carga desde los 134 kg hasta los 12159 kg en intervalos de 672 kg. Se pudo observar una variación en las deformaciones según la ubicación de cada deformímetro.

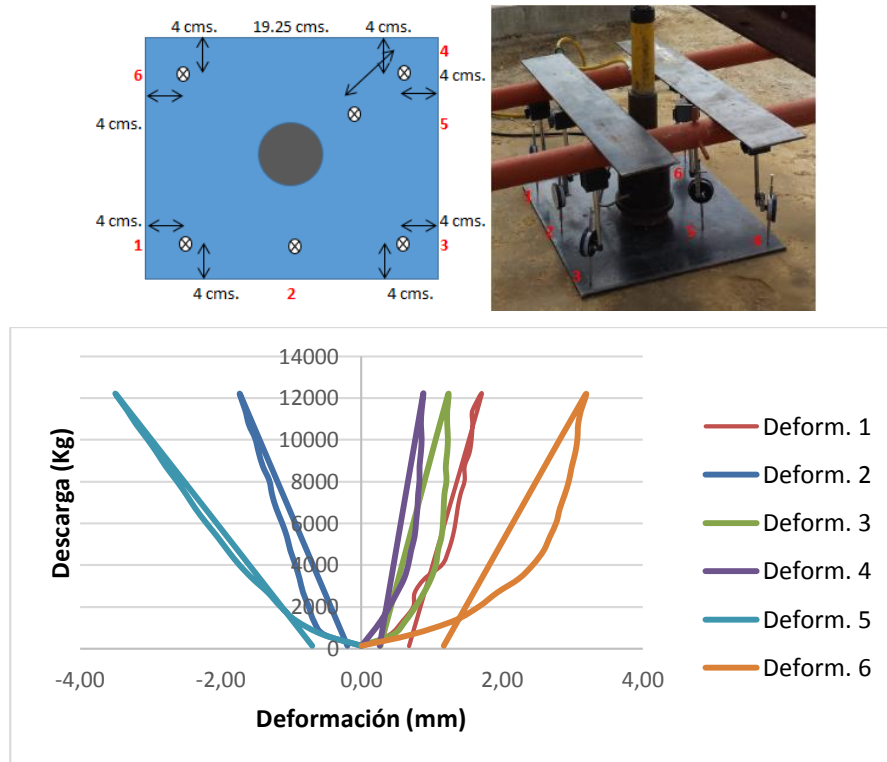
Figura 4-34: Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo



Para los puntos 1, 3, 4 y 6 las deformaciones obtenidas fueron 1.71, 1.23, 0.88 y 3.18 mm respectivamente, mientras que para los puntos 2 y 5 fueron de -1.72 y -3.48 mm respectivamente. Lo anterior indica, que las puntas de las platinas sufrieron una gran deformación hacia arriba, y la zona ubicada debajo del área de presión que ejercía el gato se deformó hacia abajo presionando el terreno con mayor fuerza en esta área.

Por otra parte, se graficó el proceso de carga y descarga, iniciando y retornando a los 134 kg en intervalos de 672 kg, así como se muestra a continuación:

Figura 4-35: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 3/8" posterior al ensayo sobre recebo



Pudiéndose observar que la platina se recuperó casi completamente y volvió a su posición inicial sin sufrir deformaciones permanentes a simple vista, pero en cambio el suelo sí presentó fisuras visibles irreparables. Lo anterior representa un comportamiento aparentemente elástico para la platina y un comportamiento inelástico para el suelo.

4.4. Análisis platina 1/4" sobre recebo

De igual forma que el ensayo anterior, se utilizó la misma platina de 1/4" de espesor y de 630 mm x 630 mm, la cual también fue apoyada sobre la base de recebo, como se indica a continuación:

Figura 4-36: *Platina 1/4" sobre recebo*



También se tomaron muestras de recebo, con el fin de obtener la densidad y el grado de compactación del mismo antes de cada ensayo (ver anexo 2), así como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4-37: *Toma de muestra para densidad y compactación del recebo 2*



Inmediatamente se procedió a instalar los deformímetros sobre los mismos puntos del ensayo anterior: en la platina, sobre los muertos de concreto y sobre la viga IPE360 (Ver figura 4-22).

Posteriormente, se inició el proceso de aplicación de carga de manera gradual mientras se iban tomando medidas de las deformaciones en cada punto de deformímetro, hasta llegar a una carga de 12092 kg, presentándose deflexión en la viga y fisuras en el recebo, así como pandeo en la platina. A continuación se muestran imágenes de esta situación:

Figura 4-38: *Deformación en viga IPE360 durante el ensayo de platina 1/4"*



Figura 4-39: *Deformación del recebo y platina durante el ensayo de platina 1/4*

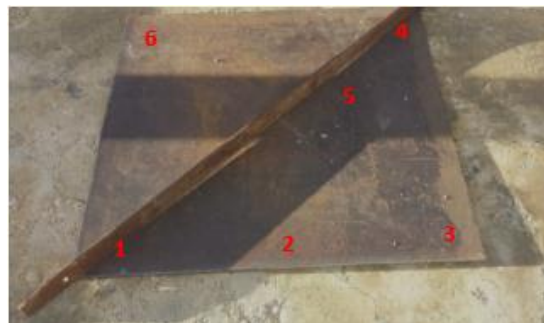


Figura 4-40: *Fisuración en el recebo durante el ensayo de platina 1/4*



Las fisuras presentadas también fueron de manera radial, iniciando su aparición en las esquinas de la platina y posteriormente al tercio de cada cara, con un tamaño máximo de 2 mm como se puede observar en la figura anterior.

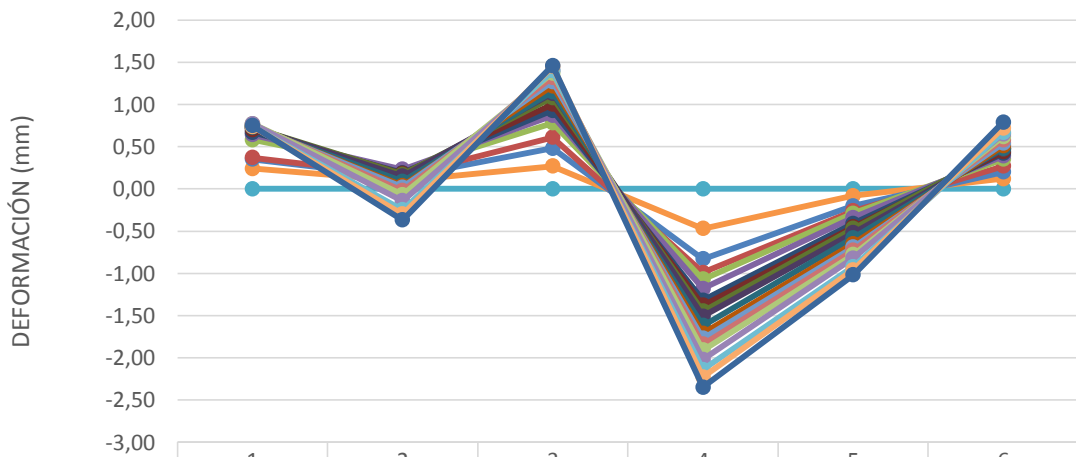
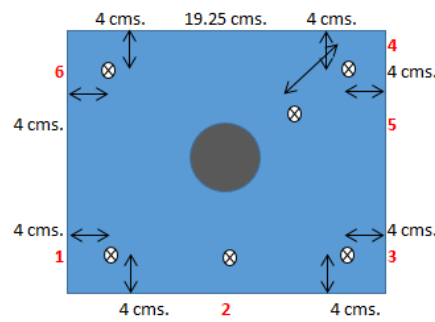
Figura 4-41: Zonas de sobreesfuerzo en la platina 1/4 después del ensayo



Se presentaron las zonas de sobreesfuerzo más marcadas en esta platina, en el eje central donde se encontraba localizado el gato y hacia el punto 4, ocurriendo un proceso de descamación en el acero. Lo anterior también puede reflejar la posible fluencia del material en esta zona.

Las gráficas obtenidas representan este fenómeno. A continuación se muestra el comportamiento del sistema de acuerdo a las cargas aplicadas y las deformaciones obtenidas, mediante la gráfica de deformación (mm) para cada punto de ubicación de deformímetro:

Figura 4-42: Comparativo de resultados de deformación para puntos de deformímetro en platina 1/4" sobre recebo



	1	2	3	4	5	6
134 Kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
672 Kg	0,24	0,10	0,27	-0,47	-0,08	0,12
1344 Kg	0,35	0,14	0,48	-0,83	-0,20	0,2
2015 Kg	0,37	0,16	0,61	-0,99	-0,26	0,27
2687 Kg	0,58	0,22	0,78	-1,07	-0,29	0,35
3359 Kg	0,64	0,23	0,87	-1,18	-0,34	0,39
4031 Kg	0,67	0,19	0,93	-1,32	-0,41	0,42
4702 Kg	0,7	0,18	1,00	-1,38	-0,45	0,44
5374 Kg	0,73	0,17	1,08	-1,45	-0,47	0,47
6046 Kg	0,73	0,15	1,13	-1,51	-0,52	0,47
6718 Kg	0,73	0,09	1,15	-1,62	-0,58	0,48
7389 Kg	0,74	0,04	1,22	-1,71	-0,65	0,51
8061 Kg	0,75	0,02	1,27	-1,77	-0,69	0,54
8733 Kg	0,76	-0,02	1,32	-1,84	-0,73	0,58
9405 Kg	0,77	-0,07	1,37	-1,91	-0,78	0,62
10076 Kg	0,77	-0,14	1,4	-2,02	-0,82	0,65
10748 Kg	0,74	-0,25	1,4	-2,14	-0,92	0,67
11420 Kg	0,74	-0,3	1,45	-2,23	-0,96	0,72
12092 Kg	0,75	-0,37	1,46	-2,35	-1,02	0,79

TIPO DE DEFORMÍMETRO

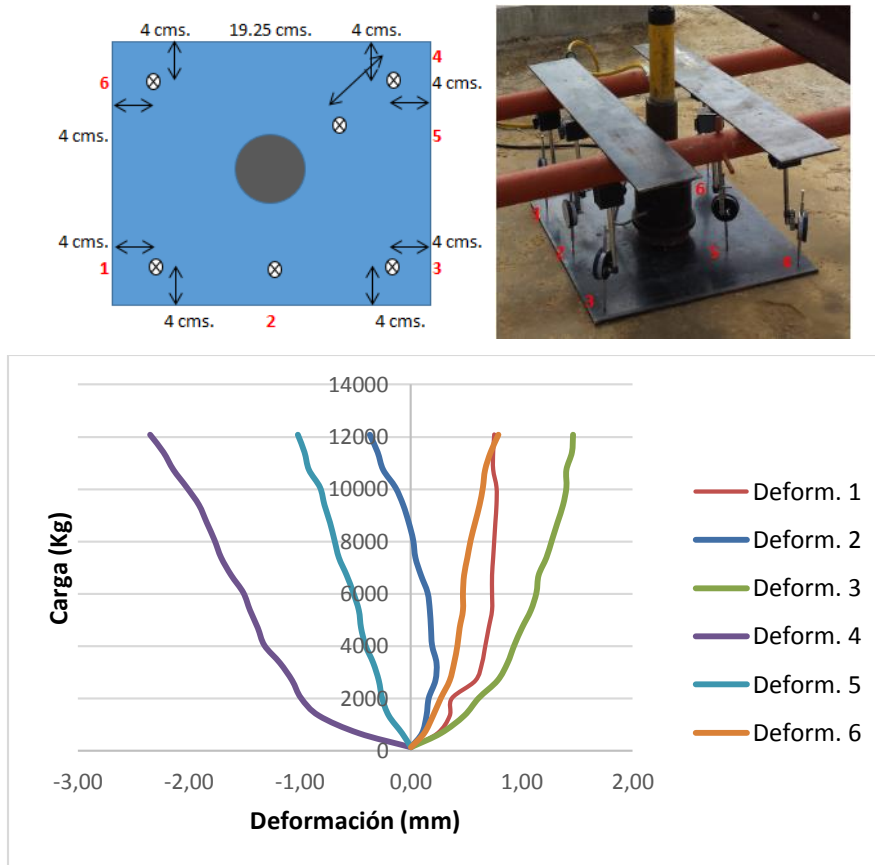
Se puede observar que la platina en los puntos de los deformímetros 1, 3 y 6 sufrió deformaciones positivas (hacia arriba) mientras que para los puntos 2, 4 y 5 sufrió deformaciones negativas (hacia abajo). Esto quiere decir que la platina en los puntos 1, 3, y 6 (en sus extremos) sufrió un levantamiento, mientras que en los puntos 2, 4 y 5 sufrió un hundimiento, en este caso se refleja un comportamiento diferente para el punto 4, lo cual indica un hundimiento inesperado produciéndose una deformación semi-cóncava con alabeo hacia el punto 4 de la platina posterior al ensayo, debido a que la platina es más delgada y posiblemente el recebo estuvo más blando o menos confinado que en los otros puntos, tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 4-43: *Deformación observada en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo*



Por otra parte, la gráfica de Carga (kg) *versus* Deformación (mm) que se muestra corresponde al proceso de carga desde los 134 kg hasta los 12092 kg en intervalos de 672 kg. Se encontró igualmente una variación en las deformaciones según la ubicación de cada deformímetro.

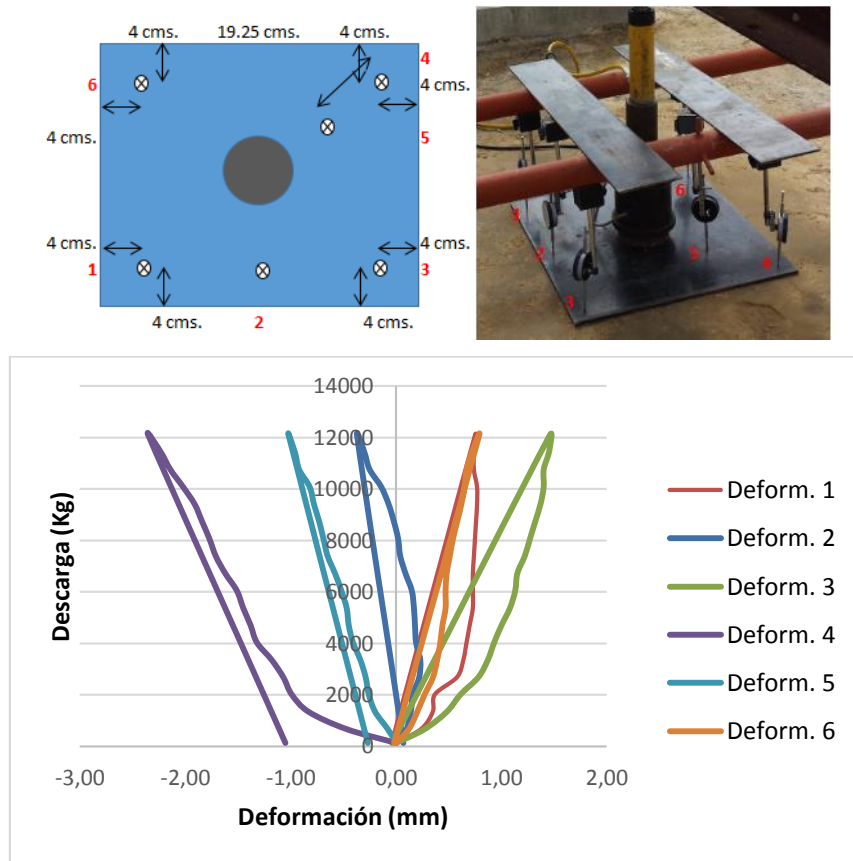
Figura 4-44: Gráfica de carga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo



Para los puntos 1, 3 y 6 las deformaciones obtenidas fueron 0.75, 1.46 y 0.79 mm respectivamente, mientras que para los puntos 2, 5 y 4 fueron de -0.37, -1.02 y -2.35 mm respectivamente. Esto demuestra, que las puntas de las platinas siguen sufriendo una gran deformación hacia arriba, a excepción del punto 4 y la zona ubicada debajo del área de presión que ejercía el gato se deformó hacia abajo presionando el terreno con mayor fuerza en esta área. Igualmente, se ve reflejado en una forma cóncava de la platina pero con cierto alabeo hacia el punto 4.

Por otra parte, se graficó el proceso de carga y descarga, iniciando y retornando a los 134 kg en intervalos de 672 kg, como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 4-45: Gráfica de descarga (Kg) vs deformación (mm) en la platina 1/4" posterior al ensayo sobre recebo



Se observa nuevamente que aparentemente la platina se recuperó por completo y volvió a su posición inicial sin sufrir una deformación visible y permanente, pero en cambio el suelo, de manera similar al ensayo anterior, presentó fisuras irreparables. Estos resultados siguen representando un comportamiento posiblemente elástico para la platina y un comportamiento inelástico para el suelo.

5. ANÁLISIS MATEMÁTICO

Modelamiento en ANSYS: ANSYS es un software de análisis por elementos finitos (FEA) el cual permite obtener soluciones aproximadas a problemas en diferentes áreas de la ingeniería. Estos problemas incluyen: problemas tipo estático/dinámico, análisis estructurales (lineal y no lineal), transferencia de calor, mecánica de fluidos, acústicos y electromagnéticos. ANSYS ofrece dos diferentes interfaces para trabajar en un problema, la primera denominada ANSYS *Mechanical* APDL (ANSYS *Parametric Design Language*) interfaz no tan amigable como ANSYS *Workbench*. Ambas interfaces tienen diferentes puntos fuertes que pueden ser utilizados:

Ventajas del *Workbench*:

- Asociación bidireccional con software CAD.
- Mejores herramientas para la simplificación de un problema.
- Métodos avanzados de mallado.
- Facilidad de uso
- Detecta y crea conexiones automáticamente

Ventajas del *Mechanical*:

- Control directo en el tipo de elementos, los nodos individuales y los elementos.
- Todas las opciones para los tipos de elemento.
- Personalización del APDL, macros, *scripts*.

La solución de un problema por el método de elementos finitos principalmente se basa en tres etapas:

- Pre-procesamiento
- Solución
- Post-procesamiento

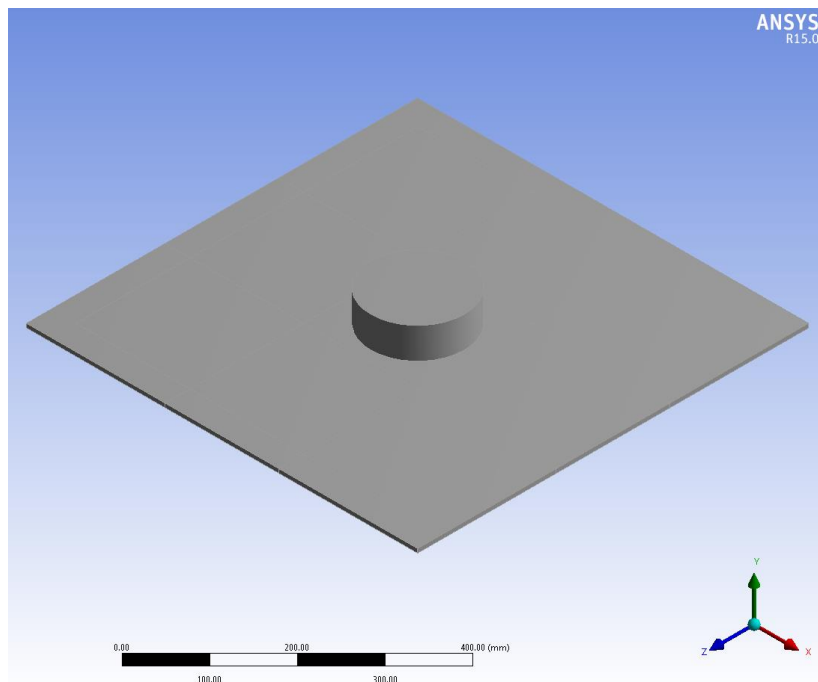
En la etapa de pre-procesamiento se introducen los datos de entrada del problema, los cuales se usaran para obtener una solución. Estos datos de entrada son las propiedades de los materiales, la geometría, el tipo de análisis, el mallado, las cargas y condiciones de

contorno. La etapa de solución consiste simplemente en ejecutar el conjunto de parámetros establecidos. Esta solución es automática y genera los resultados. La etapa del post-procesamiento es en la cual se muestran ya sea gráficamente o en tablas los resultados obtenidos.

5.1. Modelo platinas sobre resortes

De acuerdo al diagrama de flujo de modelado en ANSYS se inició modelando la geometría del problema en el módulo llamado “*DesignModeler*”. Con el fin de transmitirle la carga del pistón de la forma en que se hizo en los ensayos experimentales, se modeló igualmente un elemento que simulara el pistón.

Figura 5-1: Geometría de la platina de 630 mm x 630 mm en espesores de 1/4” y 3/8”



Obtenida la geometría se insertaron las propiedades características del acero A36 de acuerdo a la ASTM A36/A36. A continuación se muestra el material modelado:

Figura 5-2: Propiedades del acero A-36

Properties of Outline Row 3: Acero A36				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus ...		
5	Young's Modulus	2E+05	MPa	
6	Poisson's Ratio	0.26		
7	Bulk Modulus	1.3889E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7.9365E+10	Pa	
9	Tensile Yield Strength	250	MPa	
10	Tensile Ultimate Strength	400	MPa	

Una vez definidos los materiales y la geometría, estos fueron importados al módulo “*Mechanical*” donde se modelaron las condiciones de frontera del análisis. Entre las condiciones de frontera tenidas en cuenta se encuentran la gravedad, el empotramiento en la base de los resortes, y la fuerza aplicada mediante el pistón sobre las platinas.

Para el modelado de resortes en ANSYS se utilizó la herramienta denominada “*Spring*” el cual tiene como parámetros de entrada la rigidez longitudinal del resorte.

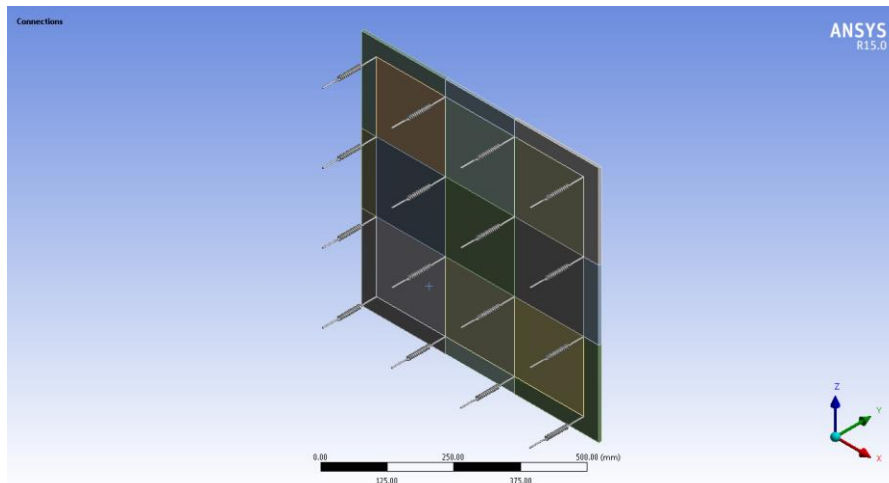
Figura 5-3: Herramienta “*Spring*” y sus parámetros de entrada

Body-Ground Body-Body

- Fixed
- Revolute
- Cylindrical
- Translational
- Slot
- Universal
- Spherical
- Planar
- General
- Bushing
- Spring
- Bearing
- Beam

Graphics Properties	
Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both
<input type="checkbox"/> Longitudinal Stiffness	221.01 N/mm
<input type="checkbox"/> Longitudinal Damping	0. N-s/mm
Preload	None
Suppressed	No
Spring Length	143.65 mm
Scope	
Reference	
Mobile	

Figura 5-4: Resortes ubicados en el modelo de platina 1/4" y 3/8"



Una vez definidos los resortes se realizó el mallado del sólido. Para este mallado se utilizó un tamaño de elemento máximo de 1 cm, con el fin de obtener precisión en los resultados obtenidos. Finalizado el mallado se obtuvo una cantidad de 48086 nodos y 7531 elementos, lo cual es una cantidad adecuada teniendo en cuenta el gasto computacional que requiere y su tiempo de ejecución.

Figura 5-5: Mallado del modelo de platina 1/4" y 3/8"

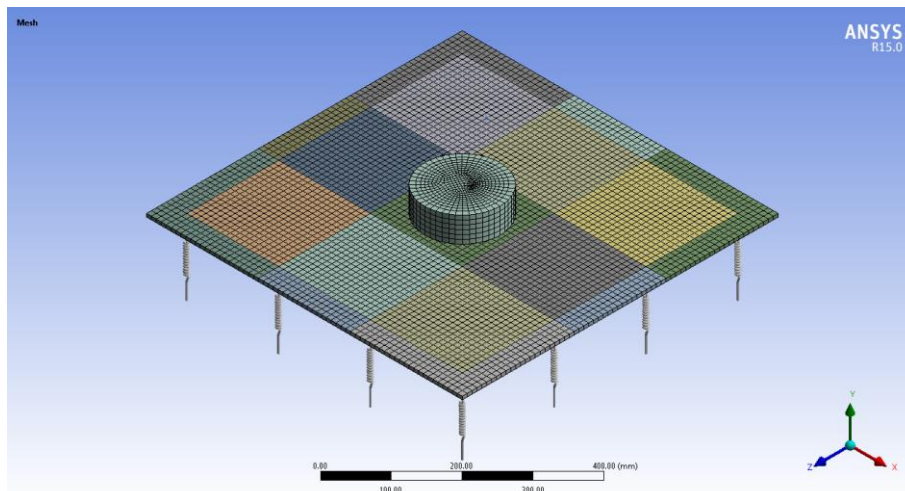
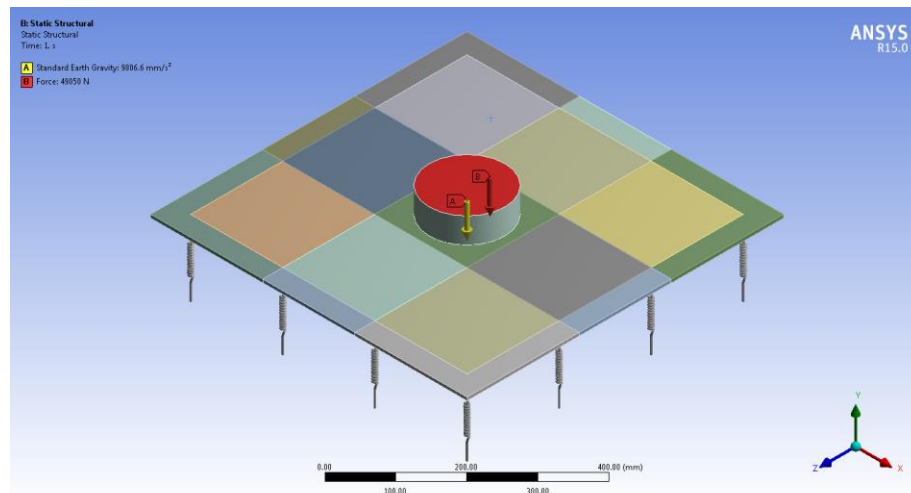


Tabla 1. Número de nodos y elementos después del mallado para platina 1/4" y 3/8"

Statistics	
Nodes	48086
Elements	7531
Mesh Metric	None

Con el fin de colocar los resortes dispuestos de la forma en que se realizó en los ensayos de laboratorio, se dividió el sólido de las platinas de tal forma que los resortes quedaran en la misma posición. Luego de tener el cuerpo de las platinas dividido en varios cuerpos, se utilizó un contacto de tipo "Bonded" aplicando la formulación MPC (*Multi Point Constraints*). Este tipo de contactos es ideal al momento de unir dos cuerpos pensando en que todas las cargas que pasen por el contacto sean transmitidas tal cual son aplicadas. En la figura 5-6 se puede apreciar lo mencionado:

Figura 5-6: Condiciones de frontera del modelo de platina 1/4" y 3/8"



5.1.1. Platina 1/4" y 3/8" sobre resortes

Una vez definida la geometría del modelo, el mallado, las condiciones de frontera y las características de los materiales, se evaluó la etapa de post-procesamiento, donde se le solicitó al software ANSYS que presentara los resultados correspondientes a los esfuerzos de *Von-Misses*, la deformación total en toda la superficie de las platinas y la deformación en los puntos donde se ubicaban los deformímetros en el ensayo del laboratorio.

Figura 5-7: Esfuerzos generados sobre la platina 1/4" y 3/8"

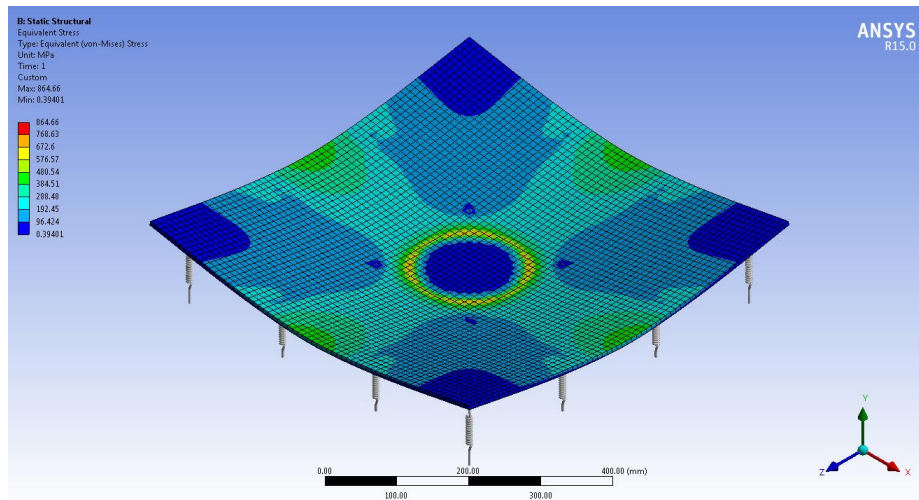
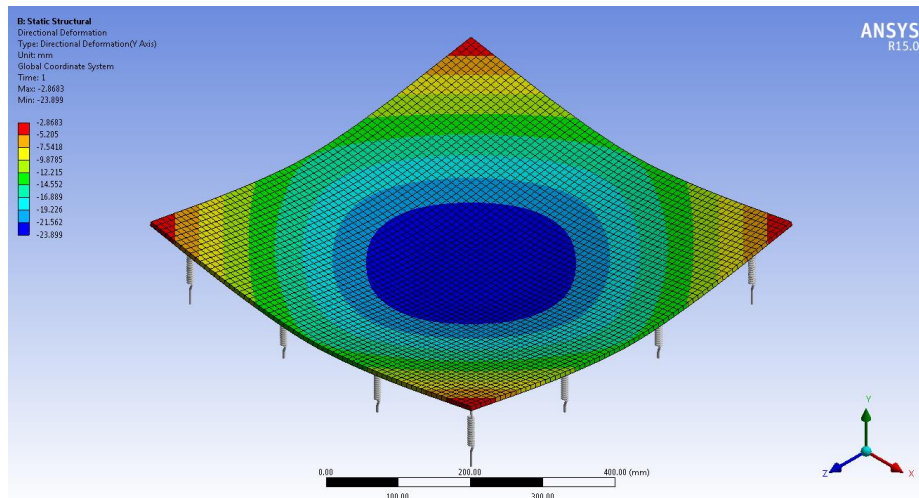


Figura 5-8: Deformación generada en la platina 1/4" y 3/8"



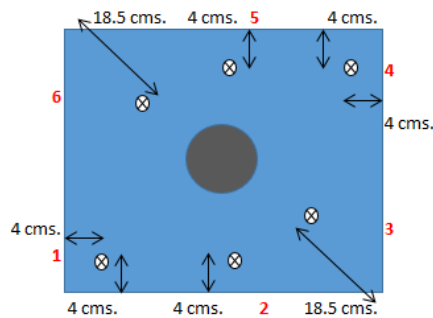
Como se puede apreciar en la Figura 5-7 los esfuerzos máximos generados en las platinas por la aplicación de la carga se presentaron en los ejes longitudinal y transversal de la platina, pudiendo observar una concentración local de esfuerzos en el centro de la platina generada por el contacto del pistón.

Con respecto a la Figura 5-8, donde se muestran los desplazamientos máximos y mínimos alcanzados por las platinas, los mismos concuerdan con lo ocurrido en el ensayo realizado

en el laboratorio; es decir, los desplazamientos máximos fueron generados en el centro de las platinas mientras que los mínimos se encontraban en las esquinas de las platinas.

Debido a que en un modelo matemático todo es ideal, los puntos pares de ubicación de deformímetros localizados en lados opuestos se modelaron con un solo punto de deformímetro.

Figura 5-9: Ubicación de deformímetros en la platina 1/4" y 3/8"



A continuación se muestran las deformaciones en cada uno de los puntos de ubicación de los deformímetros para la platina 1/4" y 3/8":

Figura 5-10: Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 1 y 4

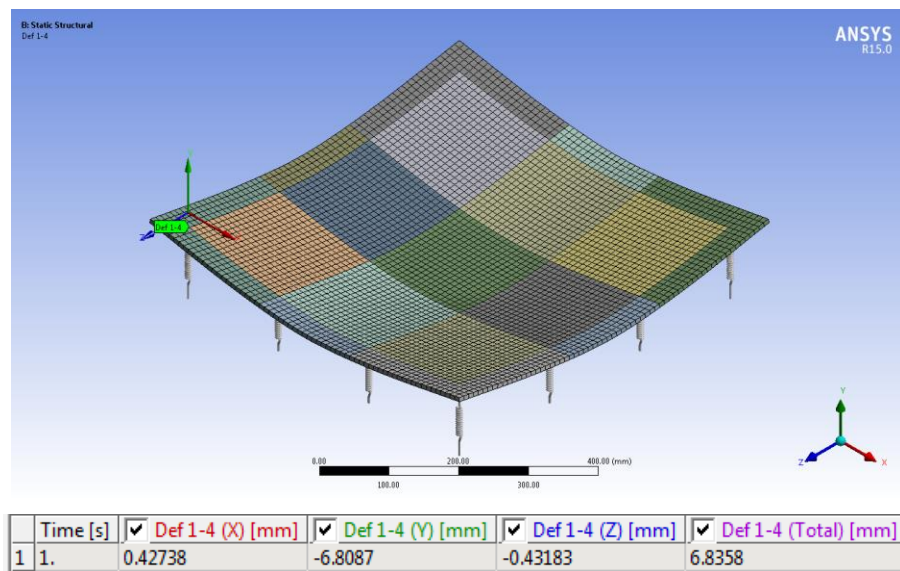


Figura 5-11: Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 3 y 6

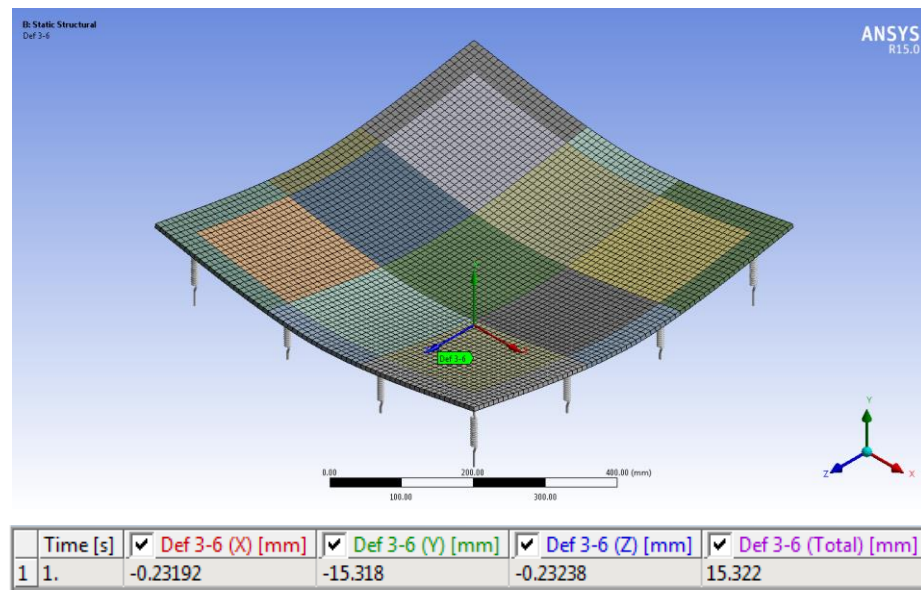


Figura 5-12: Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 2 y 5

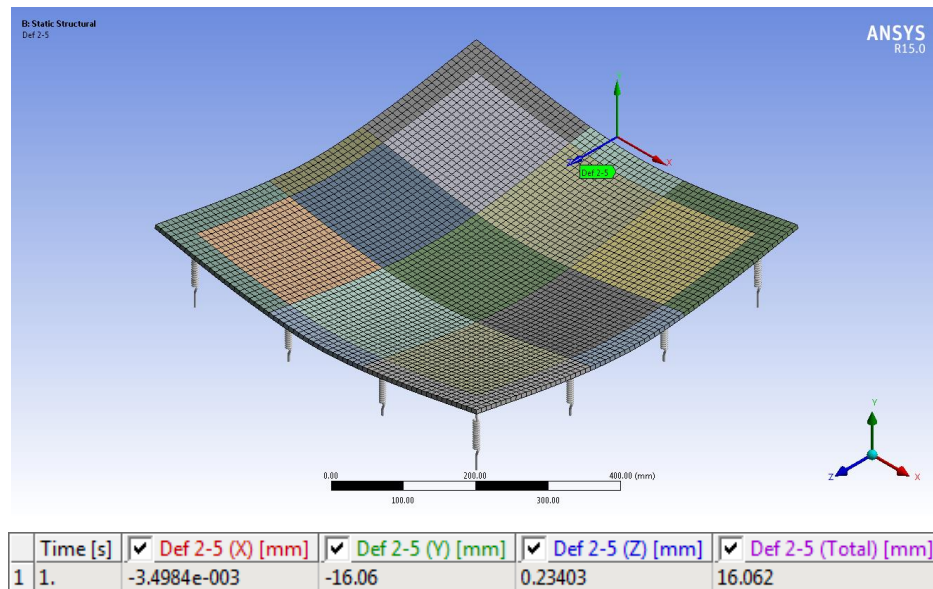


Figura 5-13: Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 1 y 4

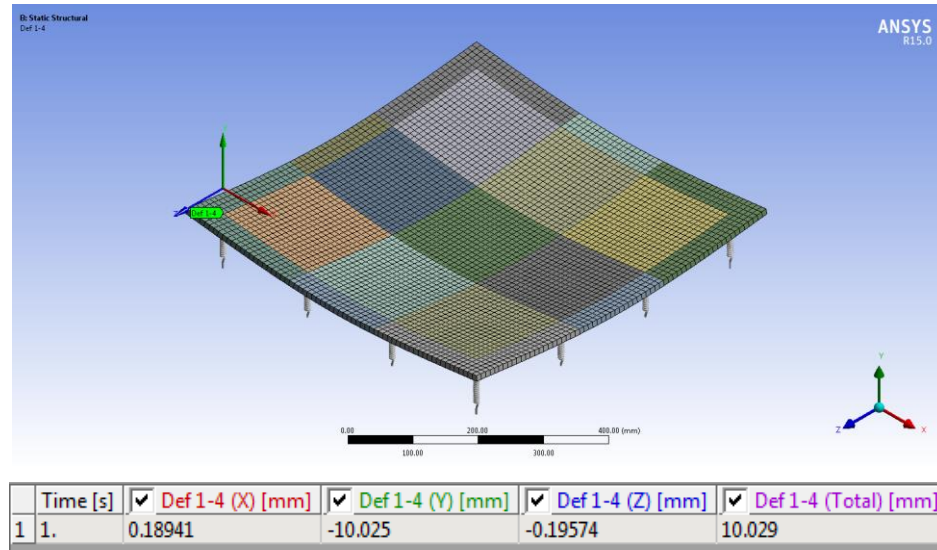


Figura 5-14: Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 3 y 6

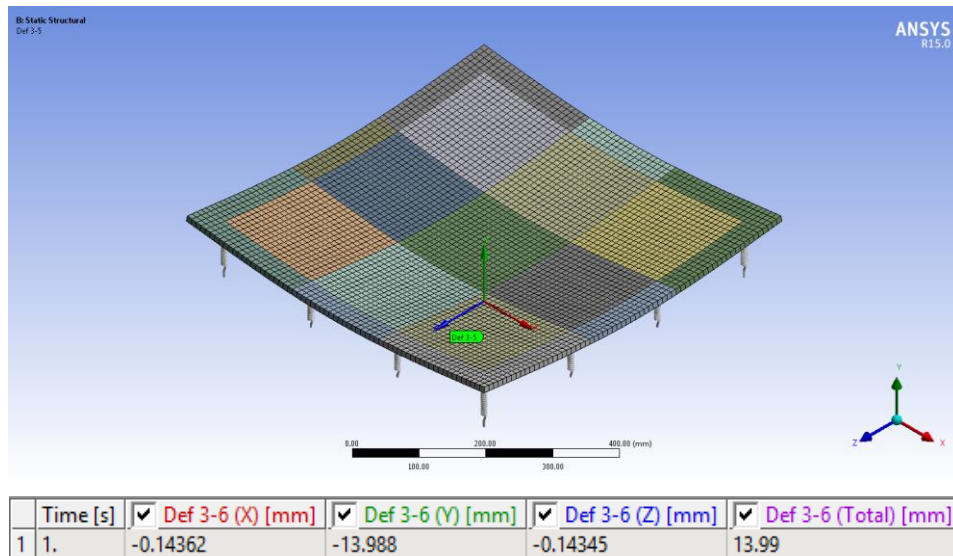
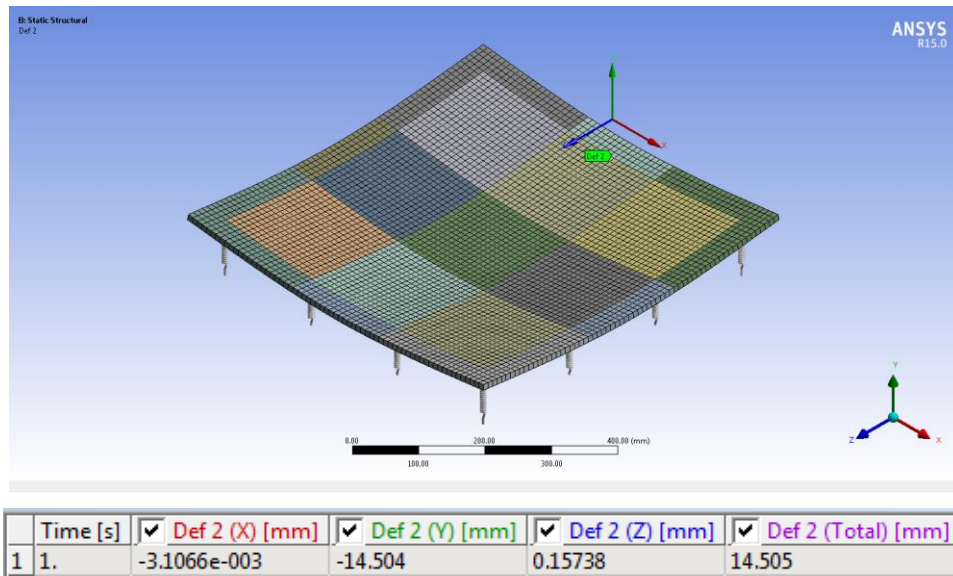


Figura 5-15: Deformación generada en la platina 3/8" en el punto 2



Una vez obtenidos todos los resultados en los diferentes puntos tanto del modelo estructural como de los ensayos del laboratorio para ambas platinas, se realizaron los siguientes cuadros comparativos mostrando los errores obtenidos:

Tabla 2. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 1/4"

	Deformimetro 1 (mm)	Deformimetro 2 (mm)	Deformimetro 3 (mm)	Deformimetro 4 (mm)	Deformimetro 5 (mm)	Deformimetro 6 (mm)
MODELO EXPERIMENTAL	-7,8	-15,7	-16,1	-9,5	-16,9	-16,6
MODELO ANSYS	-6,8	-16,1	-15,3	-6,8	-16,1	-15,3
ERROR (%)	12,4%	2,4%	5,1%	28,2%	4,7%	7,4%

Tabla 3. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 3/8"

	Deformimetro 1 (mm)	Deformimetro 2 (mm)	Deformimetro 3 (mm)	Deformimetro 4 (mm)	Deformimetro 6 (mm)
MODELO EXPERIMENTAL	-9,4	-13,6	-13,2	-10,0	-13,1
MODELO ANSYS	-10,0	-14,5	-14,0	-10,0	-14,0
ERROR (%)	6,5%	6,9%	6,3%	0,1%	6,6%

Comparados los resultados para la platina 1/4" y 3/8" (según las tablas 2 y 3), se puede evidenciar que lo obtenido mediante el modelo matemático es similar a lo obtenido en el

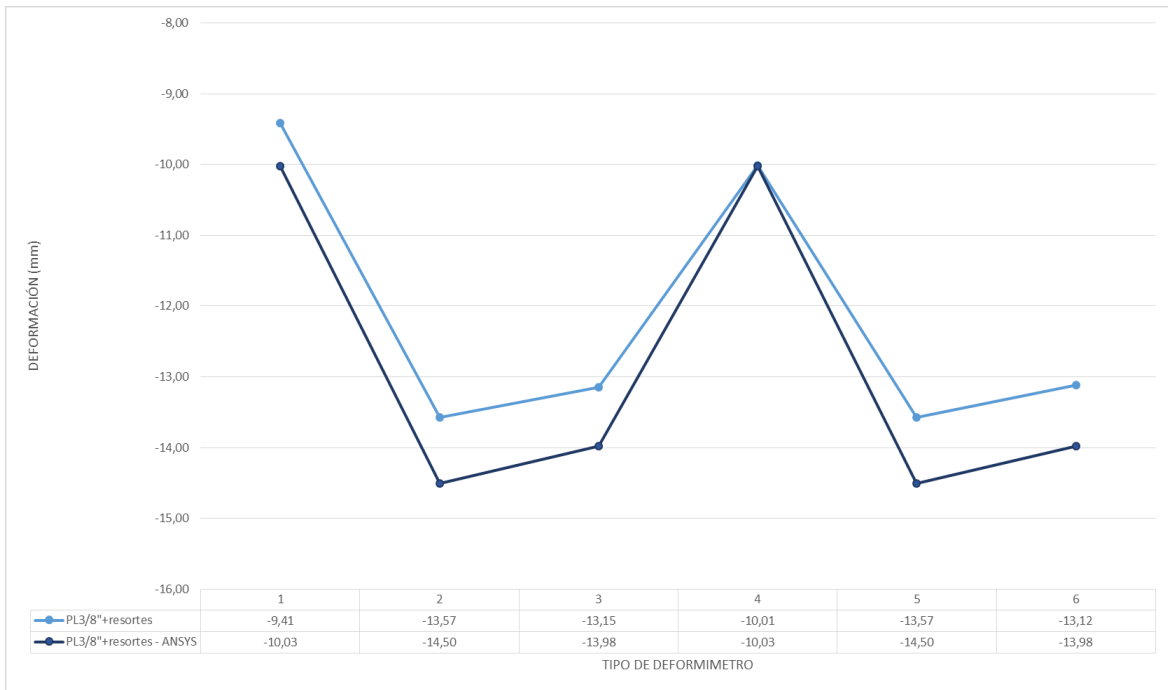
ensayo de laboratorio. Pero analizando los errores obtenidos en los puntos, se podría pensar que los puntos 1 y 4 en la platina 1/4" tuvieron un margen de error mayor debido a una posible deformación inicial de la platina desde el proceso de corte.

Figura 5-16: Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 1/4"



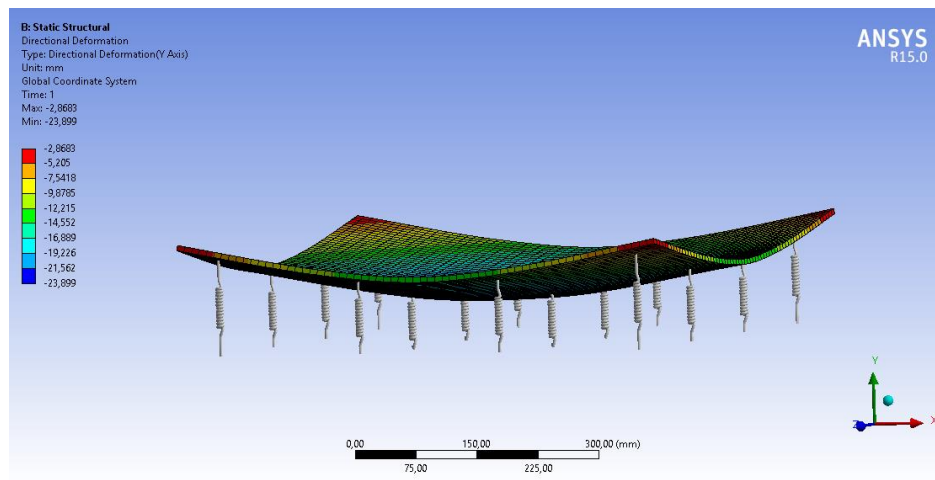
De igual forma, para la platina de 3/8" se obtuvo un margen de error, pero este no sobrepasaba el 6.9%, presentándose una mayor precisión de lo esperado en el modelo matemático.

Figura 5-17: Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 3/8"



Por otra parte, el comportamiento de ambos sistemas en general modelados en ANSYS obedecen a los modelos estudiados en el laboratorio; es decir, la tendencia de la deformada en las platinas y la respuesta de los resortes corresponden a lo obtenido en los ensayos, como se puede observar en las figuras 5-18:

Figura 5-18: Deformación generada en las platinas 1/4" y 3/8"



5.2. Modelo platinas sobre recebo

Para el modelado en ANSYS del ensayo experimental se definieron los mismos materiales tanto para el recebo como para las platinas de ambos ensayos cambiando en la simulación el espesor de platina, ya sea 3/8" o 1/4". A continuación se describirán los materiales definidos y los criterios tenidos en cuenta en el momento de definir los mismos. El modelado consta de tres (3) sólidos: la platina y el cilindro por el cual se aplica la carga, los cuales son en acero A36 y el recebo el cual es un tipo de suelo. A continuación se muestran las propiedades tenidas en cuenta al inicio de la modelación en cada material.

Figura 5-19: Propiedades acero A36 para modelo 3D ANSYS de platina 3/8" y 1/4" sobre recebo

Properties of Outline Row 5: Acero A36			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m ⁻³ ▼
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M... ▼	
5	Young's Modulus	2E+11	Pa ▼
6	Poisson's Ratio	0.26	
7	Bulk Modulus	1.3889E+11	Pa
8	Shear Modulus	7.9365E+10	Pa
9	Tensile Yield Strength	250	MPa ▼
10	Tensile Ultimate Strength	400	MPa ▼

Figura 5-20: Propiedades del recebo para modelo 3D ANSYS de platina 3/8" y 1/4" sobre recebo

Properties of Outline Row 4: Recebo OP1			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2000	kg m ⁻³ ▼
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M... ▼	
5	Young's Modulus	139.7	MPa ▼
6	Poisson's Ratio	0.4	
7	Bulk Modulus	2.3283E+08	Pa
8	Shear Modulus	4.9893E+07	Pa
9	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
10	Scale	1	
11	Offset	0	MPa

Con el fin de obtener las propiedades del suelo y la curva esfuerzo-deformación, se realizaron los ensayos en campo (CBR, ensayo de placa, densidad y grado de compactación) (Anexo 9 y 10).

Posteriormente para contemplar la no linealidad del suelo, se utilizó un modelo plástico que relaciona la deformación después del límite elástico y los esfuerzos después del esfuerzo de fluencia del material, se utilizó uno de los modelos matemáticos incorporados en ANSYS llamado “*Multilinear Isotropic Hardening*” (Ver figura 5-21 y 5-22). Éste modelo se basa en caracterizar el comportamiento no lineal del suelo como un conjunto de elementos lineales con diferente límite elástico.

Figura 5-21: Modelos para simular la plasticidad de los materiales

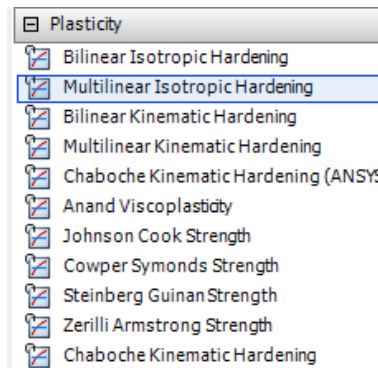
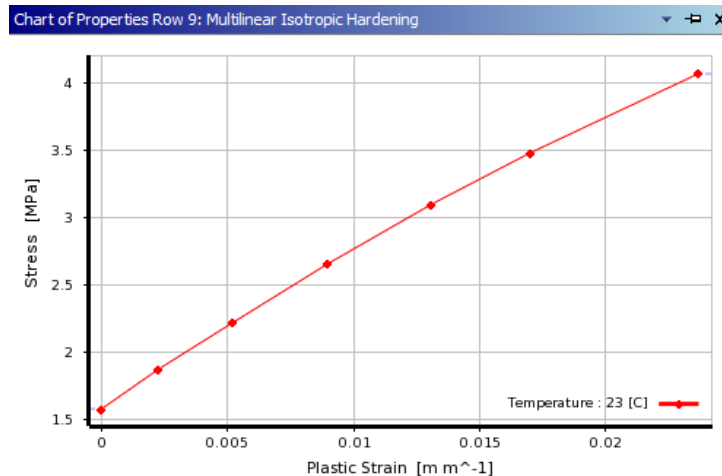


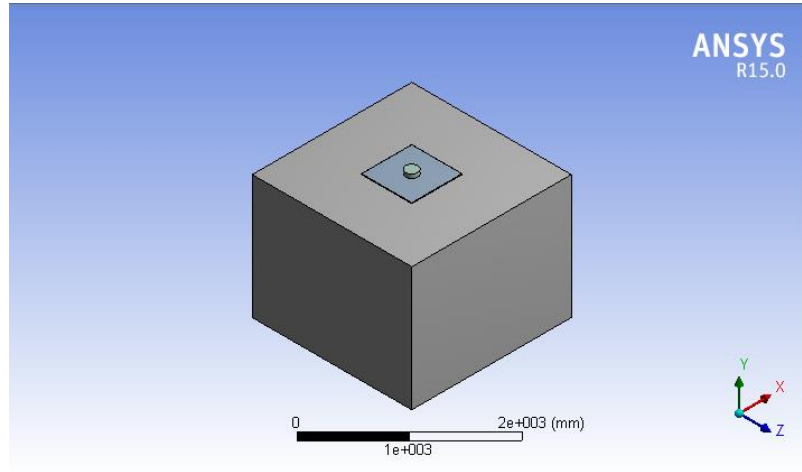
Figura 5-22: Curva esfuerzo-deformación del recebo



La geometría, condiciones de frontera y contactos tenidos en cuenta en el modelo de sólidos tanto para la platina de 3/8” como para la platina de 1/4” apoyada sobre el colchón

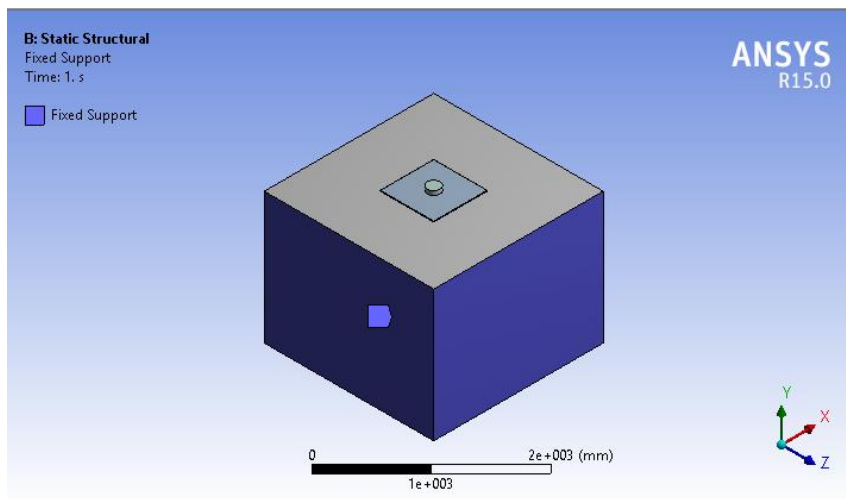
de recebo fueron los mismos, por tal razón a continuación se detalla cada aspecto en común de las dos platinas con diferente espesor.

Figura 5-23: Geometría general de la platina 3/8" y 1/4" apoyada sobre el colchón de recebo



Para la geometría del modelo se tuvieron en cuenta todos los elementos importantes que componían el ensayo realizado en campo. Para las condiciones de frontera debido a que el tamaño del cubo de recebo tenía unas dimensiones considerables, se supuso que el terreno abajo y en el contorno era lo suficientemente grande para empotrar el modelo de análisis.

Figura 5-24: Empotramiento en el contorno del relleno de recebo

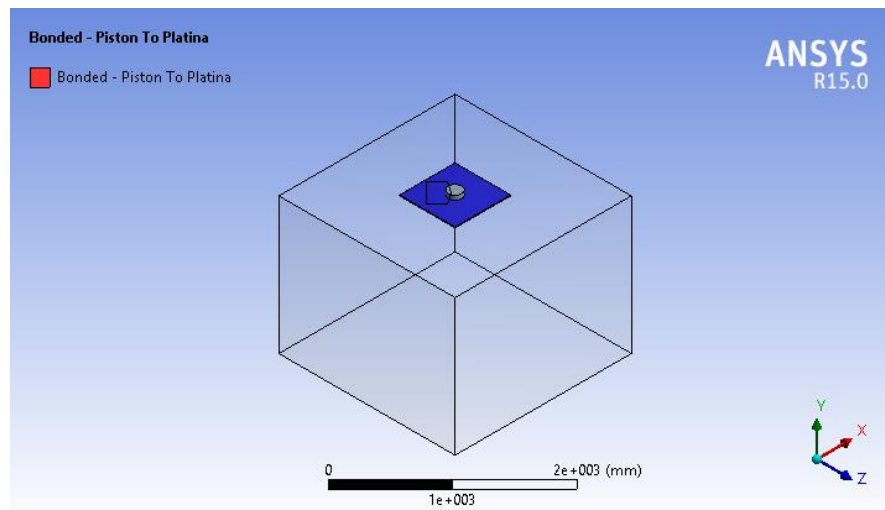


Para simular el contacto entre el pistón y la platina así como el contacto entre la platina y el recebo, ANSYS cuenta con los siguientes tipos de contacto:

- **Rough:** Este tipo de contacto no permite deslizamiento entre las dos superficies que están en contacto utilizando un coeficiente de fricción infinito; sin embargo, sí permite que se separen si la fuerza normal en la superficie de contacto es la necesaria.
- **Bonded:** Este contacto se utiliza en el caso en que se quieran restringir todos los grados de libertad de los nodos que se encuentran unidos mediante el mismo.

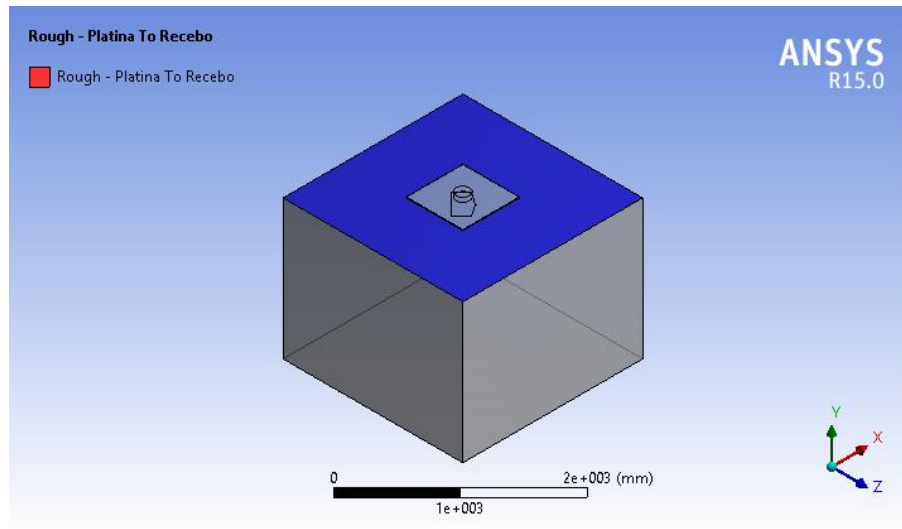
Teniendo en cuenta que el pistón siempre está ejerciendo fuerza sobre la platina y nunca se despegará de la misma, esta conexión fue simulada con “*Bonded*”.

Figura 5-25: Contactos definidos entre el pistón y la platina 3/8” y 1/4”



Por otra parte, de acuerdo a lo observado en el ensayo en campo, tanto la platina de 1/4” como la platina de 3/8” se separaron verticalmente del terreno, por lo que el contacto utilizado en este caso fue “*Rough*”.

Figura 5-26: Contactos definidos entre la platina 3/8" y 1/4" y el recebo



Para la discretización del modelo se utilizaron distintos controles de mallado con el fin de obtener una solución lo más exacta posible teniendo también cuidado en no generar un modelo muy complejo; es decir, con una cantidad de nodos y elementos muy alta, debido al costo computacional que se pueda generar.

Figura 5-27: Herramienta para el Mallado o discretización de los elementos

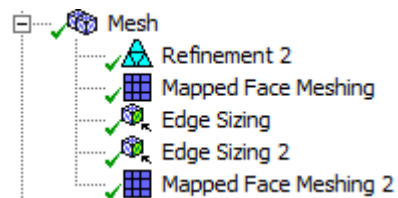
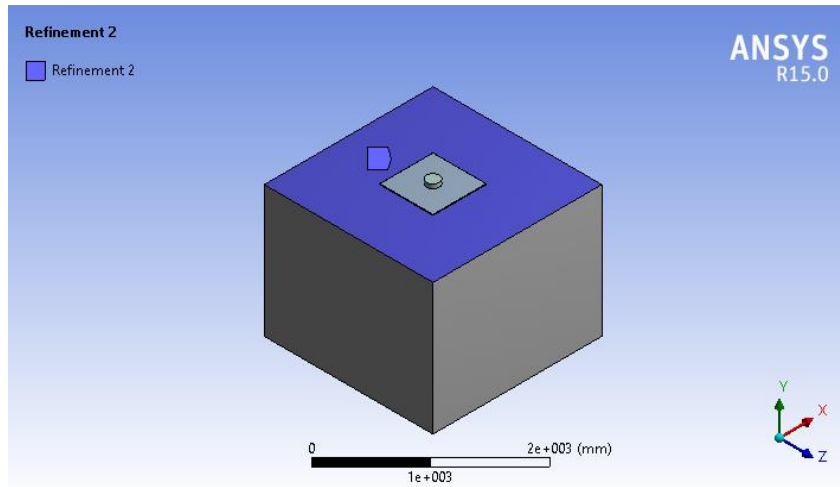


Figura 5-28: Herramienta para el Mallado o discretización de los elementos - “Refinement”



El control denominado “*Refinement*” especifica el máximo número de veces que se le hace un refinamiento al mallado inicial. En la vista detallada del control se especifica el número de veces que se hace el refinamiento siendo 1 el mínimo y 3 el máximo. En este caso debido a que las deformaciones que se querían monitorear detalladamente se encontraban en la parte superior del recebo, se le aplicó este control a la cara en la parte superior. Se eligió realizar un solo refinamiento debido al costo computacional que genera la creación de demasiados nodos y elementos.

Figura 5-29: Vista Detalle del control de Refinamiento

Details of "Refinement 2" - Refinement	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Refinement	1

Posteriormente a la platina se le aplicó la herramienta denominada “*Mapped Face Meshing*” la cual obliga a las caras donde este aplicado a que el mallado se genere en forma de mapeado con elementos rectangulares en la cara, distribuyendo de la mejor manera posible los elementos. Esta herramienta se combinó con la llamada “*Edge Sizing*” la cual puede asignarse de dos tipos, por máximo tamaño del elemento o por número de

divisiones que se quiere alcanzar del elemento. Al combinar estas dos herramientas se logra que se haga un mapeado controlado por el número de divisiones que se quiere buscar.

Figura 5-30: *Mallado o discretización de los elementos - "Mapped Face Meshing"*

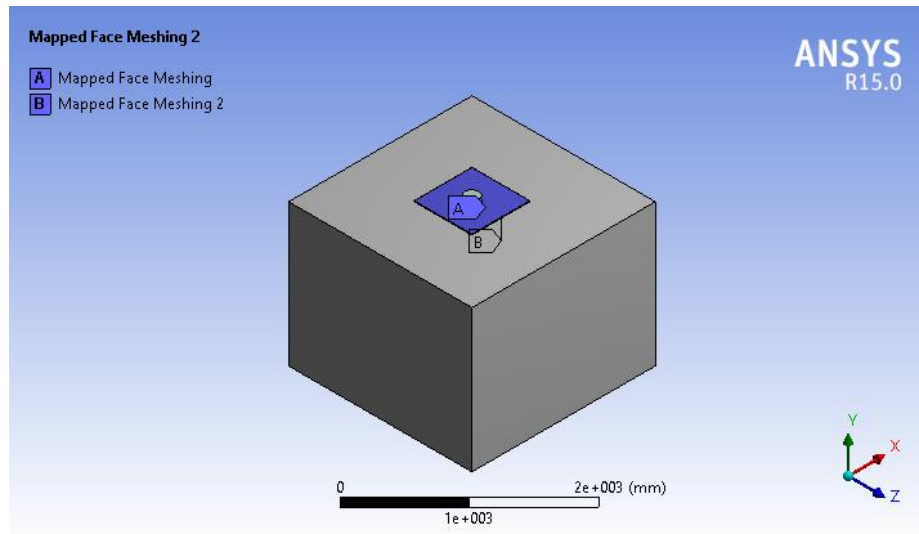
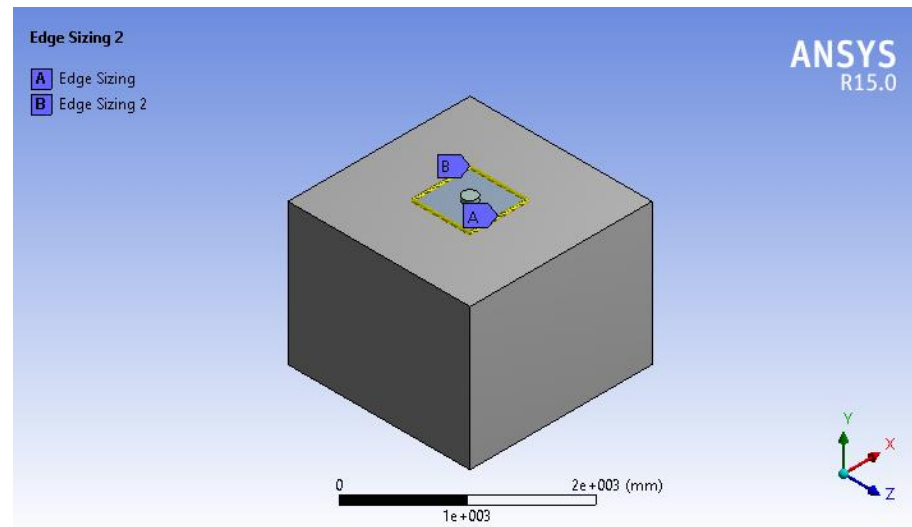


Figura 5-31: *Mallado o discretización de los elementos - "Edge Sizing"*



Una vez aplicados estos controles de mallado se procede a generar el mismo. A continuación se presentan imágenes del mallado obtenido:

Figura 5-32: *Mallado o discretización de los elementos - General*

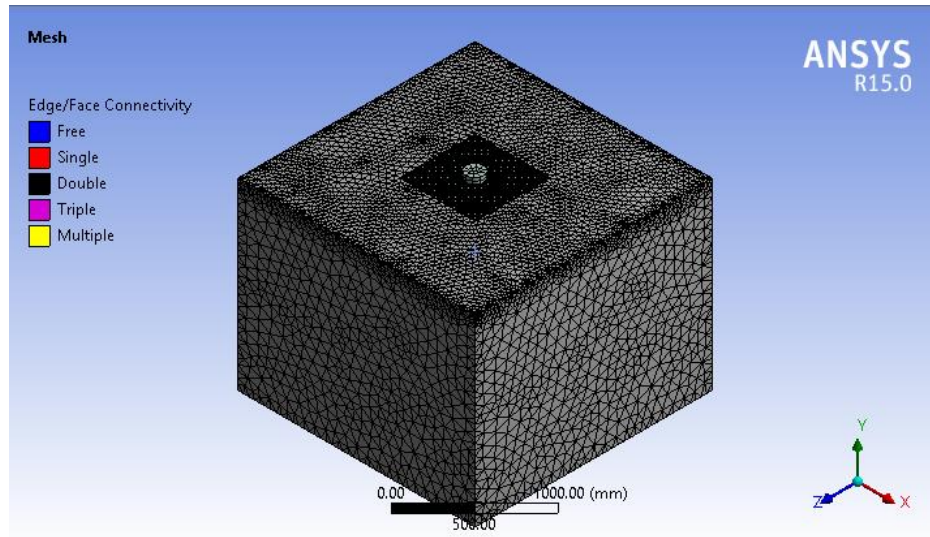


Figura 5-33: *Mallado o discretización de los elementos – Mapeado de la platina*

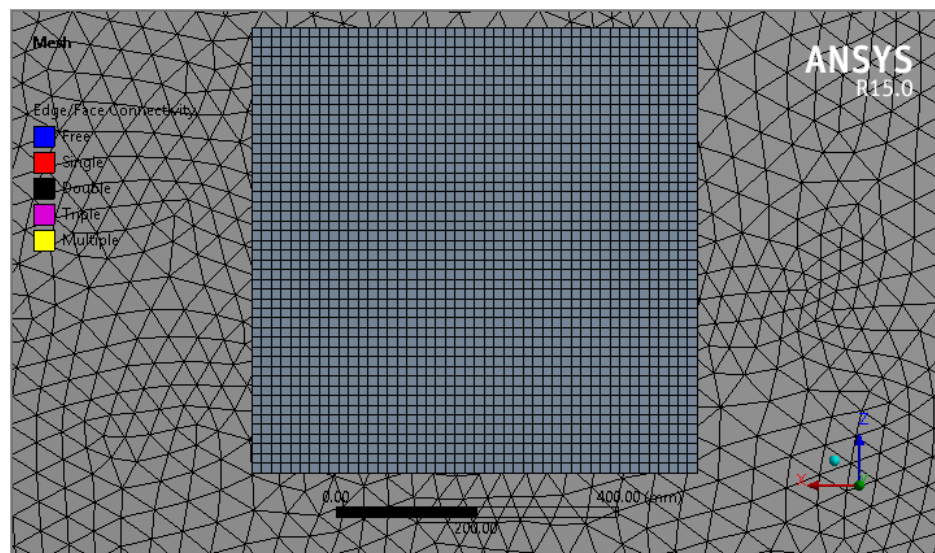


Figura 5-34: Mallado o discretización de los elementos – Refinamiento de la parte superior del Recebo

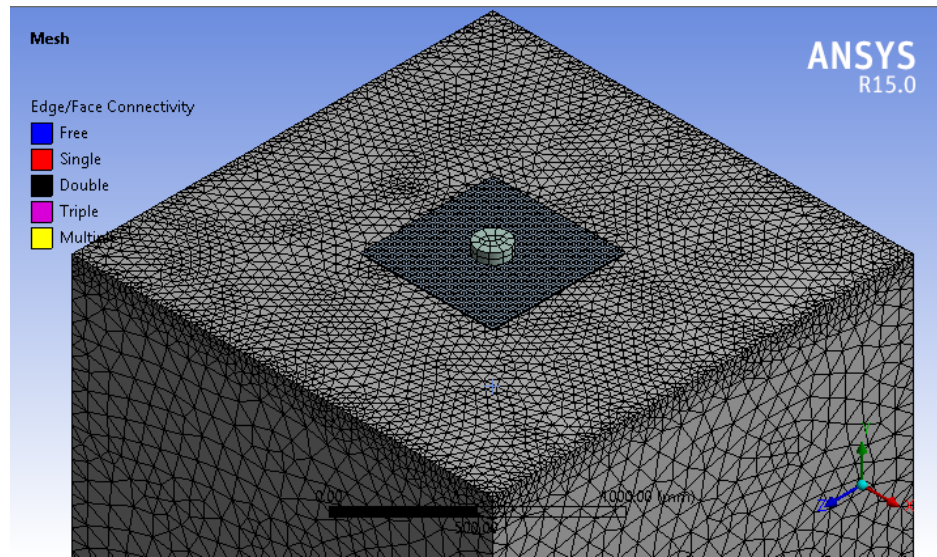


Tabla 4. Cantidad de nodos y elementos obtenidos para la Platina 3/8" y 1/4"

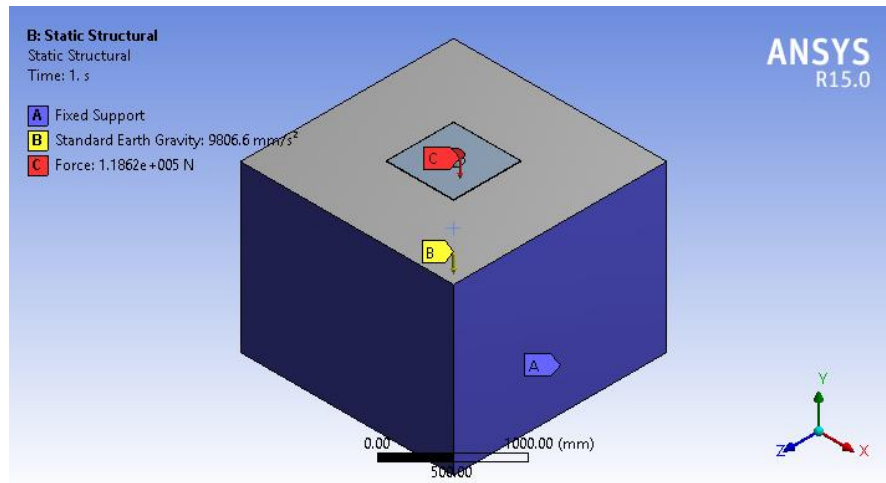
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	136299
<input type="checkbox"/> Elements	70150
Mesh Metric	None

Cuando es obtenido el mallado se procede a aplicar las condiciones de contorno para cada problema. A continuación se presenta lo tenido en cuenta en cada una de las platinas.

5.2.1. Platina 1/4" sobre recebo

Para la platina de 1/4" de espesor se aplicó una fuerza por el pistón de 118.6 kN, teniendo en cuenta tanto la base como el contorno del recebo empotrado por supuesta infinita masa de suelo que lo rodea. Además se tuvo en cuenta la aceleración gravitatoria.

Figura 5-35: Condiciones de frontera de la platina 1/4"



Ejecutado el análisis, el software guarda todo el análisis realizado y mediante el post-procesador o módulo denominado "Solution" se escoge entre las diferentes opciones los resultados que se desean observar. Debido a que se quiere controlar un estado de deformaciones se escogen resultados de este tipo. Para esto se escogió leer la deformación vertical de todo el modelo y se definieron puntos en el lugar donde se encontraban los deformímetros en el ensayo en campo. Además con el fin de verificar si la platina había fluido o no, se encontró el esfuerzo equivalente correspondiente al criterio de falla de *Von-Mises*. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada ítem escogido.

Figura 5-36: Items seleccionados de las deformaciones obtenidas para la platina 1/4"

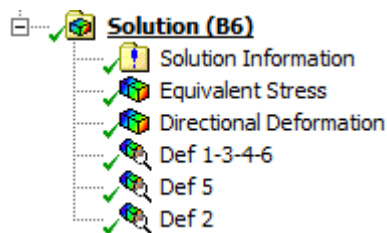
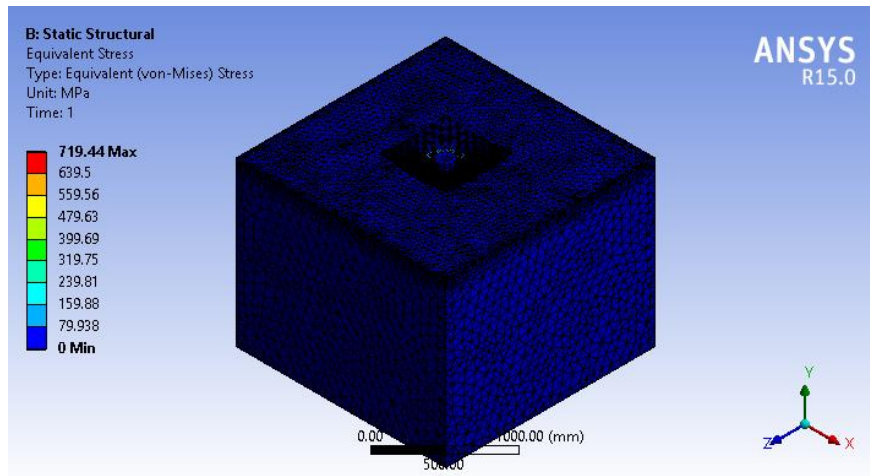


Figura 5-37: Estado de esfuerzos en el modelo con la platina 1/4"



Como se puede observar en la Figura 5-37 la platina de 1/4" alcanzó un esfuerzo en el centro al borde del pistón de 719.4 MPa, lo que de acuerdo al criterio de falla de *Von-Mises* indica que la platina fluyó; sin embargo, si en campo la platina recuperó la deformación producida en el último paso de carga podría pensarse que los esfuerzos encontrados en el modelo son esfuerzos locales que no deberían tenerse en cuenta al momento de analizar la platina. A continuación se realiza un acercamiento a la zona donde el esfuerzo supera los 250MPa que corresponden al límite de fluencia del acero A36.

Figura 5-38: Estado de esfuerzos locales en la platina 1/4"

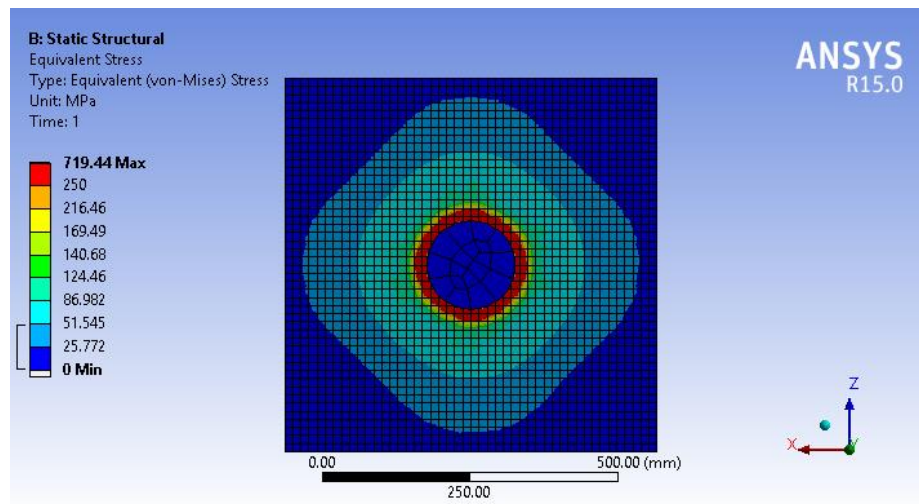


Figura 5-39: Deformación en el modelo de la platina 1/4"

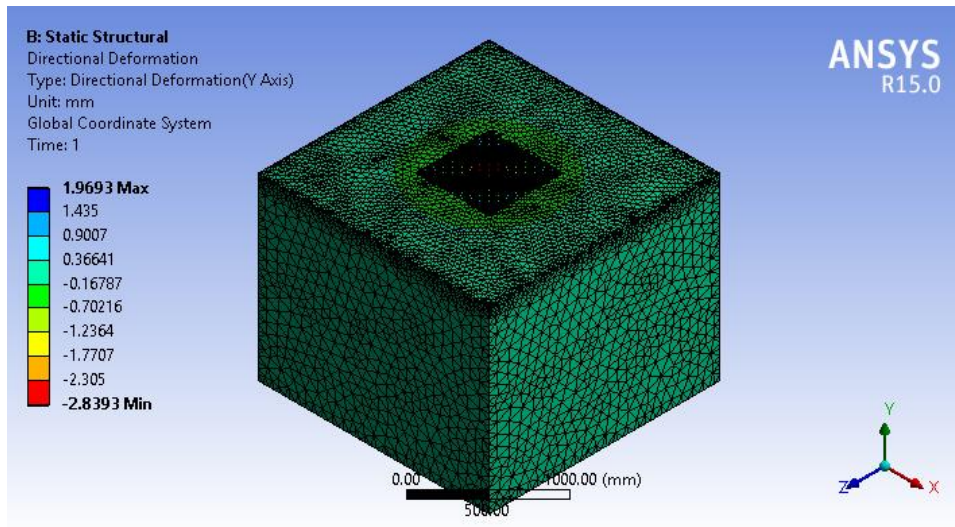
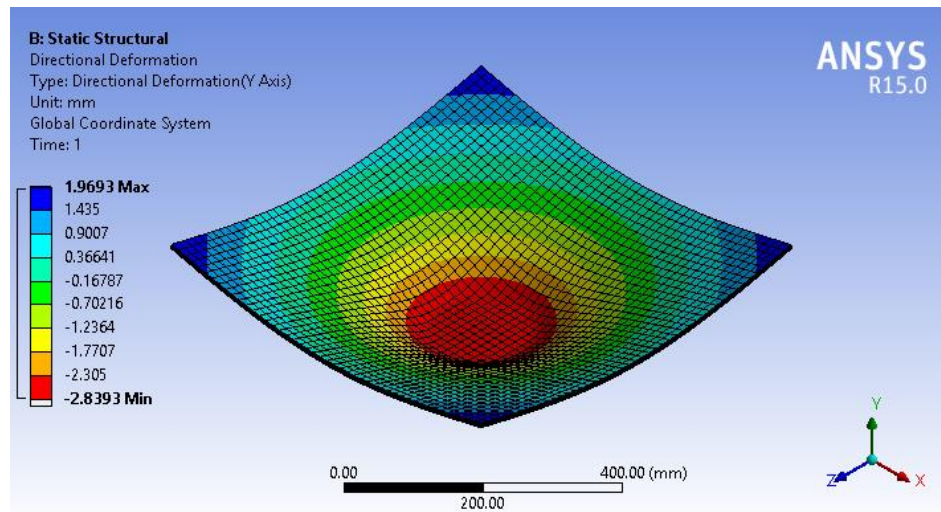


Figura 5-40: Deformación de la platina 1/4"



Como se puede observar la platina sufrió deformaciones hacia abajo en el centro y hacia arriba en los extremos, lo que indica que el comportamiento obtenido en los modelos corresponde al obtenido en campo.

No obstante, a pesar de que se obtuvo el mismo comportamiento en las deformaciones, los resultados tuvieron un porcentaje de error hasta de un 158%. A continuación se muestran los valores obtenidos para cada punto de ubicación de deformímetro en el

modelo y posteriormente se hace la comparación de resultados con respecto a lo registrado en el ensayo de campo.

Figura 5-41: Deformación generada sobre la platina 1/4" en los puntos 1, 3, 4 y 6

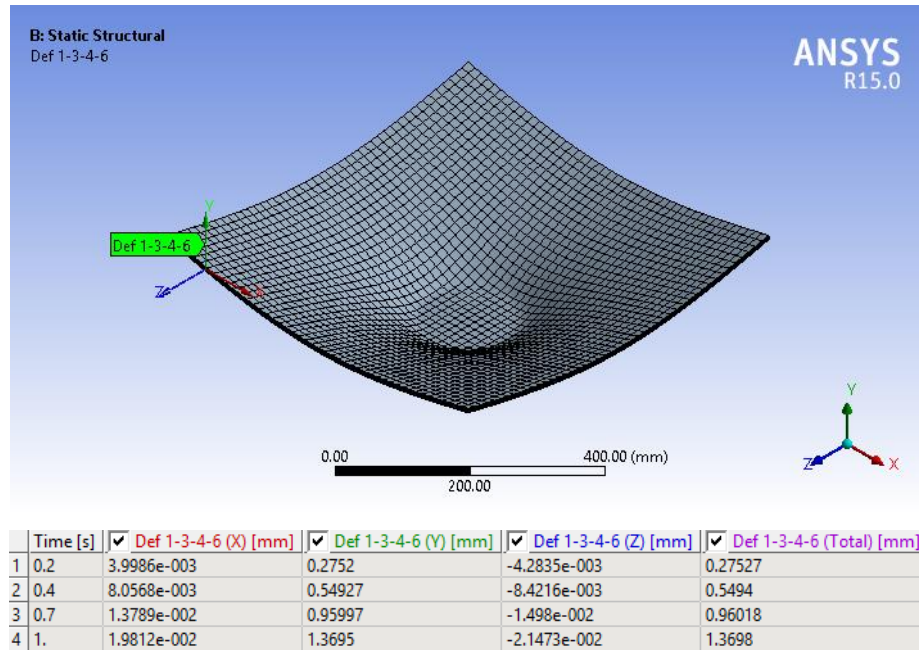


Figura 5-42: Deformación generada sobre la platina 1/4" en el punto 5

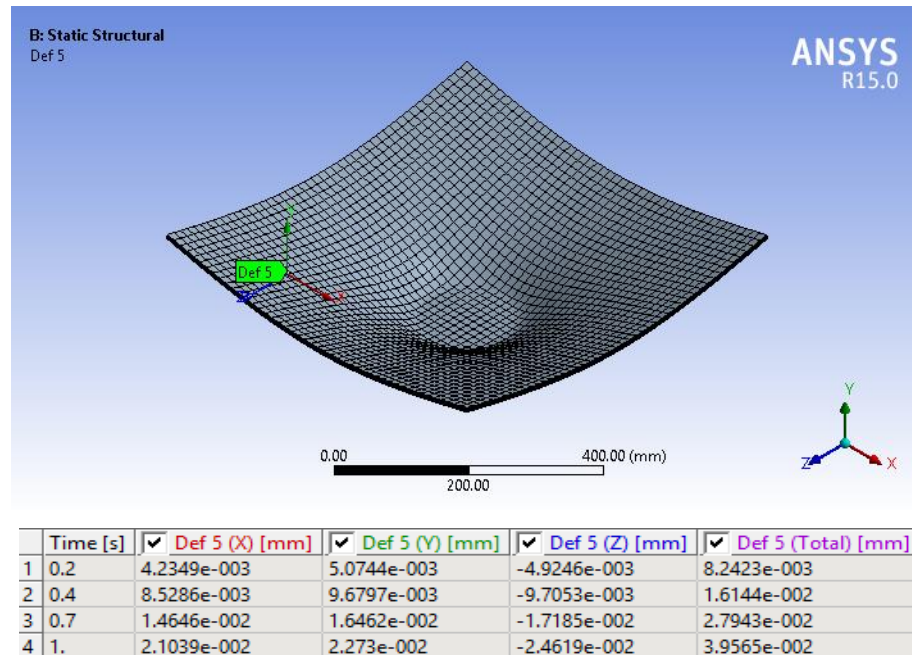
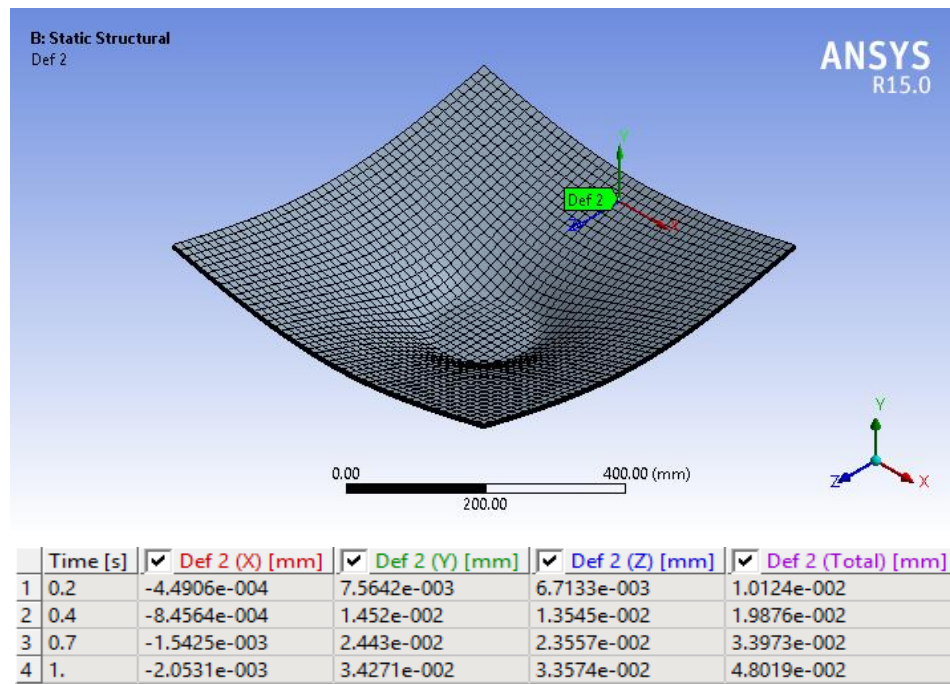


Figura 5-43: Deformación generada sobre la platina 1/4" en el punto 2



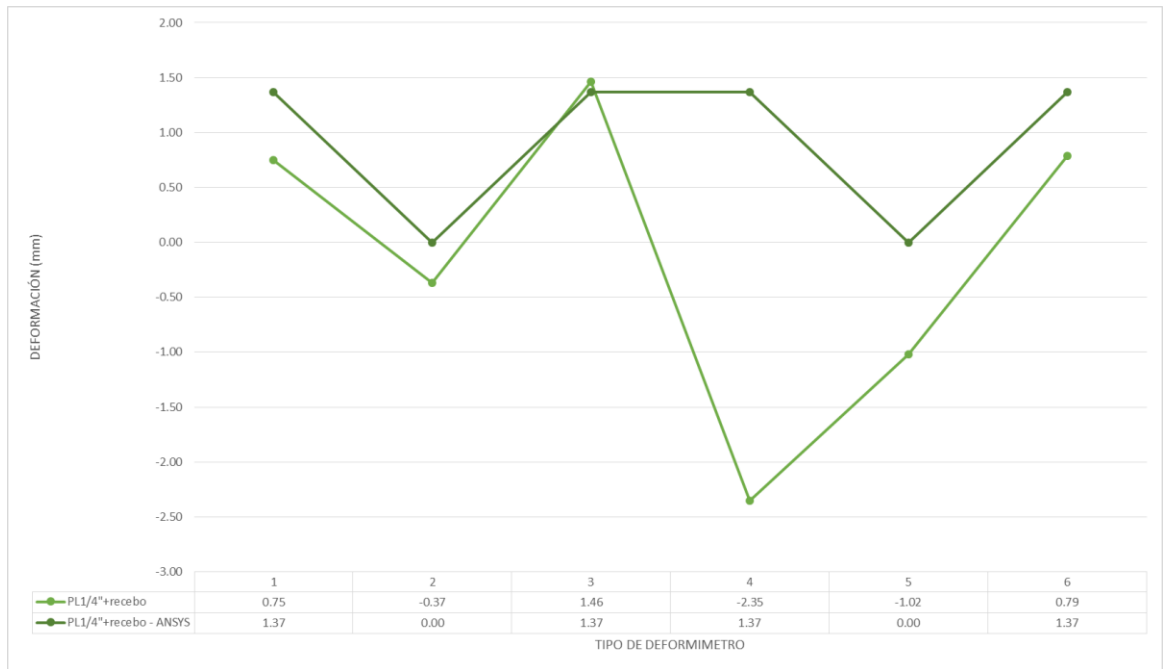
Una vez obtenidos todos los resultados en los puntos de ubicación de deformímetros tanto del modelo estructural como de los ensayos del laboratorio se realizó el siguiente cuadro comparativo mostrando los errores obtenidos.

Tabla 5. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 1/4"

	Deformimetro 1 (mm)	Deformimetro 2 (mm)	Deformimetro 3 (mm)	Deformimetro 4 (mm)	Deformimetro 5 (mm)	Deformimetro 6 (mm)
MODELO EXPERIMENTAL	0.8	-0.4	1.5	-2.4	-1.0	0.8
MODELO ANSYS	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	1.4
ERROR (%)	82.7%	100.0%	6.2%	158.3%	100.0%	73.4%

Analizando los resultados se pudo encontrar que el comportamiento obtenido mediante el modelo matemático es similar al presentado en campo, sin embargo las diferencias son bastante amplias.

Figura 5-44: Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 1/4"

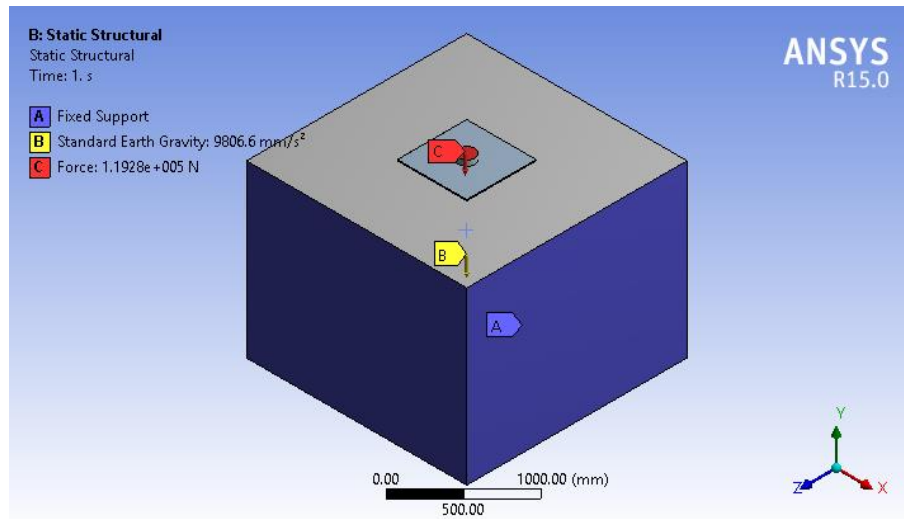


Por otra parte, el comportamiento del sistema en general modelado en ANSYS obedece a los modelos estudiados en el campo para los puntos 1, 2, 3, 5 y 6; es decir, la tendencia de la deformada en la platina corresponde a lo obtenido en el ensayo excepto por el punto 4, del cual de acuerdo a lo analizado debería tener un comportamiento similar a los puntos 1, 3 y 6.

5.2.2. Platina 3/8" sobre recebo

Para la platina de 3/8" de espesor se aplicó una fuerza por el pistón de 119.3 kN, y de igual forma al ensayo anterior, se tuvo en cuenta un empotramiento en la base y en el contorno del recebo, así como la influencia de la aceleración gravitatoria.

Figura 5-45: Condiciones de frontera de la platina 3/8"



Una vez se ejecutó la fase de análisis, mediante el post-procesador “*Solution*” se escogió leer la deformación vertical de todo el modelo y se definieron puntos en el lugar donde se encontraban los deformímetros en el ensayo en campo. Además, de manera similar al modelamiento con la platina 1/4”, se verificó si la platina había fluido o no, encontrando el esfuerzo equivalente correspondiente al criterio de falla de *Von-Mises*. A continuación se pueden observar los resultados obtenidos para cada punto:

Figura 5-46: Items seleccionados de las deformaciones obtenidas para la platina 3/8”

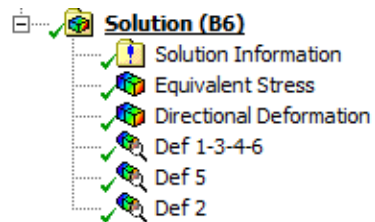
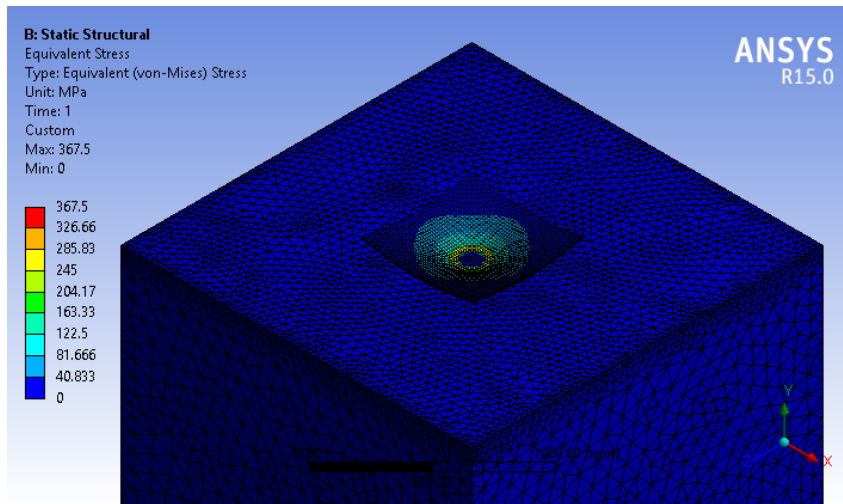


Figura 5-47: Estado de esfuerzos en el modelo con la platina 3/8"



Como se puede observar en la figura 5-47 la platina de 3/8" alcanzó un esfuerzo en el centro al borde del pistón de 367.5 MPa, lo que de acuerdo al criterio de falla de *von-mises* indica que la platina fluyó; sin embargo, si en campo la platina recuperó la deformación producida en el último paso de carga podría pensarse que los esfuerzos encontrados en el modelo son esfuerzos locales que no deberían tenerse en cuenta al momento de analizar la platina. A continuación se realiza un acercamiento a la zona donde el esfuerzo supera los 250MPa que corresponden al límite de fluencia del acero A36 (Figura 5-48):

Figura 5-48: Estado de esfuerzos locales en la platina 3/8"

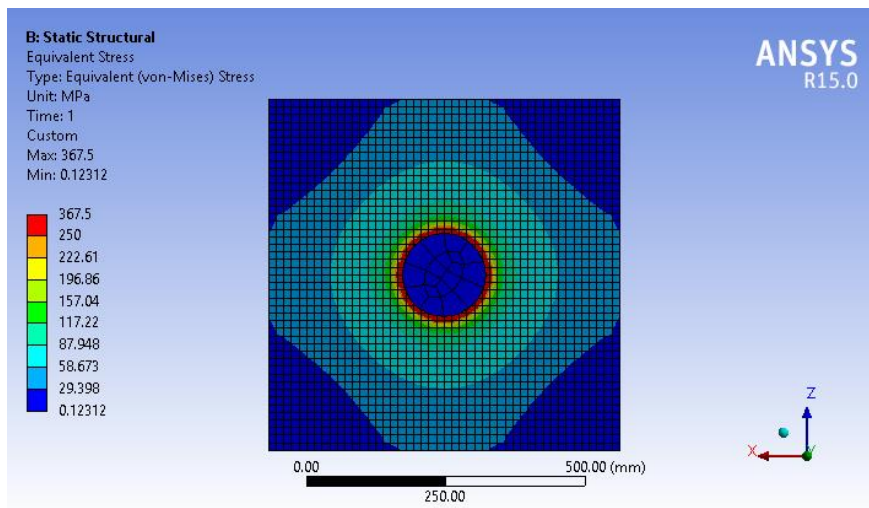


Figura 5-49: Deformación en el modelo de la platina 3/8"

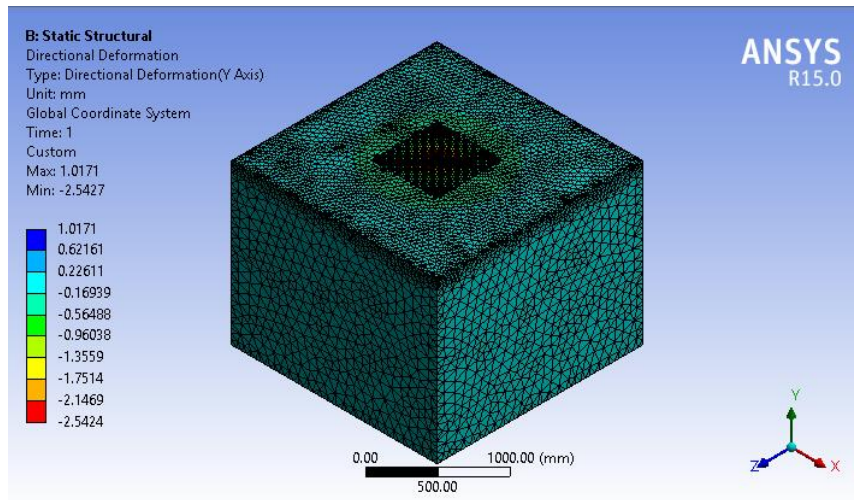
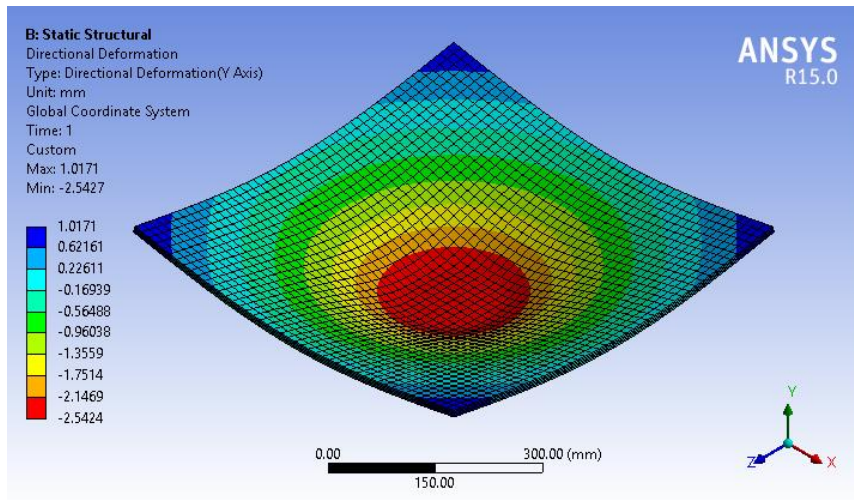


Figura 5-50: Deformación de la platina 3/8"



Según se indica en las figuras 5-49 y 5-50, la platina sufrió deformaciones hacia abajo en el centro y hacia arriba en los extremos, lo que indica que el comportamiento obtenido en el modelo matemático corresponde al obtenido en el modelo experimental.

No obstante, a pesar de que se obtuvo el mismo comportamiento en las deformaciones, los resultados tuvieron un porcentaje de error hasta de un 80%. A continuación se muestran los valores obtenidos para cada punto de deformímetro en el modelo y

posteriormente se hace la comparación de resultados con respecto a lo registrado en el ensayo de campo.

Figura 5-51: Deformación generada sobre la platina 3/8" en los puntos 1, 3, 4 y 6

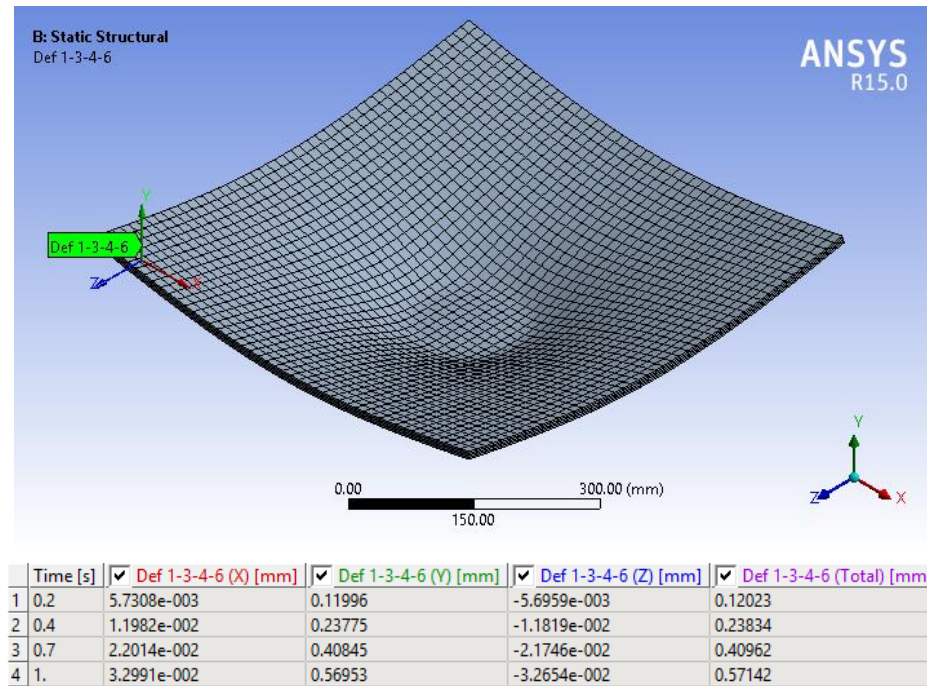


Figura 5-52: Deformación generada sobre la platina 3/8" en el punto 5

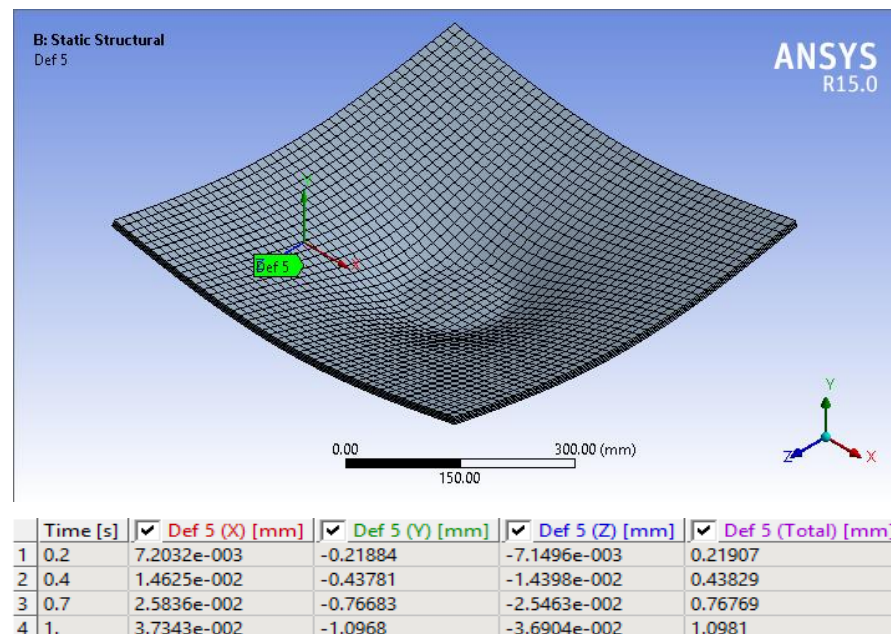
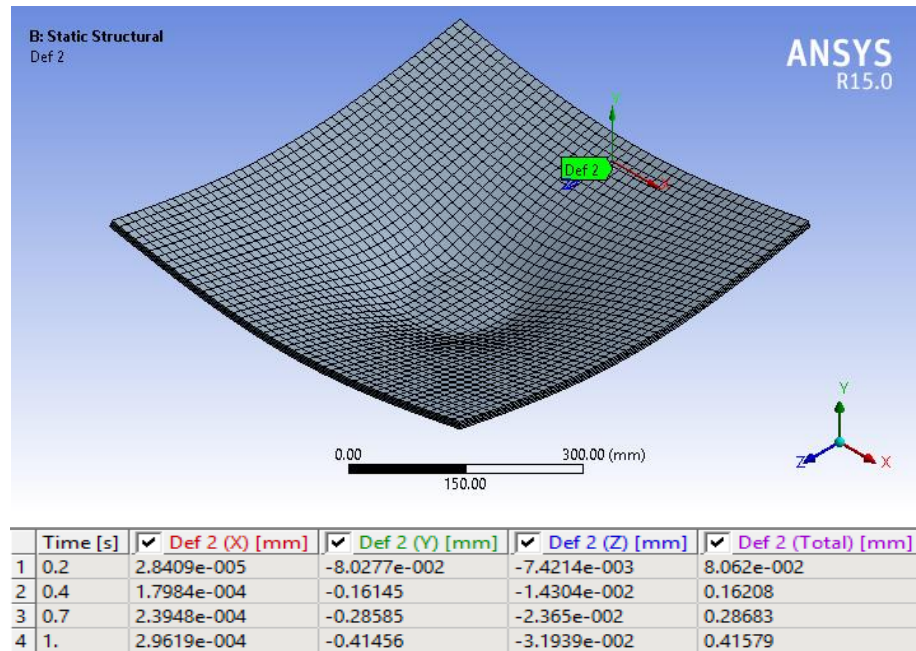


Figura 5-53: Deformación generada sobre la platina 3/8" en el punto 2



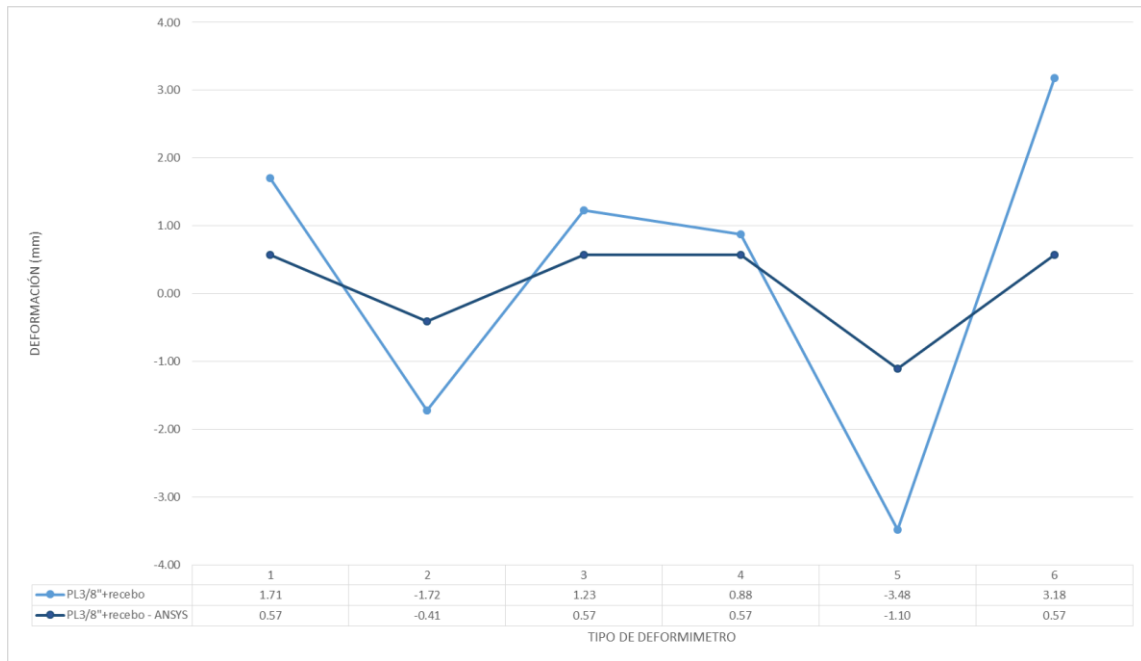
Una vez obtenidos todos los resultados en los puntos de ubicación de deformímetros tanto del modelo estructural como de los ensayos del laboratorio se realizó el siguiente cuadro comparativo mostrando los errores obtenidos:

Tabla 6. Diferencias encontradas entre los resultados de laboratorio y ANSYS para la platina 3/8"

	Deformimetro 1 (mm)	Deformimetro 2 (mm)	Deformimetro 3 (mm)	Deformimetro 4 (mm)	Deformimetro 5 (mm)	Deformimetro 6 (mm)
MODELO EXPERIMENTAL	1.7	-1.7	1.2	0.9	-3.5	3.2
MODELO ANSYS	0.6	-0.4	0.6	0.6	-1.1	0.6
ERROR (%)	66.7%	76.2%	53.7%	35.2%	68.4%	82.1%

Analizando los resultados se pudo encontrar que el comportamiento obtenido mediante el modelo matemático es similar al presentado en campo, sin embargo las diferencias en los valores son de más de un 80% en el peor de los escenarios.

Figura 5-54: Comparativo de deformaciones Ensayo vs ANSYS para la platina 3/8"



Por otra parte, el comportamiento del sistema en general modelado en ANSYS obedece a los modelos estudiados en campo; es decir, la tendencia de la deformada en la platina corresponde a lo obtenido en el ensayo.

5.2.3. Análisis de los datos de entrada

Con el fin de realizar un análisis a partir del cual se pueda interpretar qué tan importante es la calidad de los datos de entrada, se realizó un análisis de sensibilidad con las herramientas que dispone ANSYS de los siguientes datos de entrada:

- Coeficiente de *Poisson* del recebo
- Módulo de elasticidad del recebo.

Se trató de encontrar qué valores para las variables anteriores, arrojaban un resultado lo más parecido al obtenido en los puntos de ubicación de los deformímetros en campo. Esto se realizó por un proceso de calibración mediante algoritmos de optimización.

“La calibración de un modelo estructural en elementos finitos consiste en la simulación del comportamiento del mismo, ya sea estático o dinámico, modificando datos de entrada iterativamente con el fin de obtener una respuesta similar a la obtenida mediante la instrumentación de la estructura.

Mientras menor sea el porcentaje de error; es decir, el porcentaje que representa la diferencia entre los resultados analíticos obtenidos por el modelo y los experimentales obtenidos por instrumentación o monitoreo, mejor será el nivel de calibración.

Para realizar la optimización de un diseño, ANSYS *Workbench* cuenta con dos sistemas de exploración de diseño explicados en el archivo de ayuda de ANSYS:

- Optimización directa
- Optimización mediante el método de superficie de respuesta.

La optimización directa consiste en un componente que utiliza soluciones reales, evaluando múltiples puntos de diseño haciendo una discretización de las variables de diseño entre los límites superior e inferior establecidos, para luego de ser obtenidos realizar la optimización utilizando uno de los métodos de optimización disponibles.

El sistema de optimización mediante superficie de respuesta crea puntos de diseño en los límites de las variables de diseño, calculando solamente la solución de estos y sus posibles combinaciones, para a partir de estos crear una superficie de respuesta dentro de la cual se realiza la optimización haciendo que los resultados obtenidos a partir de este sistema sean evaluaciones de la superficie de respuesta en lugar de soluciones reales permitiendo un menor gasto computacional que el generado por una optimización directa.”¹⁹

¹⁹ Tomado de SEQUERA DIEGO A., SOLANO LUIS F., Tesis Algoritmo para la calibración de modelos estructurales en elementos finitos de puentes usando ANSYS, Pontificia Universidad Javeriana, 2013.

A continuación se presentan los rangos en que se varió tanto el módulo de elasticidad del suelo como el coeficiente de *Poisson*. El criterio para variar el módulo de elasticidad del suelo se puede justificar debido a que los ensayos realizados al recebo (CBR, ensayo de placa, densidad y grado de compactación) con el fin de obtener las propiedades mecánicas podrían no ser del todo confiables, por lo que se manejó un rango de $\pm 10\%$ del valor obtenido. Para el coeficiente de *Poisson* se varió entre 0.3 y 0.5, de acuerdo a bibliografía que hace referencia al rango en el que se puede encontrar un suelo similar al empleado en los ensayos.

Figura 5-55: Rango en el cual se varió el módulo de elasticidad del recebo

Properties of Outline A5: P2 - Young's Modulus		
	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Units	Pa
4	Type	Design Variable
5	Classification	Continuous
6	Values	
7	Value	1.397E+08
8	Lower Bound	1.2573E+08
9	Upper Bound	1.5367E+08
10	Use Manufacturable Values	<input type="checkbox"/>

Figura 5-56: Rango en el cual se varió el coeficiente de *Poisson* del recebo

Properties of Outline A6: P5 - Poisson's Ratio		
	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Units	
4	Type	Design Variable
5	Classification	Continuous
6	Values	
7	Value	0.4
8	Lower Bound	0.3
9	Upper Bound	0.48
10	Use Manufacturable Values	<input type="checkbox"/>

Una vez establecidos los rangos en los que se evaluarían tanto el módulo de elasticidad como el coeficiente de *Poisson*, se procedió a definir los puntos de diseño para los cuales se obtendría una solución real.

Figura 5-57: Puntos de diseño para los cuales se evaluó una solución

Table of Schematic D2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto D			
	A	B	C
1	Name	P2 - Young's Modulus (Pa)	P5 - Poisson's Ratio
2	1	1.397E+08	0.39
3	2	1.2573E+08	0.39
4	3	1.5367E+08	0.39
5	4	1.397E+08	0.3
6	5	1.397E+08	0.48
7	6	1.2573E+08	0.3
8	7	1.5367E+08	0.3
9	8	1.2573E+08	0.48
10	9	1.5367E+08	0.48

Únicamente se evaluaron 9 puntos de diseño debido al costo computacional que requería el análisis. A continuación se presenta la superficie de respuesta y los análisis de sensibilidad que indican qué tan importante es el módulo de elasticidad y el coeficiente de *Poisson* en el resultado obtenido. El análisis de sensibilidad se realizó para las deformaciones obtenidas en los puntos de ubicación de los deformímetros 4 y 5 del ensayo con la platina de espesor 3/8”.

Figura 5-58: Variación del punto 4 para la platina 3/8” con respecto al módulo de elasticidad del recebo

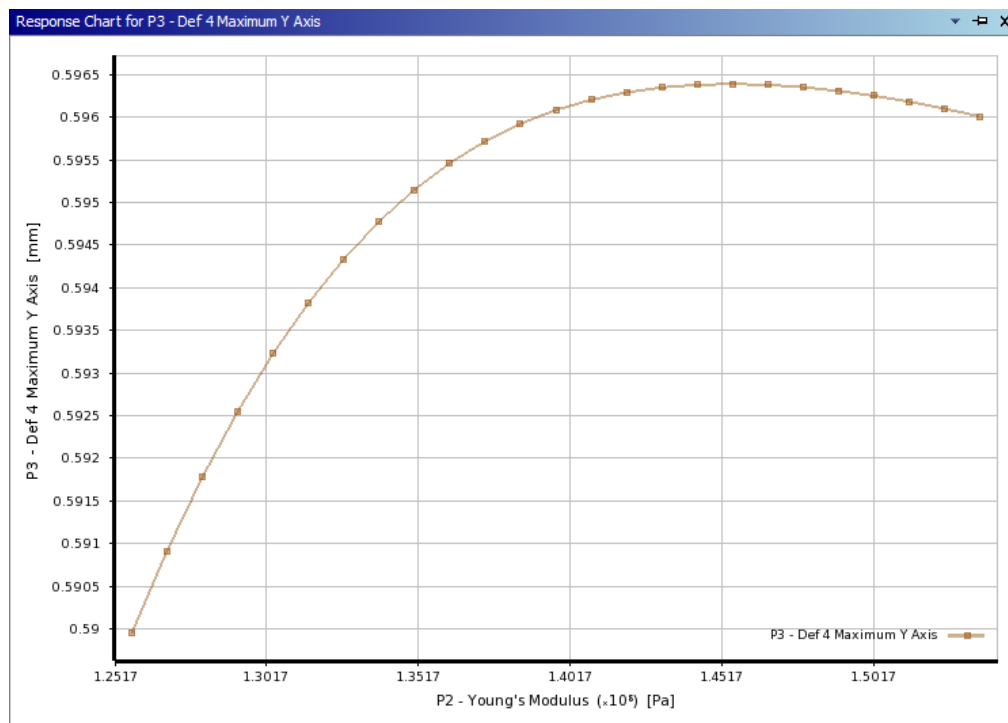


Figura 5-59: Variación del punto 4 para la platina 3/8" con respecto al coeficiente de Poisson del recebo

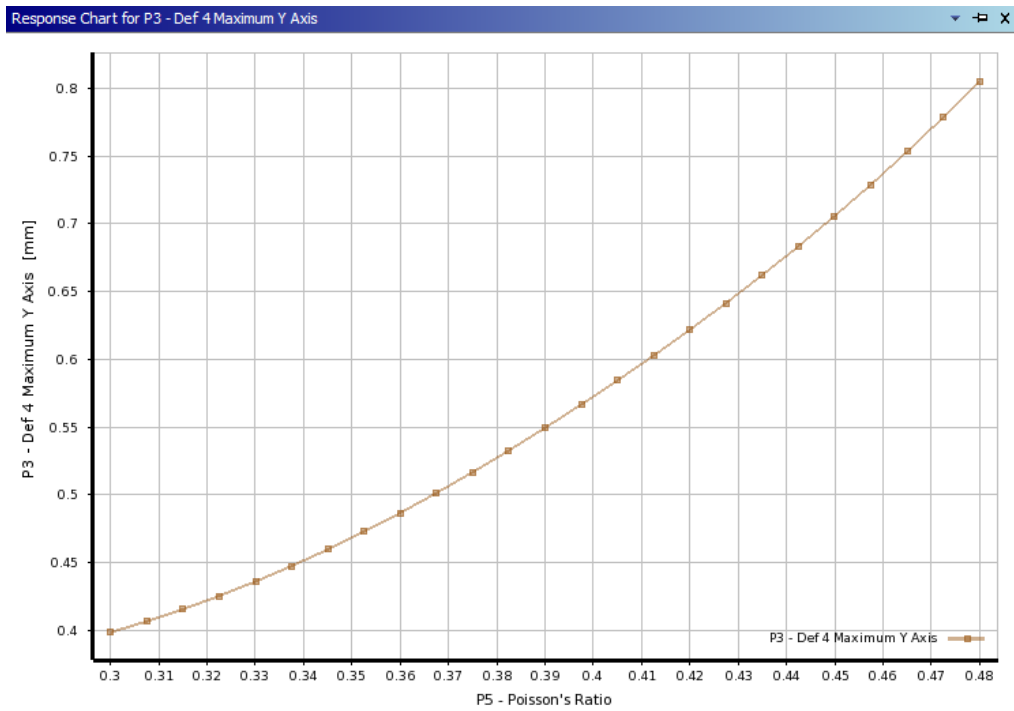


Figura 5-60: Variación del punto 5 para la platina 3/8" con respecto al módulo de elasticidad del recebo

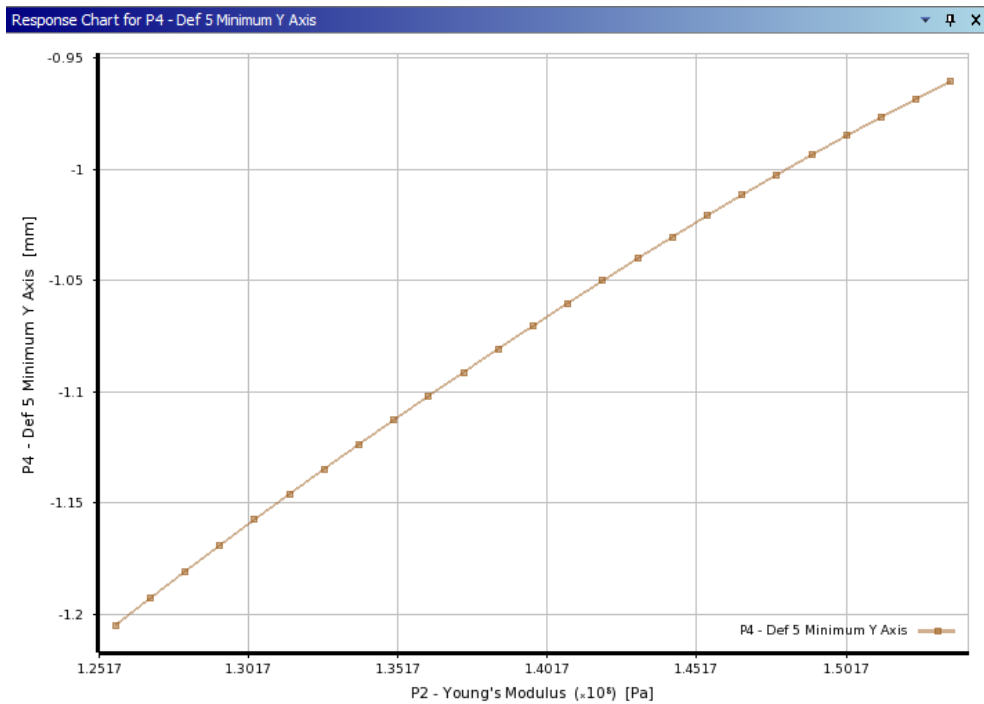


Figura 5-61: Variación del punto 5 para la platina 3/8" con respecto al coeficiente de Poisson del recebo

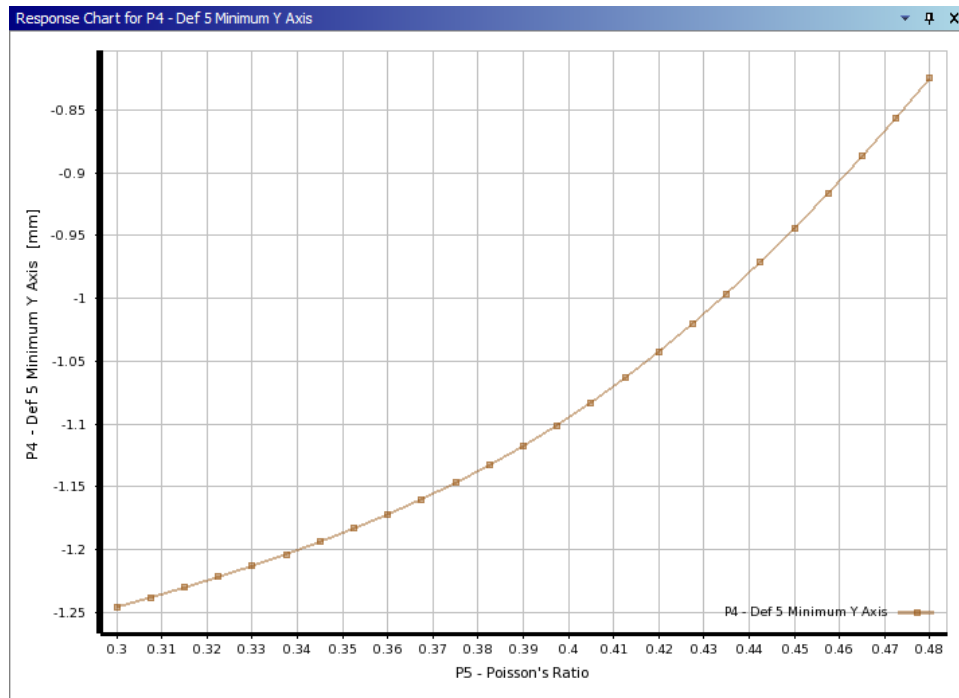
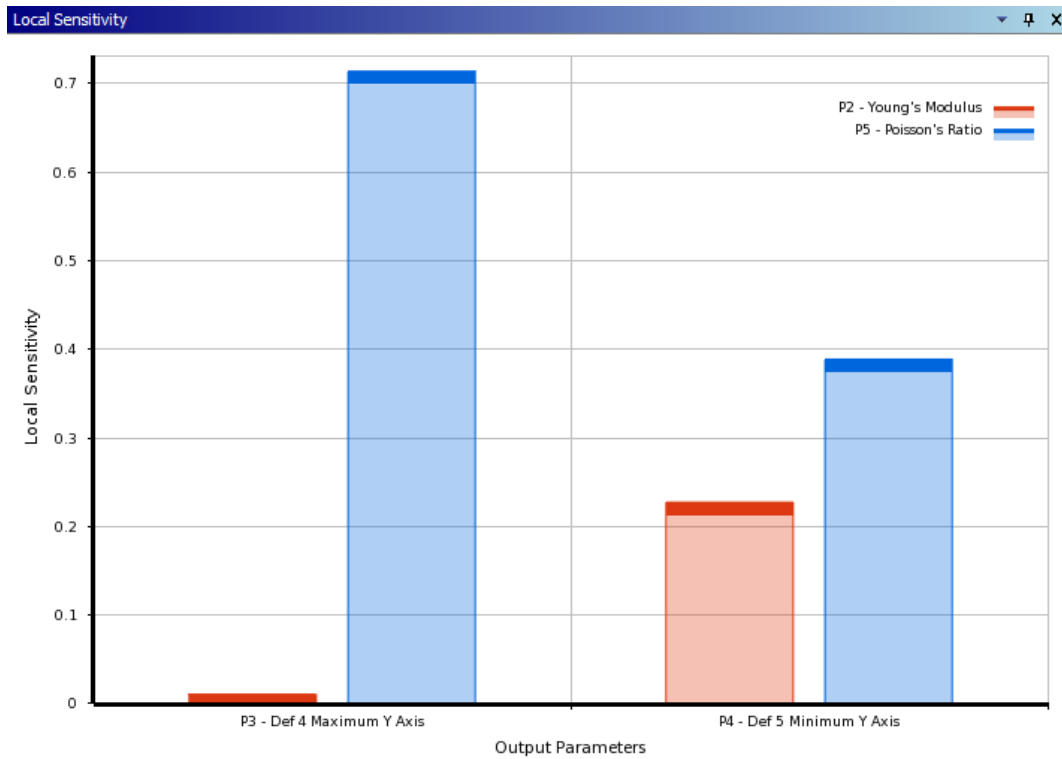


Figura 5-62: Análisis de sensibilidad



Como se puede observar en las figuras anteriores, la incidencia del coeficiente de *Poisson* controla los desplazamientos obtenidos a partir del modelo, por lo que si no es insertado un valor adecuado, los resultados no van a dar del todo confiables, especialmente en lo leído para el punto de ubicación del deformímetro 4, el cual se encuentra en una de las esquinas donde se levanta la platina.

En el punto del deformímetro 5 influye igualmente el coeficiente de *Poisson*, pero también se observa una dependencia al módulo de elasticidad del suelo. Esto sucede debido a que el punto 5 es el que está ubicado más al centro de la platina, donde la misma se deforma hacia abajo, mientras menos rígido sea el suelo, mayor será el desplazamiento vertical en el centro de la platina.

Por lo anterior, al realizar un modelo en elementos finitos y con el fin obtener los resultados más confiables es recomendable tener parámetros de entrada de alta calidad, especialmente del suelo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Por medio del análisis experimental con platinas de espesores 3/8" y 1/4" apoyadas sobre resortes que simulan el suelo de fundación, se demostró que dicho arreglo ofrece una alternativa para el análisis de la interacción suelo-estructura en el rango elástico.
- De las diferentes alternativas estudiadas se encontraron dos tipos de comportamiento para la fundación. El primero, corresponde a las deformaciones en el rango elástico encontradas en la cama de resortes y el segundo a las deformaciones en el rango inelástico encontradas para el recebo. Por una parte, la cama de resortes obtuvo una recuperación total de su forma una vez aplicadas las cargas monotónicas, mientras que el recebo sufrió una deformación con fisuras visibles de la cual no se recuperó completamente.
- El comportamiento real del suelo fue no lineal, reflejado en que las deformaciones principales debido a las cargas verticales se expandieron de manera radial, tuvieron varias intensidades y espesores en distintas direcciones y a su vez fueron apareciendo en diferentes intervalos de carga, para al final representar una deformación irreversible.
- Mediante el modelamiento en el programa ANSYS se pudo comprobar que el comportamiento de las platinas metálicas sobre el recebo de fundación fue similar a lo encontrado en los ensayos experimentales. Las platinas modeladas mostraron deformaciones de manera cóncava y el recebo presentó deformaciones generando un bulbo de presiones sin sobrepasar las dimensiones de la matriz de recebo calculada.

- Se puede concluir que para realizar un modelo en elementos finitos de interacción suelo-estructura y con el fin obtener los resultados más confiables se requieren tener parámetros de entrada de alta calidad, especialmente del suelo.
- Una posible causa de la diferencia entre los resultados leídos en campo y los obtenidos mediante el modelo estructural podría ser la fluencia del acero de las platinas. A pesar de que en campo no se evidenció deformación plástica residual, de acuerdo a los modelos tanto la platina de 1/4" como la platina de 3/8" alcanzaron el punto de fluencia, por lo que la distribución de esfuerzos sobre las mismas cambiaría así como las deformaciones obtenidas.
- Con el análisis de sensibilidad se puede concluir que existe una dependencia del módulo de elasticidad del suelo y una incidencia del coeficiente de *Poisson*, pues controla los desplazamientos obtenidos a partir de los modelos.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda que para posteriores trabajos de investigación, se ensayen otras tipologías de resorte utilizando amortiguadores y se amplíe el estudio del comportamiento de las platinas metálicas realizando más de tres pruebas con diferentes espesores y propiedades.
- Ampliar la investigación del sustrato base mediante la realización de un ensayo triaxial o de compresión inconfiada y comparar los resultados de al menos tres tipologías de suelo, con el fin de obtener las curvas esfuerzo-deformación, el módulo de *Young* y de *Poisson* sin necesidad de realizar una correlación de los datos.

- Para próximos ensayos de laboratorio se recomienda realizar mediciones con deformímetros sobre la matriz de recebo para poder medir deformaciones directas sobre el suelo de fundación.
- Para próximos modelos en elementos finitos de situaciones como la estudiada es recomendable modelar el acero como un material no-lineal incluyendo la curva esfuerzo deformación completa y así tener en cuenta este efecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 1) A. SORIANO. Física de la tierra, num.1. pág. 287-238 Ed. Univ. Compl. Madrid. 1989.
- 2) SANTOS MIÑÓN J. Revista de obras públicas. Pág. 181-191. Febrero-Marzo 1980.
- 3) J.CALAVERA. Libro cálculo de estructuras de cimentación. 4th Ed. INTEMAC. 2000.
- 4) PECK, HANSON AND THORNBURN. Ingeniería de cimentaciones. Publicado por Limusa. 2009.
- 5) “Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, NSR-10: Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008) y Decreto 926 de 2010” – Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, 2010.
- 6) VIASUS ARTEAGA C., LÓPEZ PALOMINO P. “Evaluación interacción suelo estructura mediante un modelo físico (zapatas aisladas)”. Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. 2008.
- 7) VARGAS DELGADO M. Libro Interacción suelo-estructura. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.
- 8) FREIRE TELLADO M. J. Libro Interacción suelo, cimiento y estructura. Univ. De Coruña. 09 julio de 2000.
- 9) NII ALLOTEY AND M. HESHAM EL NAGAR. Generalized dynamic Winkler model for nonlinear soil-structure in analysis. Can. Geotech. J. Vol. 45. 2008.
- 10) E. CELEBI, F. GOKTEPE, AND N. KARAHAN, Non-linear finite element analysis for prediction of seismic response of buildings considering soil-structure interaction, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 3495-3505, 2012.
- 11) MÁLEKOVÁ V., An analysis of contact elements of foundation structures, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia. This paper was supported by Grant Agency VEGA, Project No.1/0629/12.

12) SEQUERA D.A., SOLANO L.F., Tesis Algoritmo para la calibración de modelos estructurales en elementos finitos de puentes usando ANSYS, Pontificia Universidad Javeriana.

Bibliografía complementaria:

13) FEMA 356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.

14) ASCE 41, "Seismic rehabilitation of existing buildings", American Society of Civil Engineers, 2006.

15) BOWLES J.E., Foundation Analysis and Design. 4th Ed. McGraw-Hill. 1988.

16) PEREZ Luis E., AVILÉS Javier. Evaluación de efectos de interacción en resistencias inelásticas. Publicación Revista de Ingeniería Sísmica No. 69 45-71 (2003).

17) FERNÁNDEZ C. Rafael., TORRES P. Carlos, "Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo – estructura", Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2009.

18) DE LA BARRERA Fernando, "Análisis comparativo de los modelos de interacción suelo estructura de tres tipos de cimentación con los modelos de apoyo empotrado y simplemente apoyado tradicionales", Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2009.

19) RAMÍREZ Camilo, "Diseño de un elemento de transición que simule una correcta interacción estática suelo – estructura", Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2013.

20) TORRES Nancy, "Estudio interacción suelo estructura para edificios de 5 a 10 pisos", Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2001.

21) PULIDO Juan G., Comportamiento de la superestructura considerando los efectos de interacción suelo – estructura, Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2007.

22) LÓPEZ DUQUE Gustavo A, "Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo estructura: una verificación según

reglamento NSR-10”, Tesis de grado Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. 2012.

23) CHOPRA AK, Perumalswami PR., “Dam-foundation interaction during earthquakes”. Proceedings of 4th World Conference Earthquake Engineering, Santiago, Chile. 1969.

24) ALLOTEY NK. Nonlinear soil-structure interaction in performance based design. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, London, Ontario, Canadá, 2006.

25) HUEI-HUANG Lee., Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15: Theory, Applications and Case Studies, 2012.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Obtención del Módulo K para el resorte tipo

Carga (Kg)	Deformación (mm)
24	0,01
26	0,03
28	0,05
28	0,07
26	0,22
34	0,56
40	0,89
46	1,22
52	1,56
58	1,89
64	2,22
72	2,56
78	2,89
84	3,22
92	3,56
98	3,89
104	4,22
112	4,56
118	4,89
124	5,22
130	5,56
136	5,89
144	6,22
150	6,56
158	6,89
164	7,22
170	7,56
176	7,89
184	8,22
190	8,56
196	8,89
204	9,22
210	9,56
216	9,89
222	10,22
228	10,56
236	10,89
242	11,22
248	11,56
256	11,89
262	12,22
268	12,56
276	12,89
282	13,22
288	13,55
294	13,89



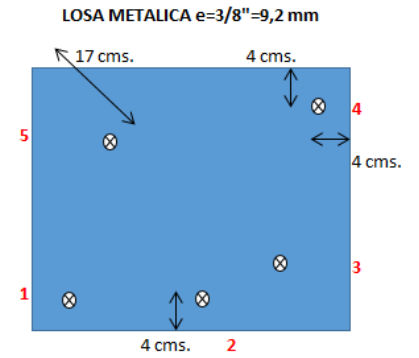
Intervalos de 1 mm/min

$$K = 21,17 \text{ Kg/mm}$$

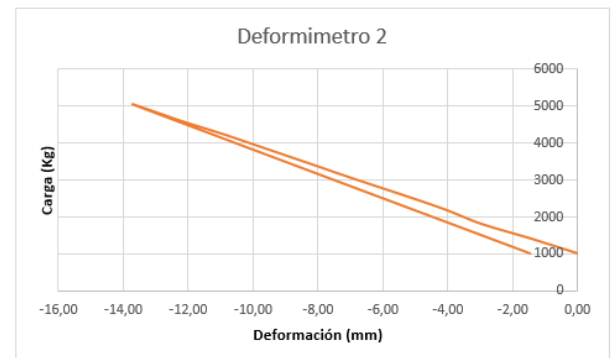
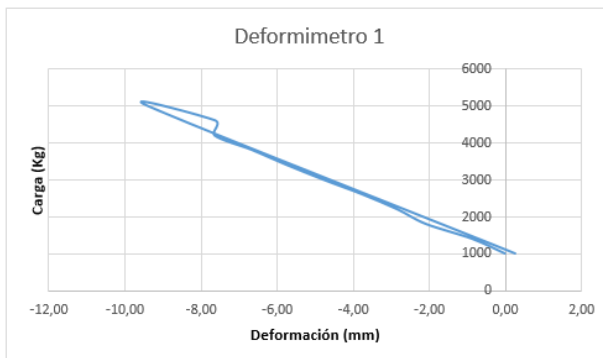
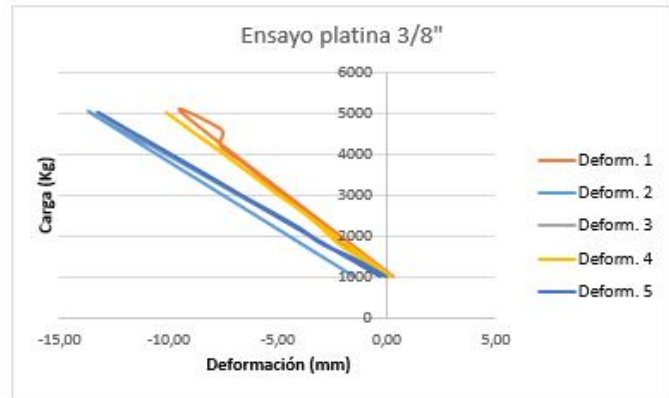
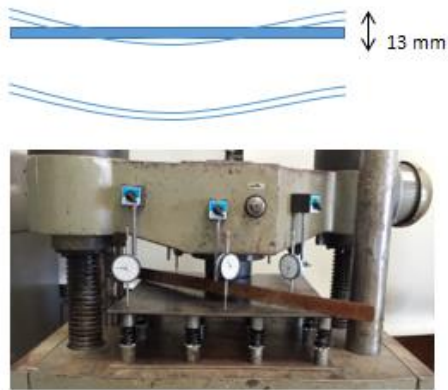
Comportamiento elástico y lineal
Recuperación del resorte = 100%

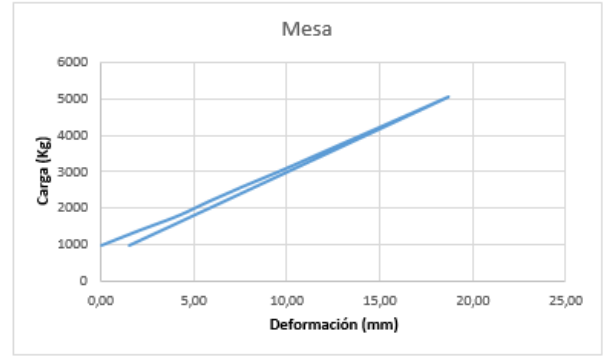
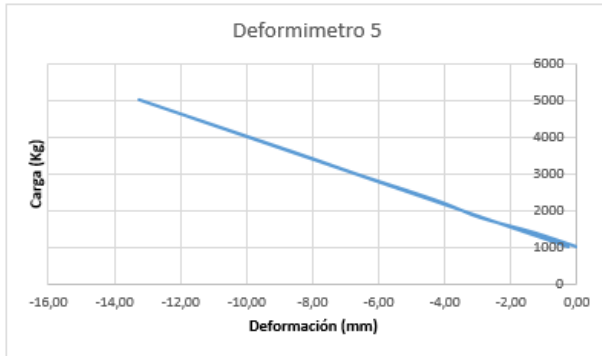
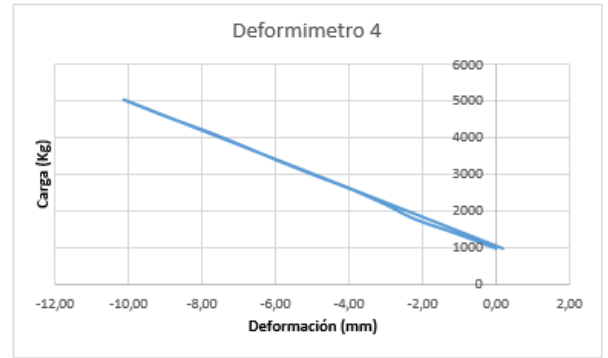
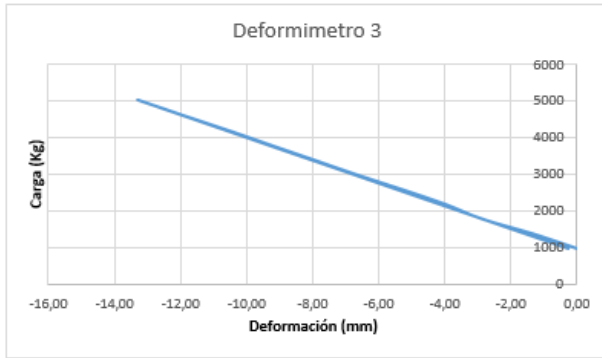
ANEXO 2: Ensayo platina de espesor 3/8" sobre resortes

Carga (Kg)	Deform.1 (mm)	Deform.2 (mm)	Deform.3 (mm)	Deform.4 (mm)	Deform.5 (mm)	Mesa (mm)
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1400	-0,87	-1,43	-1,33	-1,06	-1,32	2,00
1800	-2,08	-2,96	-2,86	-2,21	-2,92	4,10
2200	-2,84	-4,11	-3,97	-3,01	-4,02	5,80
2600	-3,75	-5,43	-5,27	-3,91	-5,32	7,60
3000	-4,78	-6,81	-6,64	-4,96	-6,67	9,50
3400	-5,75	-8,13	-7,92	-5,96	-7,92	11,30
3800	-6,65	-9,46	-9,22	-6,91	-9,22	13,10
4200	-7,65	-10,79	-10,50	-7,91	-10,52	14,90
4600	-7,62	-12,23	-11,84	-9,01	-11,82	16,70
5000	-9,41	-13,57	-13,15	-10,01	-13,12	18,50
1000	0,27	-1,47	-0,27	0,19	-0,27	1,50



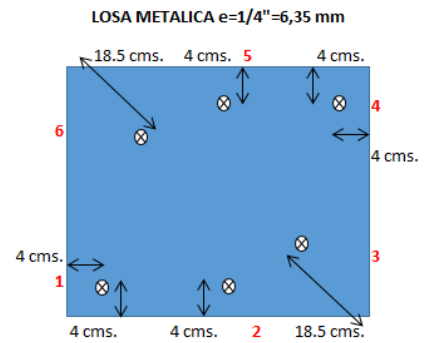
DEFORMACION OBTENIDA EN LA PLATINA SOBRE RESORTES



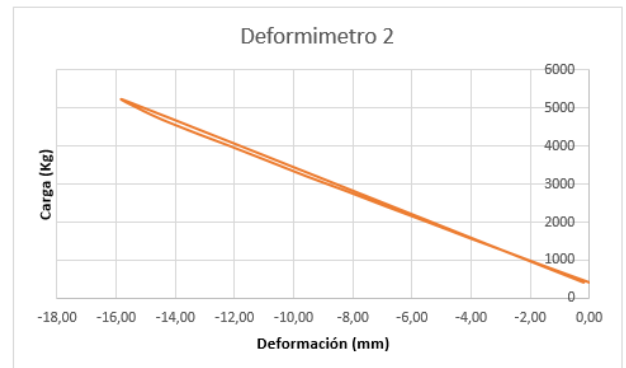
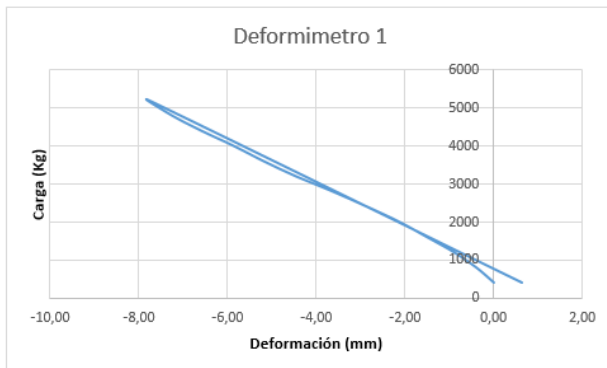
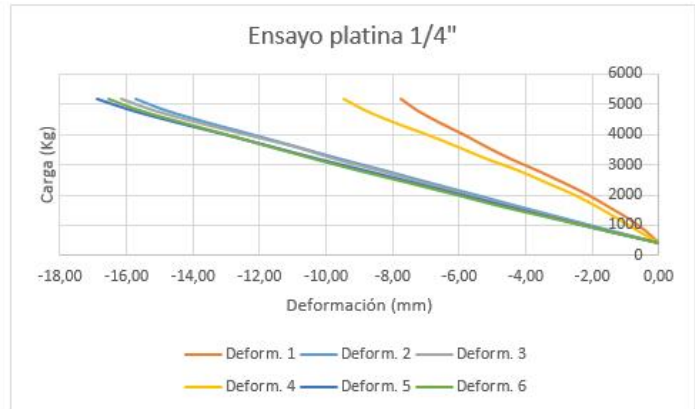


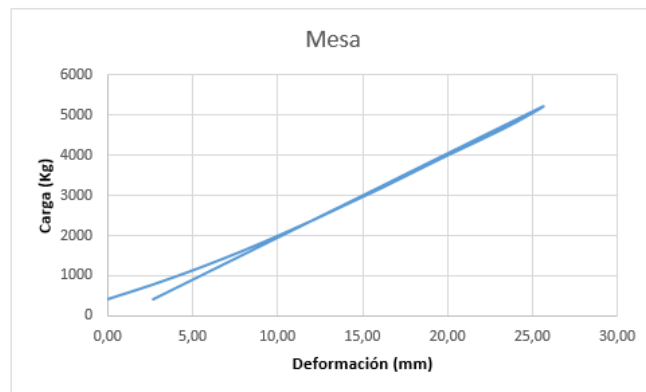
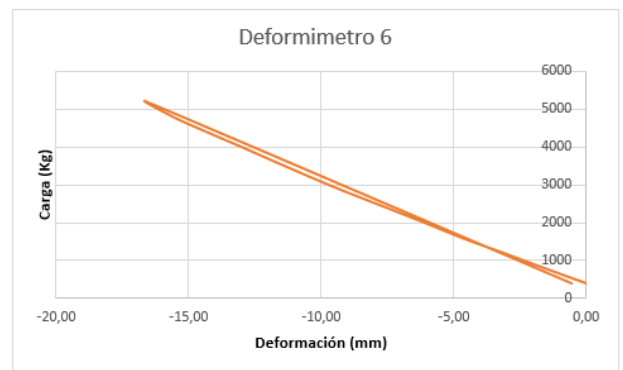
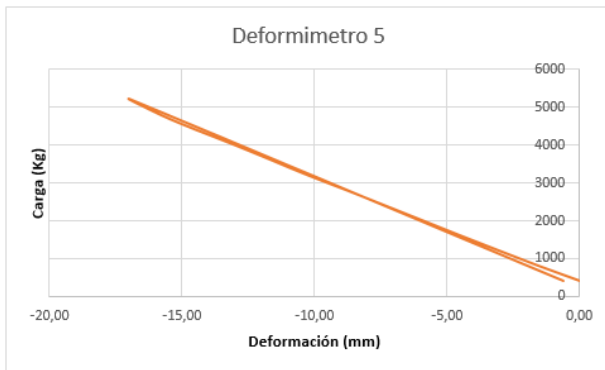
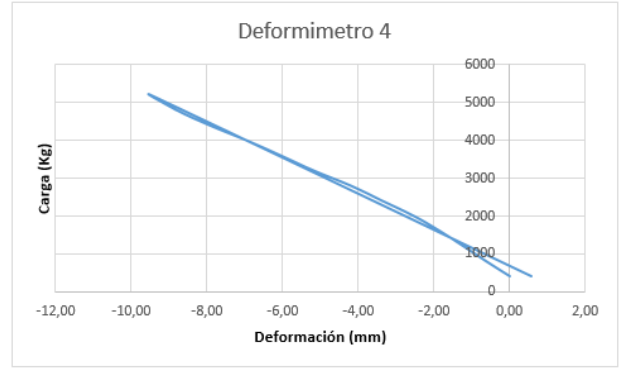
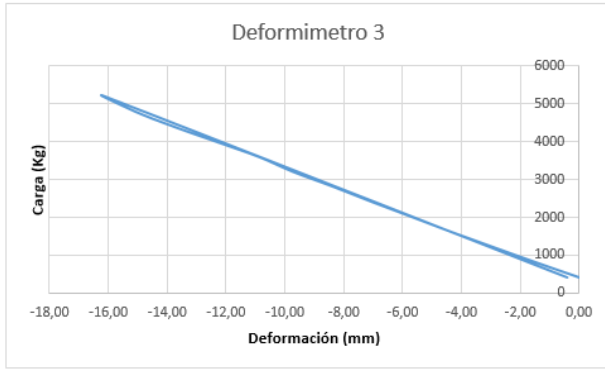
ANEXO 3: Ensayo platina de espesor 1/4" sobre resortes

Carga (Kg)	Deform.1 (mm)	Deform.2 (mm)	Deform.3 (mm)	Deform.4 (mm)	Deform.5 (mm)	Deform.6 (mm)	mesa (mm)
400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
800	-0,40	-1,41	-1,48	-0,63	-1,56	-1,58	2,90
1200	-0,90	-2,78	-2,91	-1,23	-3,04	-3,11	5,50
1600	-1,51	-4,16	-4,33	-1,85	-4,50	-4,68	7,90
2000	-2,13	-5,50	-5,68	-2,54	-5,92	-6,08	10,10
2400	-2,86	-6,87	-7,04	-3,37	-7,35	-7,52	12,20
2800	-3,63	-8,20	-8,35	-4,20	-8,78	-8,99	14,20
3200	-4,46	-9,58	-9,73	-5,18	-10,25	-10,36	16,20
3600	-5,19	-10,87	-10,91	-6,05	-11,62	-11,68	18,10
4000	-5,86	-12,18	-12,35	-6,95	-13,00	-12,96	20,00
4400	-6,59	-13,53	-13,80	-7,93	-14,45	-14,29	22,00
4800	-7,25	-14,77	-15,11	-8,80	-15,80	-15,56	23,90
5200	-7,77	-15,73	-16,14	-9,48	-16,90	-16,55	25,50
400	0,63	-0,20	-0,41	0,57	-0,62	-0,56	2,70



DEFORMACION OBTENIDA EN LA PLATINA SOBRE RESORTES





ANEXO 4: Registro fotográfico del proceso constructivo de los muertos de concreto



ANEXO 5: Registro fotográfico del proceso constructivo del recebo

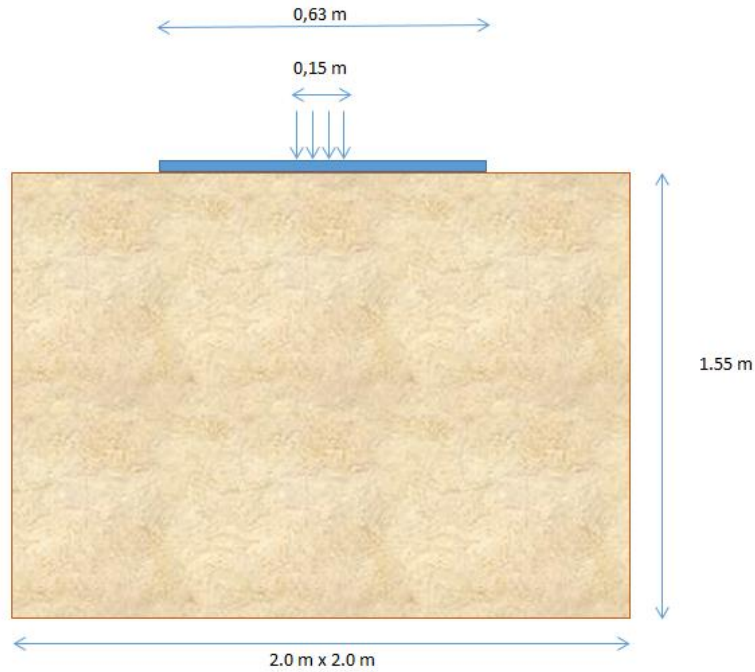




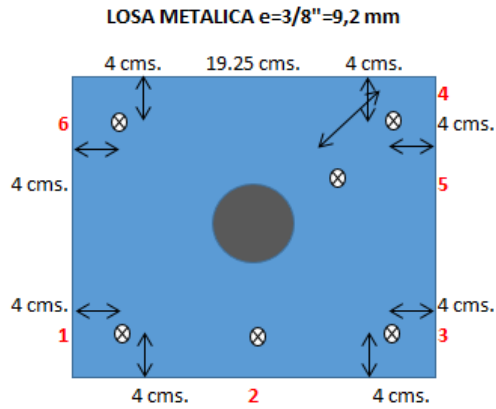
ANEXO 6: Registro fotográfico del proceso constructivo del marco metálico



ANEXO 7: Ensayo platina de espesor 3/8" sobre recebo



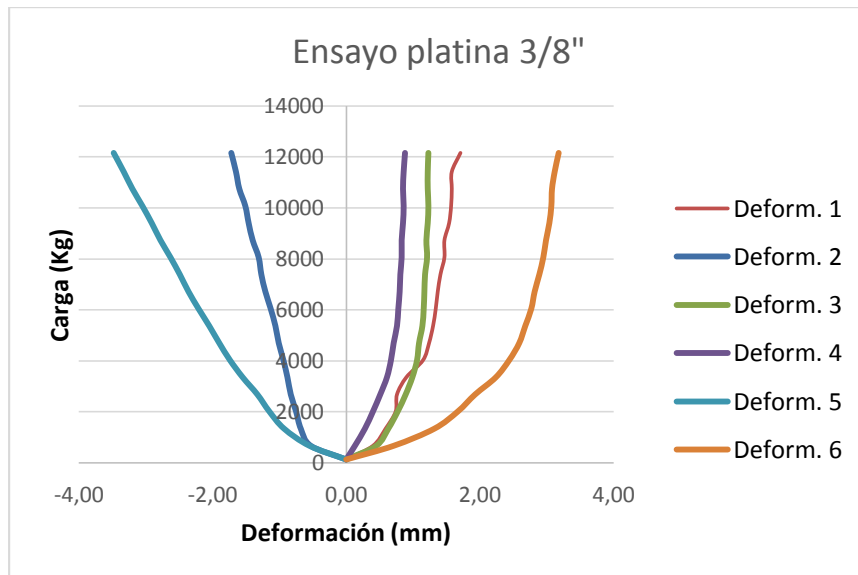
Carga (Kg)	Deform.1 (mm)	Deform.2 (mm)	Deform.3 (mm)	Deform.4 (mm)	Deform.5 (mm)	Deform.6 (mm)	Deform.7 (mm)	Deform.8 (mm)	Deform.9 (mm)	Y1 (mm)	Y2 (mm)
134	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	395	810
672	0,40	-0,53	0,45	0,13	-0,55	0,71	0,23	0,00	0,00		
1344	0,59	-0,68	0,63	0,28	-0,93	1,32	0,56	0,03	0,03		
2015	0,74	-0,75	0,77	0,40	-1,15	1,67	0,94	0,05	0,05	396	811
2687	0,76	-0,83	0,89	0,51	-1,33	1,93	1,35	0,08	0,10		
3359	0,90	-0,88	0,99	0,61	-1,55	2,24	1,73	0,10	0,13		
4031	1,15	-0,94	1,06	0,67	-1,74	2,44	2,16	0,13	0,20	398	816
4702	1,24	-1,01	1,09	0,71	-1,90	2,59	2,57	0,15	0,23		
5374	1,30	-1,06	1,14	0,76	-2,05	2,68	3,02	0,20	0,25		
6046	1,34	-1,13	1,16	0,78	-2,21	2,77	3,48	0,23	0,38	400	819
6718	1,37	-1,21	1,17	0,80	-2,36	2,82	3,91	0,28	0,51		
7389	1,41	-1,27	1,18	0,81	-2,49	2,89	4,27	0,30	0,53		
8061	1,47	-1,31	1,21	0,83	-2,63	2,95	4,72	0,33	0,56	401	821
8733	1,47	-1,40	1,20	0,83	-2,78	2,99	5,26	0,38	0,48		
9405	1,54	-1,46	1,22	0,85	-2,91	3,04	5,72	0,41	0,51		
10076	1,57	-1,51	1,23	0,86	-3,05	3,07	6,17	0,43	0,58	402	823
10748	1,58	-1,60	1,22	0,85	-3,20	3,08	6,60	0,46	0,69		
11420	1,58	-1,65	1,22	0,86	-3,33	3,12	7,11	0,51	0,74		
12159	1,71	-1,72	1,23	0,88	-3,48	3,18	7,80	0,56	0,81	404	825
134	0,68	-0,20	0,27	0,26	-0,70	1,17	0,76	0,18	-0,03	396	813

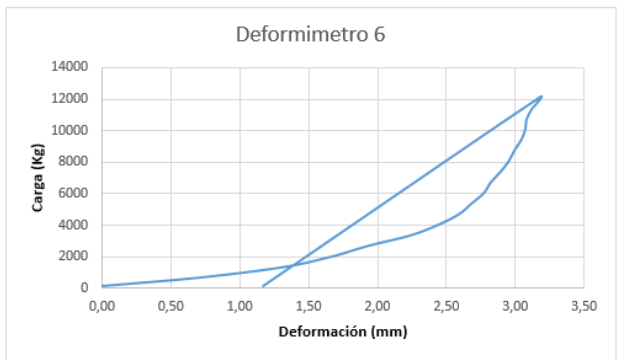
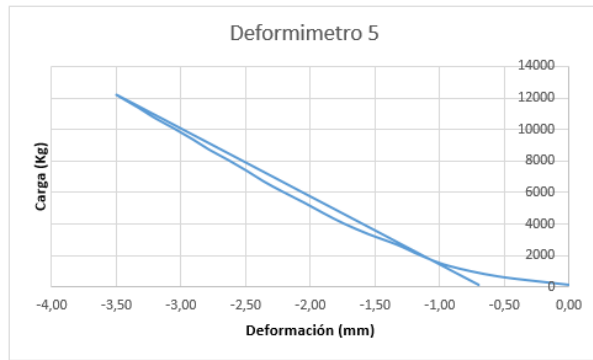
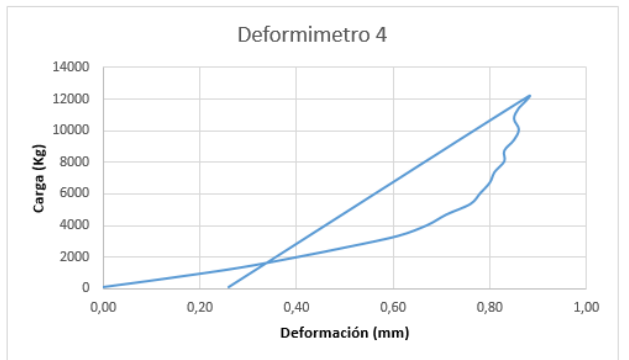
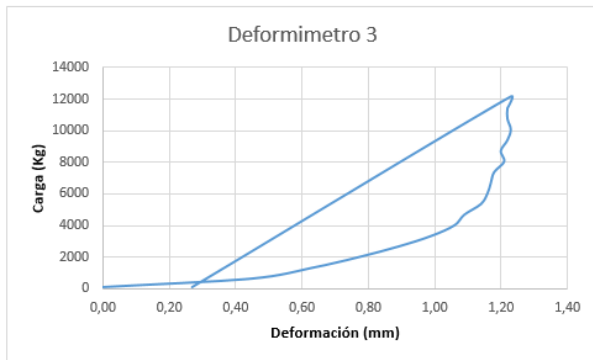
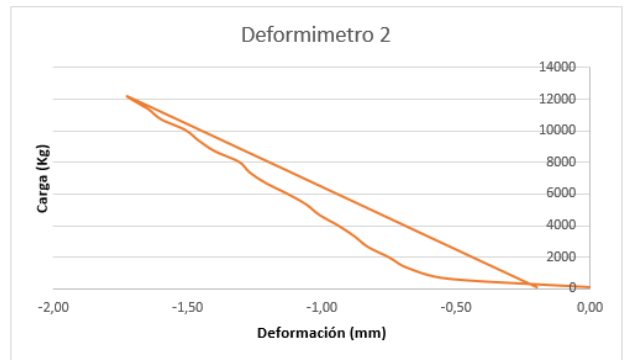
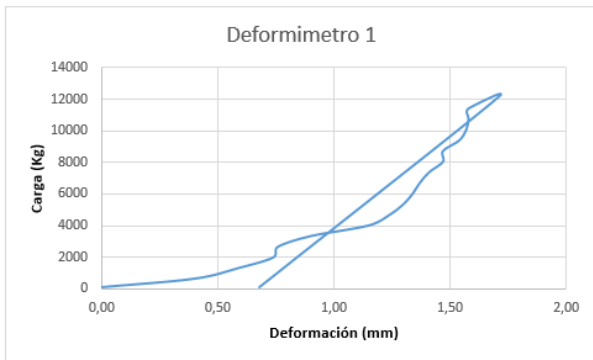
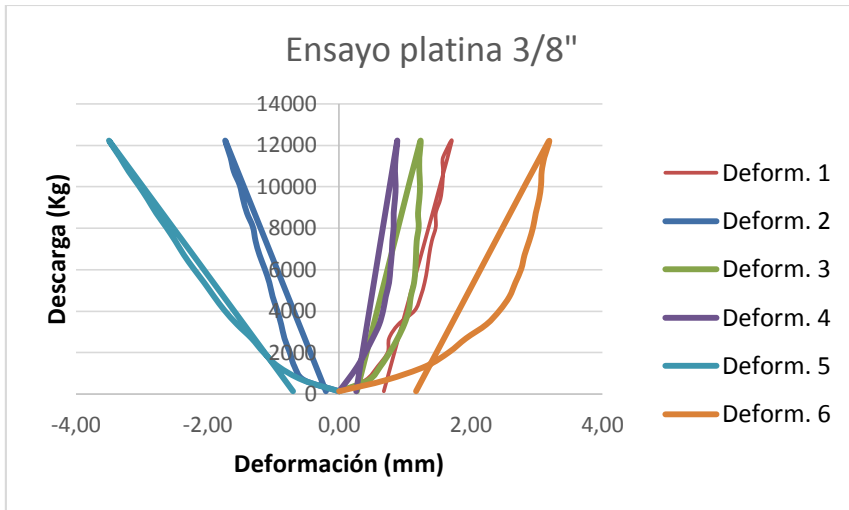


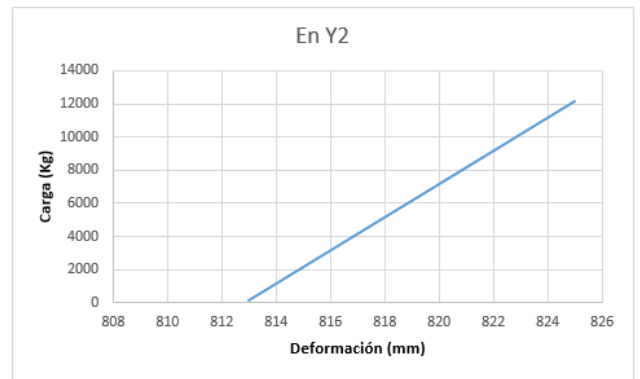
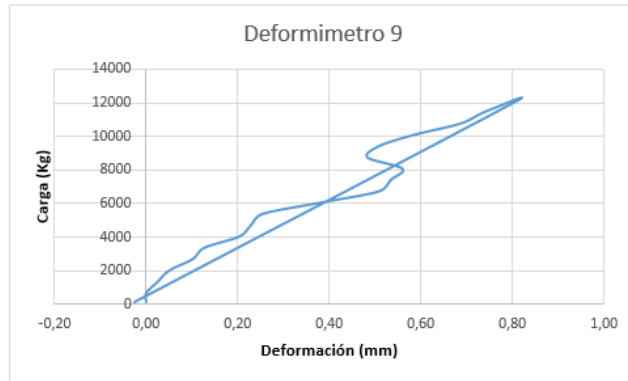
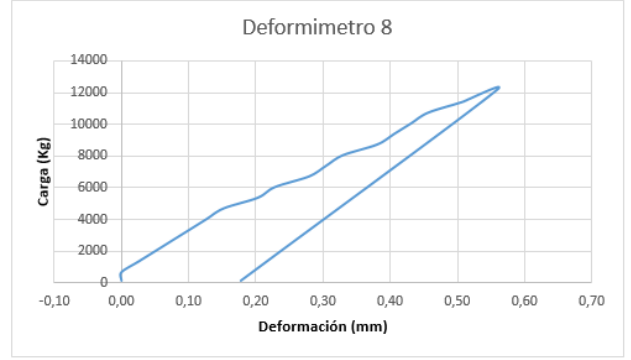
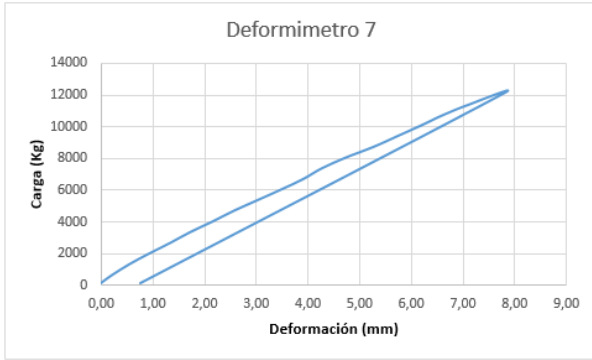
DEFORMACION OBTENIDA EN LA PLATINA SOBRE EL RECEBO



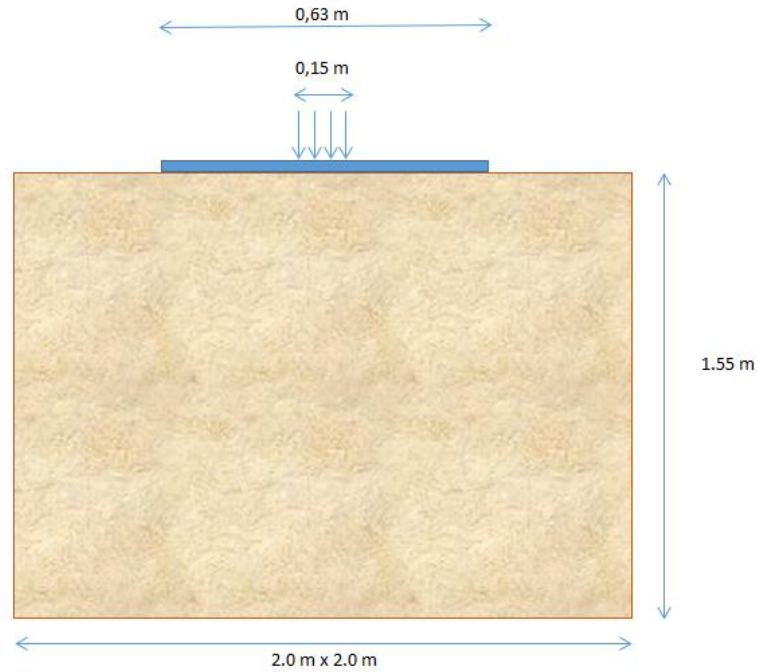
- Deformímetro 7: Sobre la viga IPE
- Deformímetro 8: Sobre el muerto A
- Deformímetro 9: Sobre el muerto B
- Y1: Altura libre entre aleta inferior de la viga IPE y la platina intermedia de soporte para deformímetros
- Y2: Altura libre entre aleta inferior de la viga IPE y la platina e=3/8"



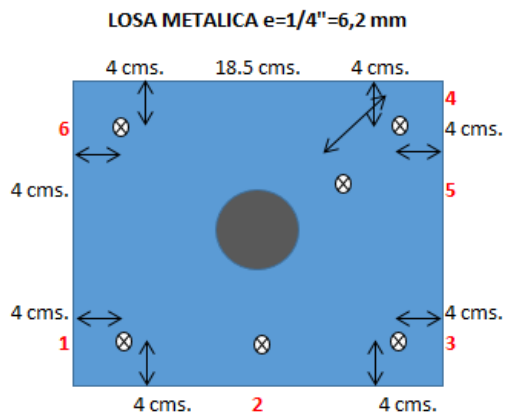




ANEXO 8: Ensayo platina de espesor 1/4" sobre recebo



Carga (Kg)	Deform.1 (mm)	Deform.2 (mm)	Deform.3 (mm)	Deform.4 (mm)	Deform.5 (mm)	Deform.6 (mm)	Deform.7 (mm)	Deform.8 (mm)	Deform.9 (mm)	Y1 (mm)	Y2 (mm)
134	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	412	814
672	0,24	0,10	0,27	-0,47	-0,08	0,12	0,10	0,00	0,05		
1344	0,35	0,14	0,48	-0,83	-0,20	0,20	0,41	0,00	0,08		
2015	0,37	0,16	0,61	-0,99	-0,26	0,27	0,74	1,00	0,10	413	816
2687	0,58	0,22	0,78	-1,07	-0,29	0,35	1,22	3,00	0,08		
3359	0,64	0,23	0,87	-1,18	-0,34	0,39	1,57	4,00	0,23		
4031	0,67	0,19	0,93	-1,32	-0,41	0,42	1,88	5,00	0,20	414	818
4702	0,70	0,18	1,00	-1,38	-0,45	0,44	2,24	6,00	0,20		
5374	0,73	0,17	1,08	-1,45	-0,47	0,47	2,62	7,00	0,20		
6046	0,73	0,15	1,13	-1,51	-0,52	0,47	2,87	8,00	0,30	415	819
6718	0,73	0,09	1,15	-1,62	-0,58	0,48	3,07	9,00	0,36		
7389	0,74	0,04	1,22	-1,71	-0,65	0,51	3,56	10,00	0,36		
8061	0,75	0,02	1,27	-1,77	-0,69	0,54	3,89	11,00	0,38	417	821
8733	0,76	-0,02	1,32	-1,84	-0,73	0,58	4,39	13,00	0,46		
9405	0,77	-0,07	1,37	-1,91	-0,78	0,62	4,78	14,00	0,64		
10076	0,77	-0,14	1,40	-2,02	-0,82	0,65	5,13	15,00	0,79	418	822
10748	0,74	-0,25	1,40	-2,14	-0,92	0,67	5,51	16,00	0,91		
11420	0,74	-0,30	1,45	-2,23	-0,96	0,72	5,84	17,00	1,02		
12092	0,75	-0,37	1,46	-2,35	-1,02	0,79	6,35	18,00	1,14	419	824
134	-0,04	0,07	-0,04	-1,05	-0,27	-0,02	0,13	1,00	0,13	412	815



DEFORMACION OBTENIDA EN LA PLATINA SOBRE EL RECEBO



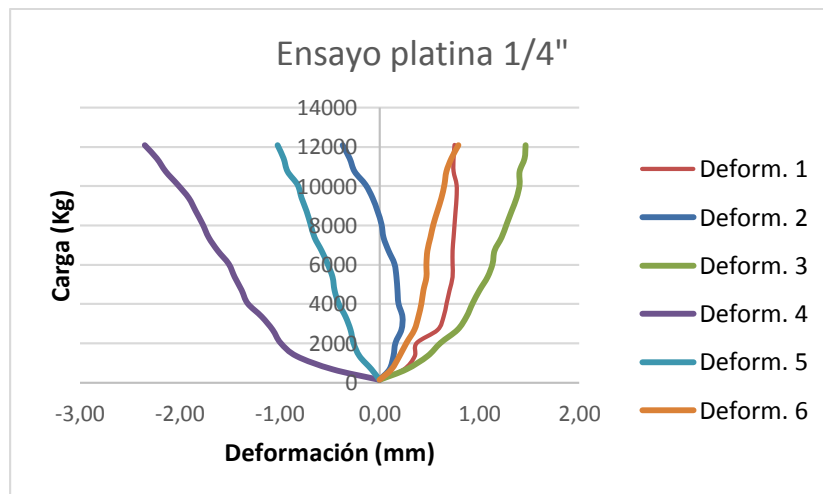
Deformímetro 7: Sobre la viga IPE

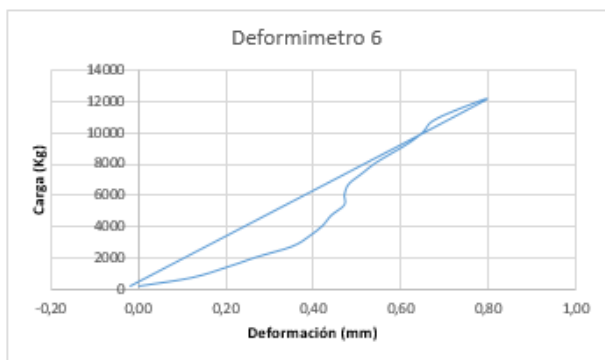
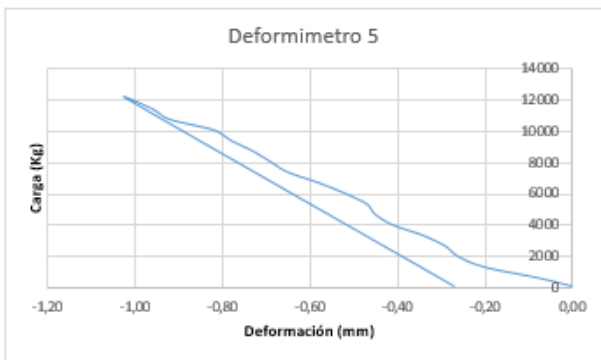
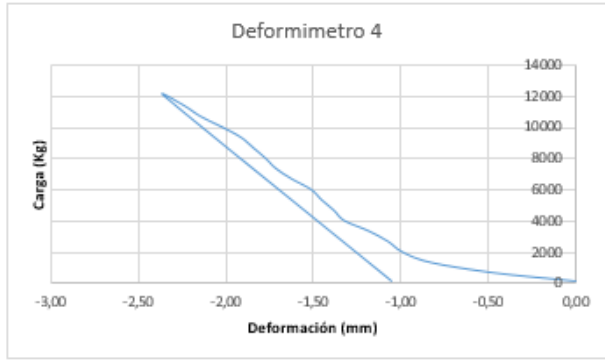
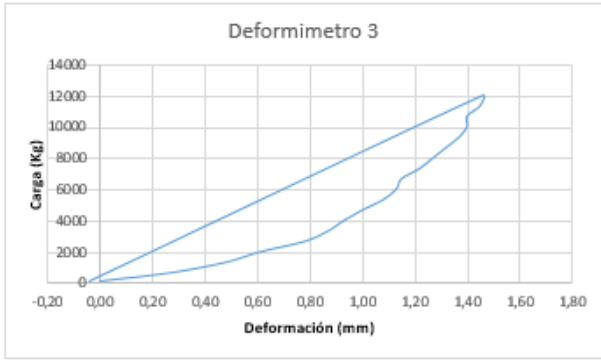
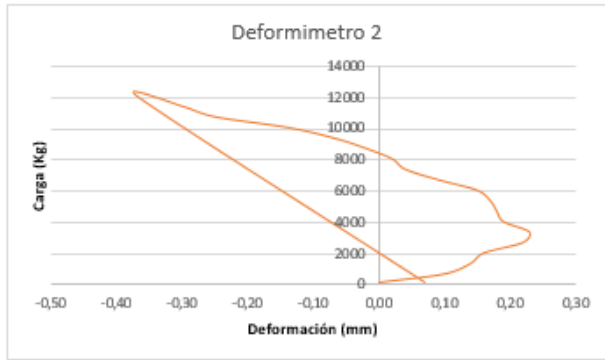
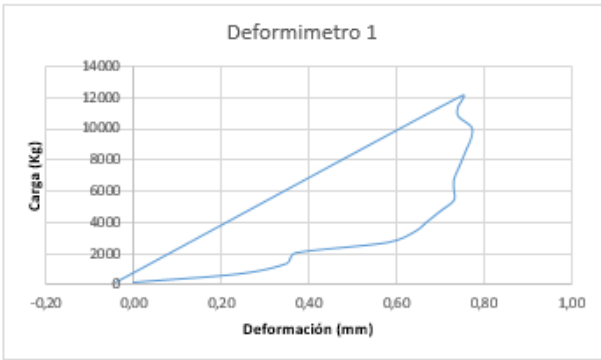
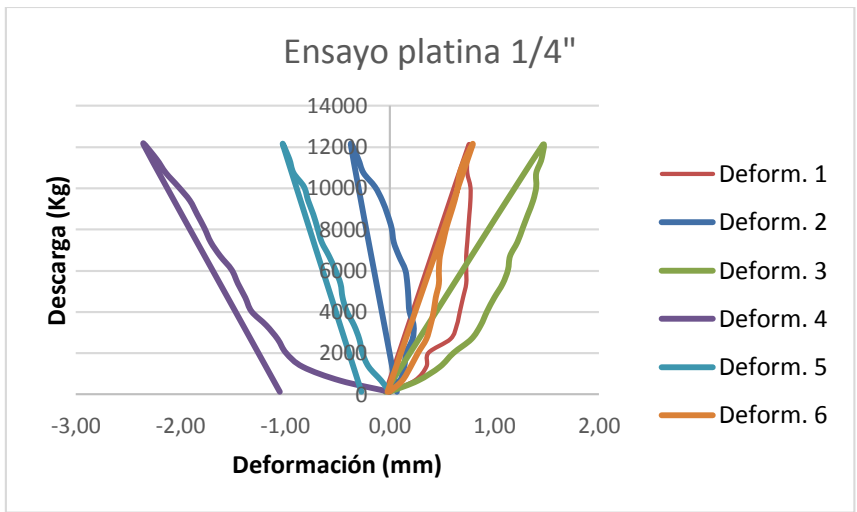
Deformímetro 8: Sobre el muerto A

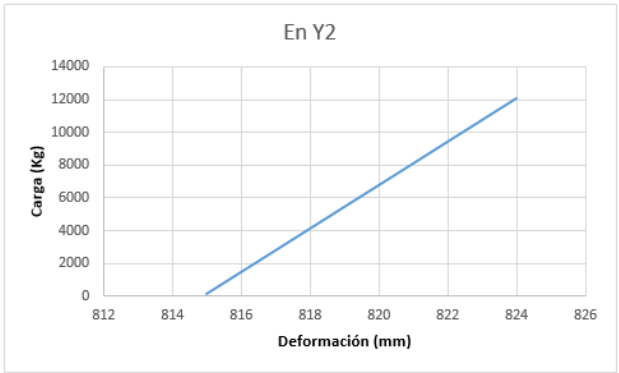
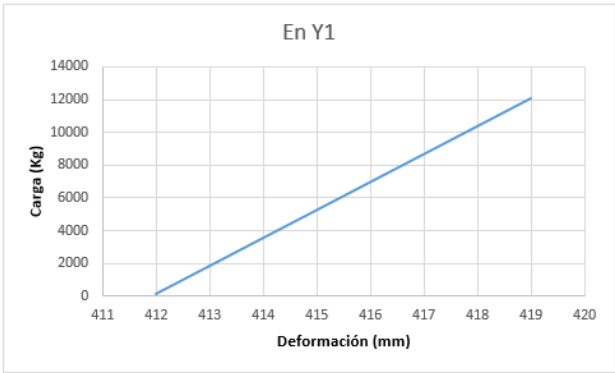
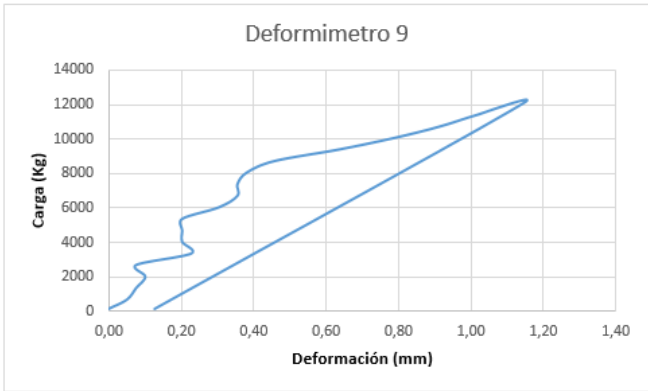
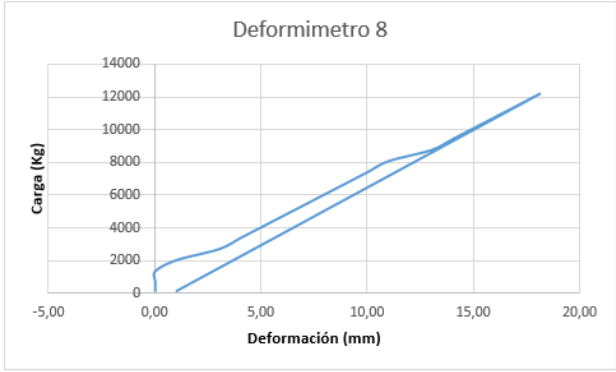
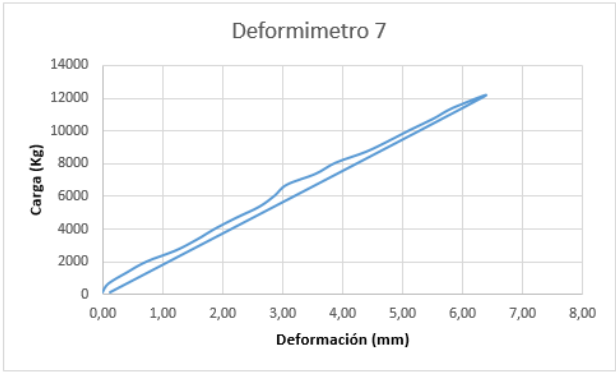
Deformímetro 9: Sobre el muerto B

Y1: Altura libre entre aleta inferior de la viga IPE y la platina intermedia de soporte para deformímetros

Y2: Altura libre entre aleta inferior de la viga IPE y la platina e=1/4"







ANEXO 9: Estudio de suelos Agosto 08 de 2014



Bogotá D.C., Agosto 8 de 2014


Ingeniero
PEDRO NEL QUIROGA
Director del Centro de Estudios de Materiales y Estructuras
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Ciudad

Anexo a la presente estamos entregando el informe IG - 031 - 14, correspondiente a los resultados de los ensayos solicitados por usted al Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

El material recibido y sometido a ensayos, de acuerdo con la identificación dada por usted, fue el siguiente:

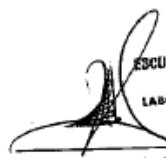
- Muestra N° 1: Material de relleno
- Muestra N° 2: Muestra de suelo fino inalterado

Atenderemos con gusto cualquier aclaración al respecto.



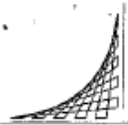
ESCUELA COLOMBIANA DE
INGENIERÍA
LABORATORIO DE SUELOS
Y PAVIMENTOS

Ing. Claudia Ríos Reyes
Laboratorio de Suelos y Pavimentos



ESCUELA COLOMBIANA DE
INGENIERÍA
LABORATORIO DE SUELOS
Y PAVIMENTOS

Ing. Nathaly Mera Solarte
Laboratorio de Suelos y Pavimentos



I. MUESTRA N° 1
Material de Relleno

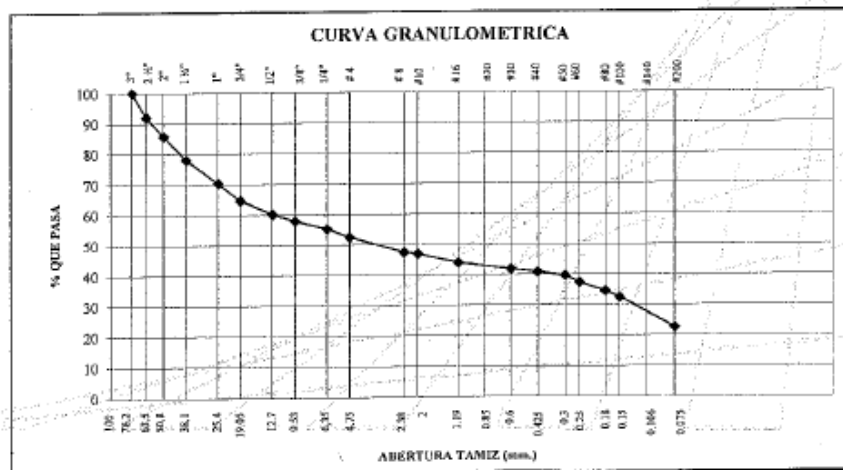
I.1 GRANULOMETRÍA
Norma ASTM C 136 - 84a y C 117 - 87



Peso material sucio y seco (g) = 8756,0
Peso material retenido seco (g) = 6952,0

Peso recipiente (g) = 0,0
Peso material pasa No. 200 (g) = 1804,0

TAMIZ	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO (corregido)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
2½"	688,3	688,3	7,9	7,9	92
2"	553,6	553,6	6,3	14,2	86
1½"	679,1	679,1	7,8	21,9	78
1"	673,9	673,9	7,7	29,6	70
¾"	494,4	494,4	5,6	35,3	65
½"	398,2	398,2	4,5	39,8	60
3/8"	198,5	198,5	2,3	42,1	58
¼"	231,9	231,9	2,6	44,7	55
N° 4	240,7	240,7	2,7	47,5	53
N° 8	440,4	440,4	5,0	52,5	47
N° 10	47,9	47,9	0,5	53,1	47
N° 16	257,3	257,3	2,9	56,0	44
N° 30	192,0	192,0	2,2	58,2	42
N° 40	84,1	84,1	1,0	59,2	41
N° 50	105,6	105,6	1,2	60,4	40
N° 60	199,5	199,5	2,3	62,6	37
N° 80	237,5	237,5	2,7	65,4	35
N° 100	176,1	176,1	2,0	67,4	33
No. 200	870,0	870,0	9,9	77,3	22,7
Fondo	183,0	183,0	22,7	100,0	0,0
Suma pesos retenidos (g) =		6952,0			

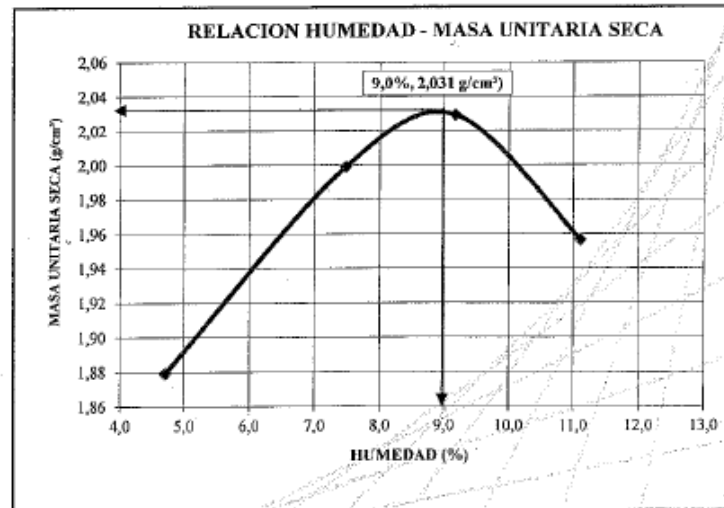


1.2 LIMITES DE ATTERBERG
Norma ASTM D 4318 - 84

Límite Líquido	----
Límite Plástico	No Plástico
Índice de Plasticidad	N.P.

1.3 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD
Método Proctor Modificado
Norma ASTM D 1557 - 78

MUESTRA No.	Humedad (%)	Masa Unitaria Húmeda (g/cm ³)	Masa Unitaria Seca (g/cm ³)
1	4,7	1,968	1,879
2	7,5	2,148	1,999
3	9,2	2,215	2,029
4	11,1	2,174	1,956

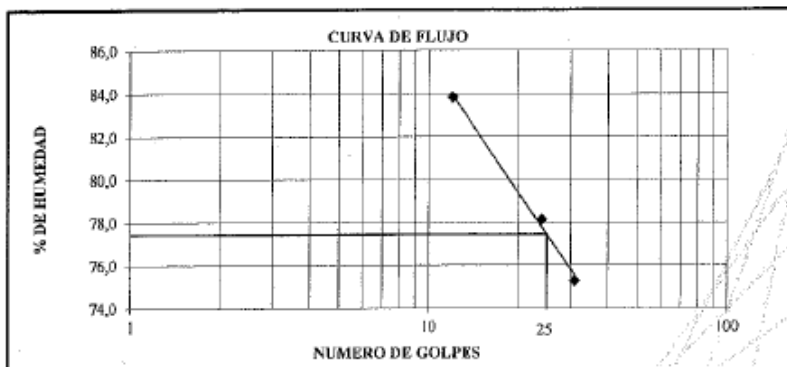


Humedad óptima: 9,0%
Masa Unitaria Máxima: 2,031 g/cm³

2. MUESTRA N° 2
Muestra de suelo inalterada

2.1 LÍMITES DE ATTERBERG
Norma ASTM D 4318 - 84

PRUEBA	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	1	2	3
NÚMERO DE GOLPES	31	24	12	---	---	---
PESO DEL RECIPIENTE	7,22	7,20	7,26	7,08	7,16	---
RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO (g)	31,48	30,25	30,81	12,67	12,96	---
RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	21,06	20,14	20,07	11,12	11,35	---
PESO DEL AGUA (g)	10,42	10,11	10,74	1,55	1,61	---
PESO SUELO SECO (g)	13,84	12,94	12,81	4,04	4,19	---
% HÚMEDAD	75,3	78,1	83,8	38,4	38,4	---



Límite líquido = 77 %
 Límite plástico = 38 %
 Índice de plasticidad = 39 %

CLASIFICACIÓN SUCS:
MH

2.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA:

Diámetro (mm)	61,02
Longitud (mm)	164,33
Relación (L/d)	2,693
Area (cm ²)	29,247
Volumen (cm ³)	480,616
Peso (g)	152,8
γ_T (g/cm ³)	0,318
γ_d (g/cm ³)	0,203

CONTENIDO DE HUMEDAD:

Peso muestra húmeda (g)	804,2
Peso muestra seca (g)	514,0
Contenido de Humedad (%)	56,5

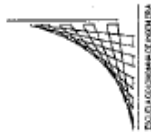
ECUACIÓN ANILLO DE CARGA: $Carga (kg) = 0,3027Div + 2,4733$

Deformación de la muestra (mm)	Divisiones Deformímetro Anillo	Carga (kg)	Deformación Unitaria (%)	Area Corregida (cm ²)	Esfuerzo Normal (kg/cm ²)
0,00	0	2,47	0,0000	29,25	0,085
0,05	2	3,08	0,0304	29,26	0,105
0,12	4	3,68	0,0730	29,27	0,126
0,24	6	4,29	0,1460	29,29	0,146
0,41	8	4,89	0,2495	29,32	0,167
0,68	10	5,50	0,4138	29,37	0,187
0,93	12	6,11	0,5659	29,41	0,208
1,24	14	6,71	0,7546	29,47	0,228
1,57	16	7,32	0,9554	29,53	0,248
1,90	18	7,92	1,1562	29,59	0,268
2,22	20	8,53	1,3509	29,65	0,288
2,86	23	9,43	1,7404	29,77	0,317
3,12	24	9,74	1,8986	29,81	0,327
3,32	25	10,04	2,0203	29,85	0,336
3,59	26	10,34	2,1846	29,90	0,346
3,81	27	10,65	2,3185	29,94	0,356
4,1	28	10,95	2,4950	30,00	0,365
4,44	29	11,25	2,7019	30,06	0,374
5,04	30	11,55	3,0670	30,17	0,383
5,68	30	11,55	3,4565	30,29	0,381
5,93	29	11,25	3,6086	30,34	0,371
6,12	28	10,95	3,7242	30,38	0,360
6,28	27	10,65	3,8216	30,41	0,350
6,43	26	10,34	3,9129	30,44	0,340
6,52	25	10,04	3,9676	30,4554	0,3297

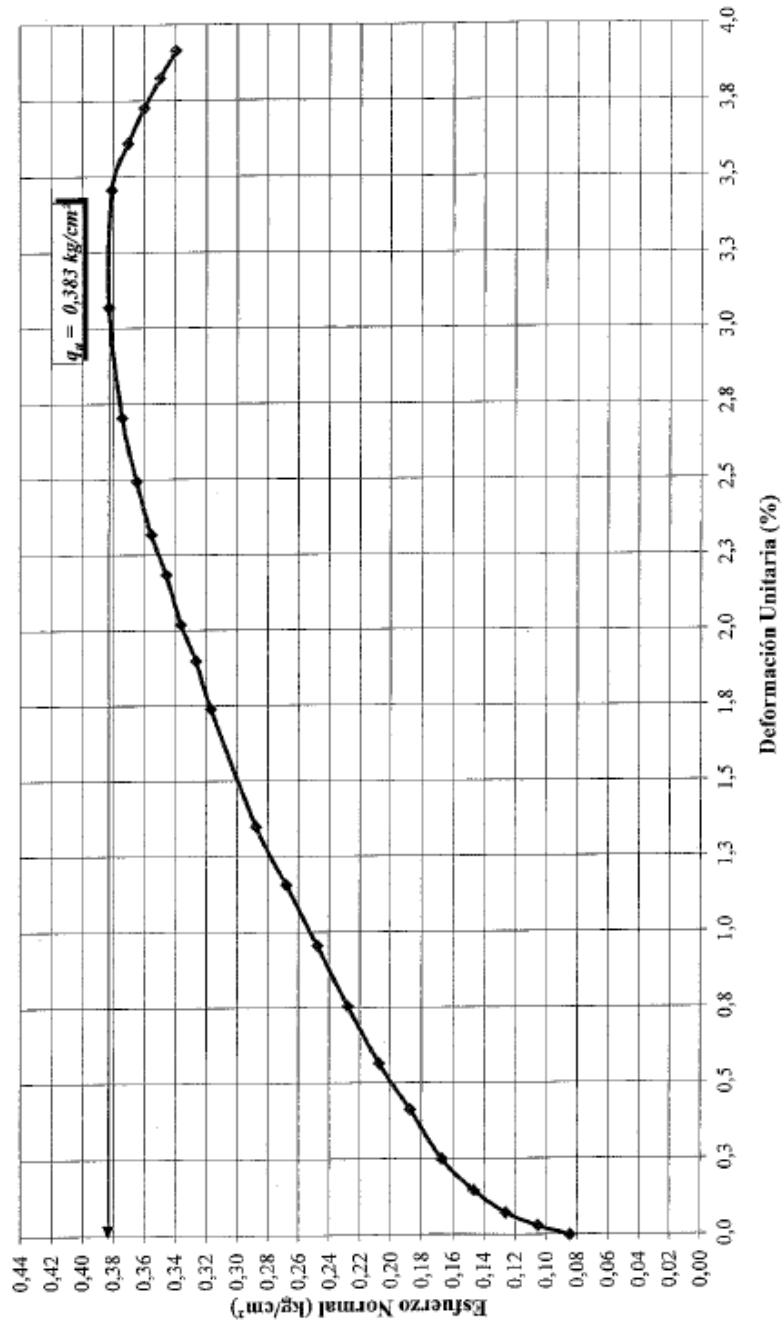


COMPRESIÓN INCONFINADA

IG - 031 - 14
Hoja 5 de 9



ESQUEMA DE MUESTRA





2.3 CONSOLIDACIÓN
Norma INV - E - 151
Ensayo realizado en consolidómetro No. 1

2.3.1 ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN E INDICES C_c y C_r
Norma INV - E - 151

Procedimiento:
Método B

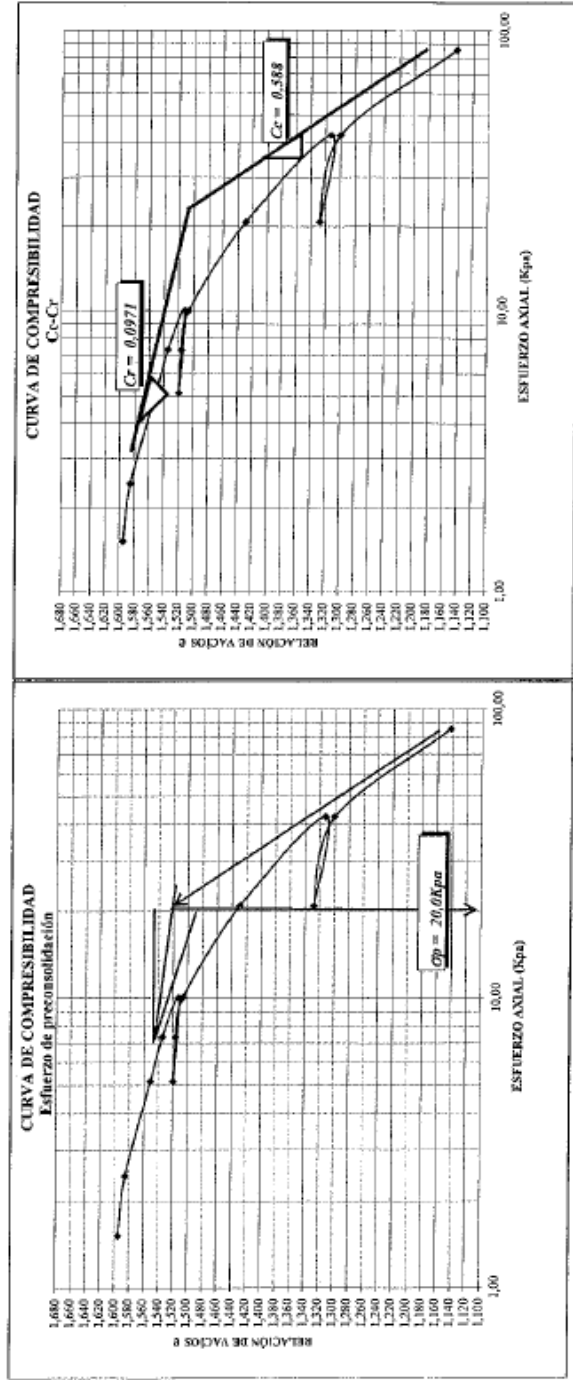
Resultado:
Esfuerzo de Preconsolidación = 20,0 kPa
Índice de Recompresión C_r = 0,097
Índice de Consolidación C_c = 0,577

2.3.2 RELACIÓN DE VACÍOS Y COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN

Incremento de carga	Esfuerzo axial (kPa)	Relación de vacíos e	C_v mm ² /seg
1,00	1,52	1,59	0,1079
2,00	2,44	1,59	0,0967
3,00	5,13	1,55	0,0907
4,00	7,31	1,53	0,0836
5,00	10,02	1,51	0,1185
6,00	5,13	1,52	rebote
7,00	7,30	1,52	rebote
8,00	10,02	1,51	rebote
9,00	20,80	1,43	0,0988
10,00	42,37	1,31	0,0836
11,00	20,80	1,33	rebote
12,00	42,37	1,30	rebote
13,00	85,50	1,14	0,1306

Observación: El coeficiente de consolidación se encontró por el método analítico de Taylor

2.3.3 CÁLCULO GRÁFICO DE ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN, COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD COEFICIENTE DE RECOMPRESIÓN





2.4 CONSOLIDACIÓN

Norma INV - E - 151

Ensayo realizado en consolidómetro No. 2

2.4.1 ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN E INDICES C_e y C_r

Norma INV - E - 151

Procedimiento:

Método b

Resultado:

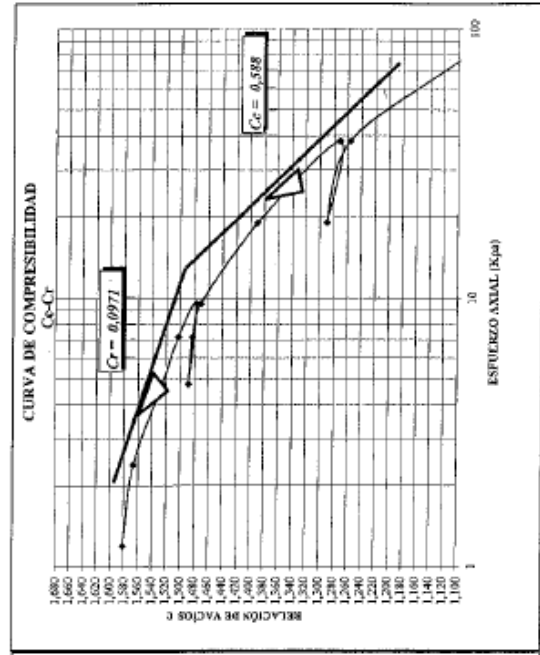
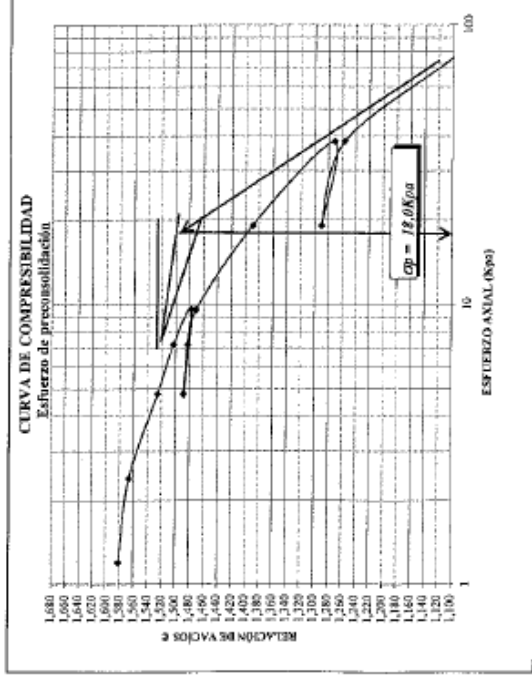
Esfuerzo de Preconsolidación = 18,0 Kpa
 Índice de Recompresión C_r = 0,143
 Índice de Consolidación C_c = 0,407

2.4.2 RELACIÓN DE VACÍOS Y COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN

Incremento de carga	Esfuerzo axial (kPa)	Relación de vacíos e	C_v mm ² /seg
1,00	1,194446036	1,58	0,0840
2,00	2,388892073	1,57	0,0537
3,00	4,777784146	1,53	0,0350
4,00	7,166676219	1,50	0,0399
5,00	9,555568292	1,48	0,0537
6,00	4,777784146	1,49	rebote
7,00	7,166676219	1,48	rebote
8,00	9,555568292	1,47	rebote
9,00	19,11113658	1,39	0,0635
10,00	38,22227317	1,27	0,0537
11,00	19,11113658	1,29	rebote
12,00	38,22227317	1,26	rebote
13,00	76,44454633	1,10	0,0093

Observación: El coeficiente de consolidación se encontró por el método analítico de Taylor

2.4.3 CÁLCULO GRÁFICO DE ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN, COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD Y COEFICIENTE DE RECOMPRESIÓN



ANEXO 10: Estudio de suelos Septiembre 02 de 2014



Bogotá D.C., septiembre 2 de 2014

Ingeniero

PEDRO NEL QUIROGA

Director del Centro de Estudios de Materiales y Estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito


Ciudad

Anexo a la presente estamos entregando el informe IG - 046 - 14, correspondiente a los resultados de los ensayos solicitados por usted al Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, el pasado 15 de Agosto de 2014.

El material recibido y sometido a ensayos, de acuerdo con la identificación dada por usted, fue el siguiente:


- Muestra N° 1: Material de Recebo

Atenderemos con gusto cualquier aclaración al respecto.



ESCUELA COLOMBIANA DE
INGENIERÍA
LABORATORIO DE SUELOS
Y PAVIMENTOS

Ing. Claudia Ríos Reyes
Laboratorio de Suelos y Pavimentos



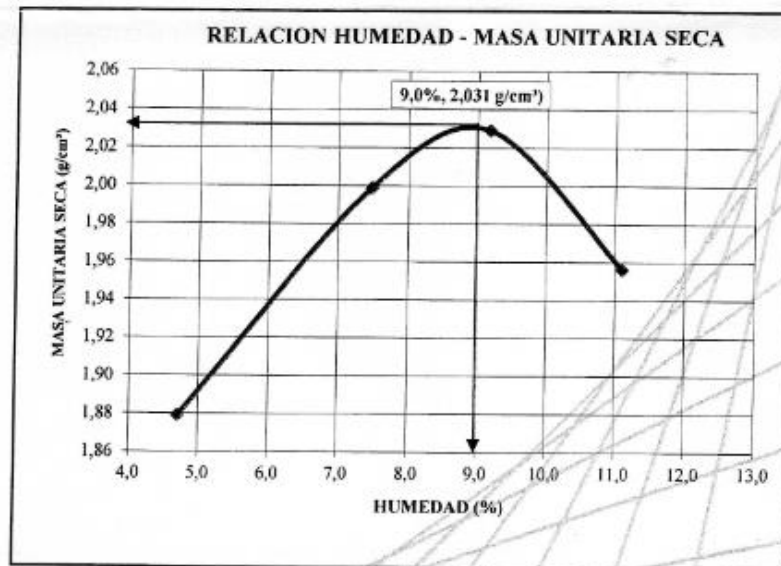
ESCUELA COLOMBIANA DE
INGENIERÍA
LABORATORIO DE SUELOS
Y PAVIMENTOS

Ing. Nathaly Mera Solarte
Laboratorio de Suelos y Pavimentos

I. MUESTRA No 1
Material de Recebo

I.1 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD
Método Proctor Modificado
Norma ASTM D 1557 - 78

MUESTRA No.	Humedad (%)	Masa Unitaria Húmeda (g/cm ³)	Masa Unitaria Seca (g/cm ³)
1	4,7	1,968	1,879
2	7,5	2,148	1,999
3	9,2	2,215	2,029
4	11,1	2,174	1,956

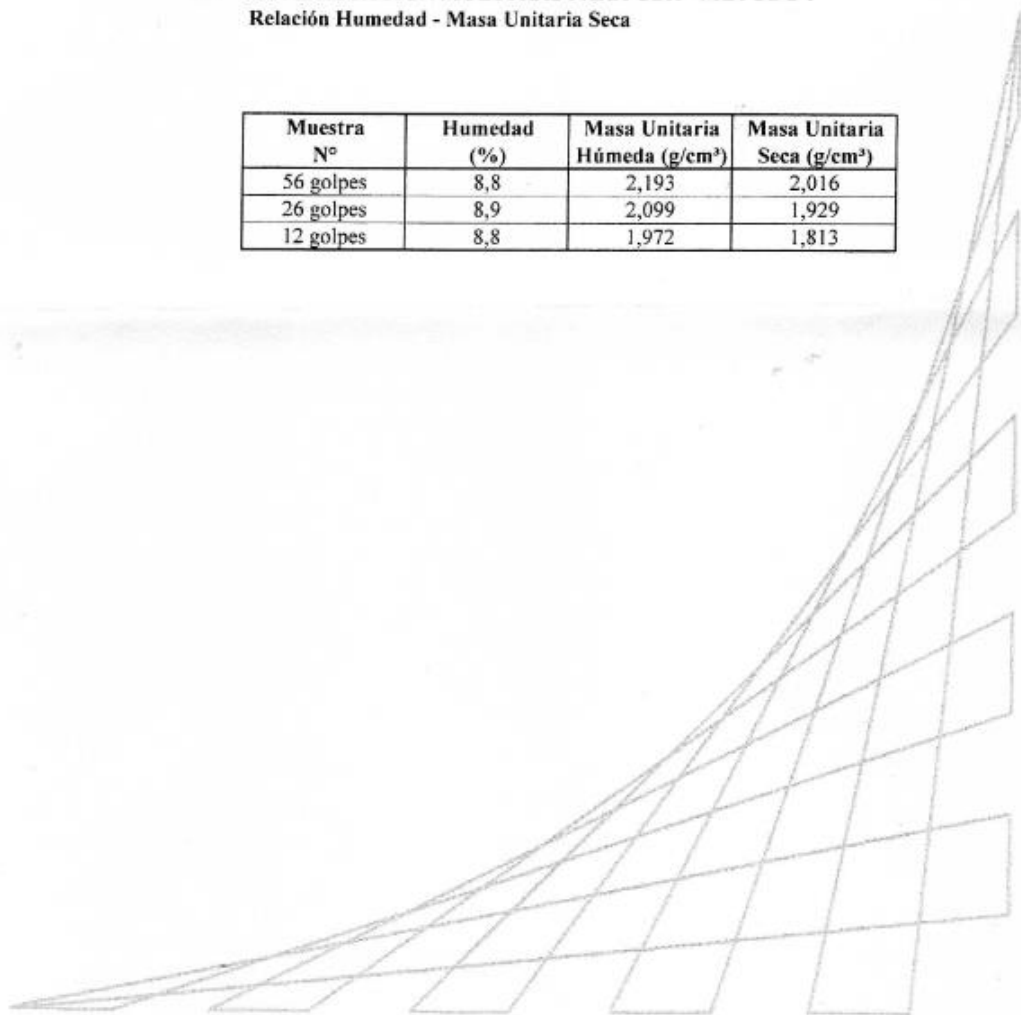


Humedad óptima: 9,0%
Masa Unitaria Máxima: 2,031 g/cm³

Observaciones: Resultado tomado del Informe IG - 031 - 14

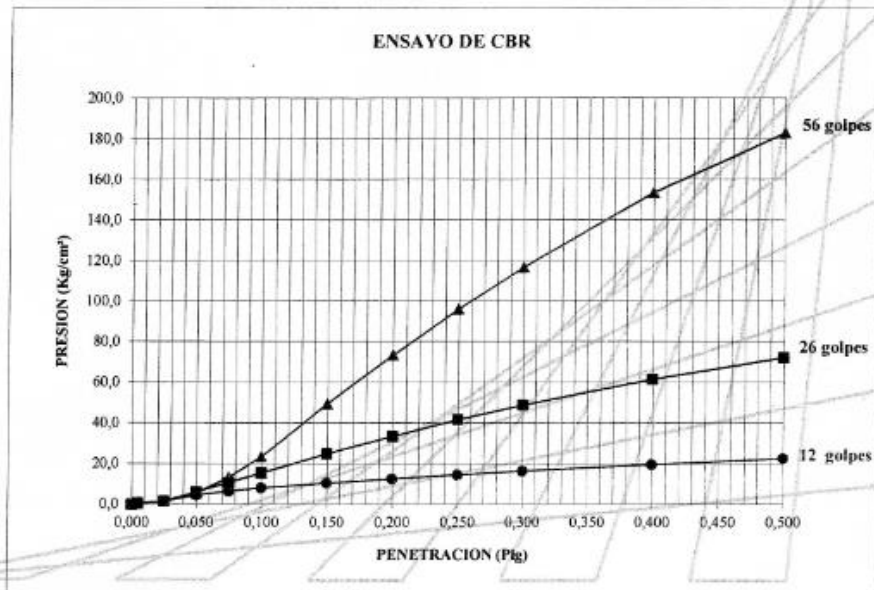
1.2 COMPACTACIÓN MUESTRAS PARA CBR - MÉTODO I
Relación Humedad - Masa Unitaria Seca

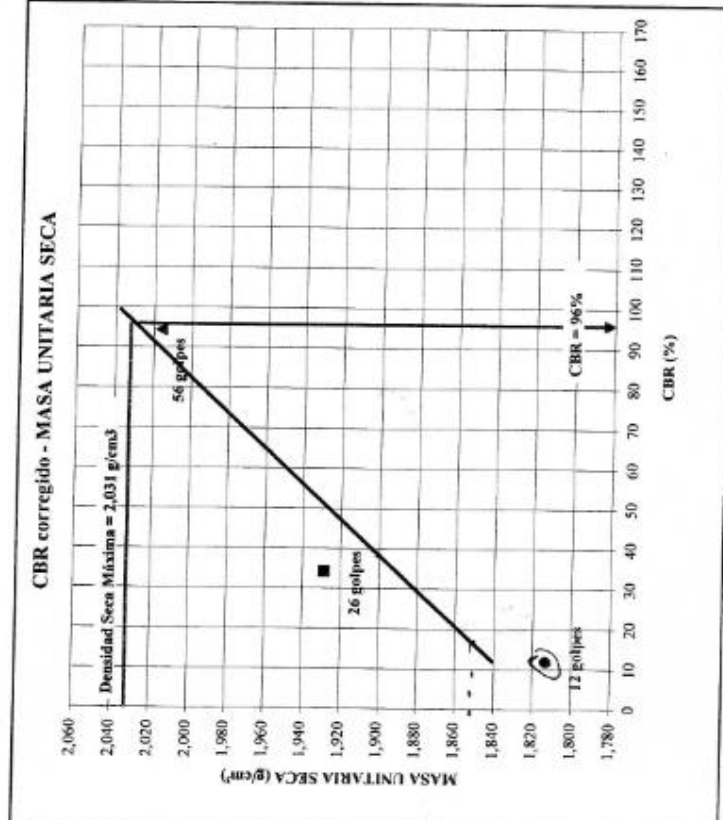
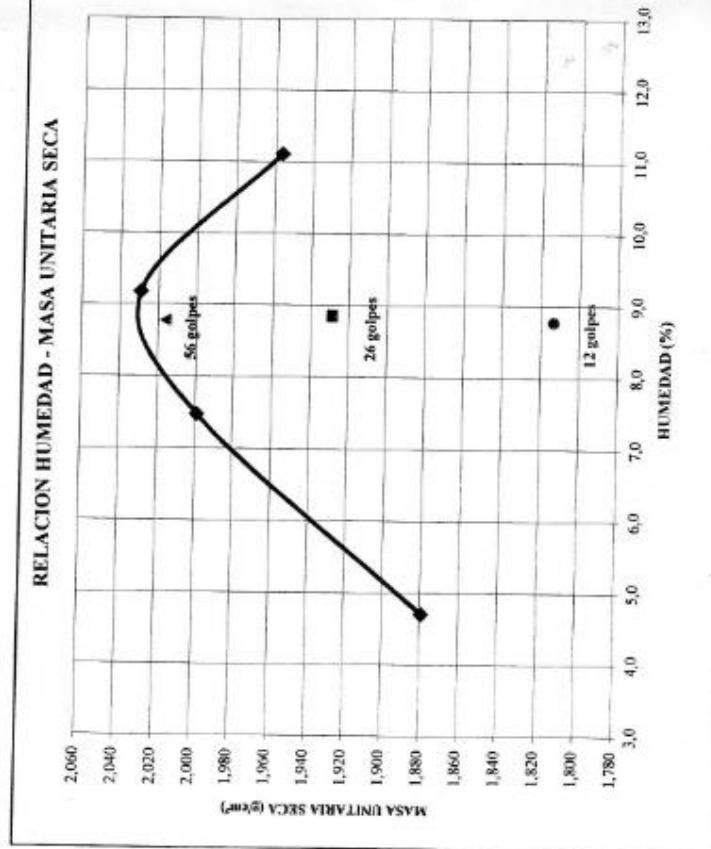
Muestra N°	Humedad (%)	Masa Unitaria Húmeda (g/cm ³)	Masa Unitaria Seca (g/cm ³)
56 golpes	8,8	2,193	2,016
26 golpes	8,9	2,099	1,929
12 golpes	8,8	1,972	1,813



**1.3 CAPACIDAD DE SOPORTE MEDIDA EN EL LABORATORIO
CBR MÉTODO I**

No. de Golpes	56		26		12	
Precarga (Kg)	51		54		57	
Penetración (Pulg)	Carga Kg	Presión Kg/cm ²	Carga Kg	Presión Kg/cm ²	Carga Kg	Presión Kg/cm ²
0,000	51,0	0,0	54,0	0,0	57,0	0,0
0,005	57,0	0,3	65,0	0,6	64,0	0,4
0,025	81,0	1,6	85,0	1,6	89,0	1,7
0,050	157,0	5,5	171,0	6,0	145,0	4,5
0,075	306,0	13,2	263,0	10,8	184,0	6,6
0,100	505,0	23,5	354,0	15,5	216,0	8,2
0,150	1008,0	49,4	539,0	25,1	263,0	10,6
0,200	1471,0	73,4	704,0	33,6	303,0	12,7
0,250	1909,0	96,0	861,0	41,7	342,0	14,7
0,300	2310,0	116,7	999,0	48,8	377,0	16,5
0,400	3020,0	153,4	1246,0	61,6	438,0	19,7
0,500	3591,0	182,9	1453,0	72,3	500,0	22,9
Humedad de penetración (%)	10,2		11,2		12,2	
CBR correg 0.1"	71,4		27,1		11,6	
CBR correg 0.2"	94,3		34,3		12,0	

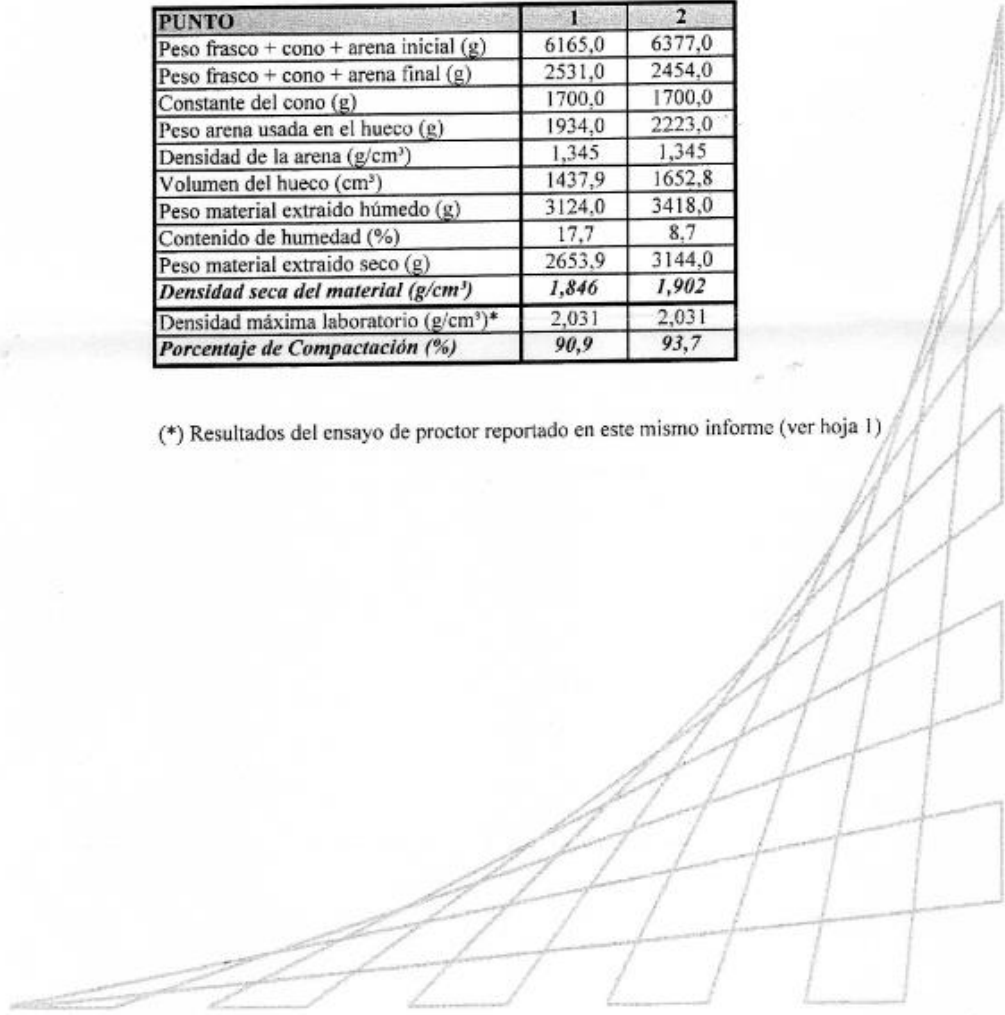




1.5 MASA UNITARIA EN EL TERRENO - MÉTODO DEL CONO Y LA ARENA
Norma I.N.V. E - 161

PUNTO	1	2
Peso frasco + cono + arena inicial (g)	6165,0	6377,0
Peso frasco + cono + arena final (g)	2531,0	2454,0
Constante del cono (g)	1700,0	1700,0
Peso arena usada en el hueco (g)	1934,0	2223,0
Densidad de la arena (g/cm ³)	1,345	1,345
Volumen del hueco (cm ³)	1437,9	1652,8
Peso material extraído húmedo (g)	3124,0	3418,0
Contenido de humedad (%)	17,7	8,7
Peso material extraído seco (g)	2653,9	3144,0
Densidad seca del material (g/cm³)	1,846	1,902
Densidad máxima laboratorio (g/cm ³)*	2,031	2,031
Porcentaje de Compactación (%)	90,9	93,7

(*) Resultados del ensayo de proctor reportado en este mismo informe (ver hoja 1)



ANEXO 11: Prediseño de marco metálico para pruebas de laboratorio

capacidad admisible del suelo estimada del suelo 12 t/m²
 esfuerzo ultimo del suelo FS = 2.5 30 t/m²
 L, lado zapata cuadrada 0.63 m

este es el suelo que vamos a llevar al limite

$F_u = \sigma \cdot A$ 11.91 t

carga maxima a aplicar en el gato
 a la que se espera falle el suelo

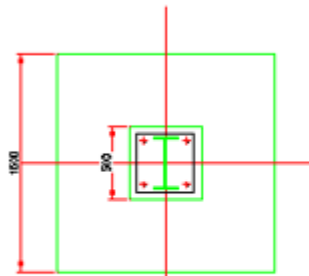
Reaccion en apoyo FS = 1.4 8.33 t

Bloque de cimentacion

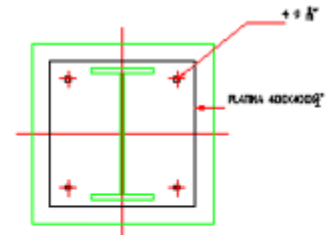
Wmin 8.33 t
 Lado bloque = 0.00 m
 Altura bloque = 0.00 m
 Lado pedestal = 1.50 m
 Altura pedestal = 0.50 m
 Lado zapata = 1.50 m
 Altura zapata = 1.00 m



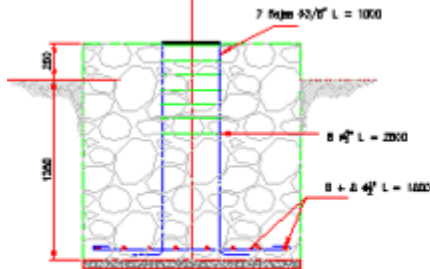
Volumen concreto = 3.38 m³
 Peso concreto = 8.10 t
 Peso relleno = 0.00 t
 Peso total (concreto + relleno) = 8.10 t



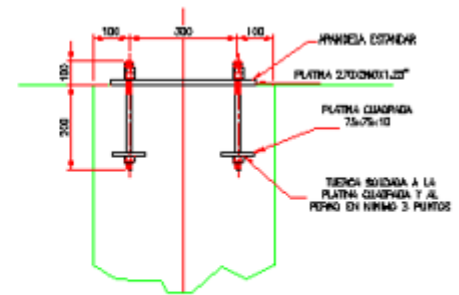
DETALLE PEDESTAL DE APOYO
 PLANTA
 ESC 1:10



DETALLE PLATINA
 PLANTA
 ESC 1:10



DETALLE PEDESTAL DE APOYO
 ELEVACION
 ESC 1:10



DETALLE PERNO 1/2"
 ELEVACION
 ESC 1:10

