



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA REACCIÓN DE UN
SUELO ARENOSO SOLICITADO POR CARGA VERTICAL
Y MOMENTO PARA VALIDAR LA EXISTENCIA DE UNA
ENVOLVENTE ÚNICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERIO CIVIL

FABIÁN ESTEBAN LEAL ZAVALA

PROFESOR GUÍA:
SR. CLAUDIO FONCEA NAVARRO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. PEDRO ACEVEDO MOYANO
SR. RAMON VERDUGO ALVARADO

SANTIAGO DE CHILE
2011

RESUMEN

Este estudio corresponde a una segunda etapa del análisis experimental realizado por Darío Mutoli sobre una arena depositada a diferentes densidades relativas, que mostró resultados de asentamientos en una placa rígida sometida a carga vertical centrada y momento que cuestionan algunos conceptos y valores teóricos e incluso prácticos recomendados en la bibliografía existente.

En el estudio anterior se observó que existía una envolvente en el diagrama carga unitaria versus asentamiento en el borde más solicitado para varios casos de carga. El presente estudio confirma la validez de esta envolvente para una gran variedad y secuencia de condiciones de carga que incluyen incrementos sucesivos de carga centrada y momento, limitados estos últimos por una excentricidad $e = B / 6$

Se demuestra igualmente que considerar un valor único del coeficiente de reacción del suelo para carga vertical centrada y para la aplicación posterior de momento conlleva a resultados significativamente conservadores. El diagrama que incluye la envolvente única para una arena con densidad relativa constante proporciona bases que permitirán diseños futuros de fundaciones dentro de rangos de asentamientos confiables para las condiciones de carga a las que efectivamente estarán sometidas estas estructuras.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer en primer lugar a mi familia, y en especial a mi madre, por la paciencia y la confianza entregada durante este largo periodo, por nunca dudar de mis capacidades y entregarme apoyo en todo momento. Además, agradecer a mi polola Carla por el constante apoyo y motivación brindado, el cual fue vital en la etapa de finalización de esta memoria.

Al profesor Claudio Foncea, por el tiempo dispensado en las revisiones, los consejos, retos y, por sobre todo, la cordialidad con que siempre me recibió.

Finalmente, y no por ello menos importante, agradezco a todas las personas que hicieron que los días en el laboratorio fueran mas agradables y llevaderos, en especial agradezco a Omar González y Mario Carrillo por su ayuda en los ensayos, sin la cual me hubiese sido imposible realizarlos.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPITULO 1 INTRODUCCION	6
1.1 INTRODUCCION	6
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 GENERALES.....	7
1.2.2 ESPECÍFICOS	7
CAPITULO 2 ANTECEDENTES EXPERIMENTALES	8
2.1 ENSAYOS PLACA DE CARGA EN ARENA.....	8
2.2 ENSAYOS DEPOSITACION EN ARENA (AIR PLUVIATION).....	10
CAPITULO 3 DISEÑO DEL ENSAYO.....	11
3.1 MONTAJE.....	11
3.1.1 EQUIPO	11
3.1.2 CARACTERISTICAS DEL SUELO ENSAYADO	11
3.1.3 DEPOSITACION DE LA ARENA.....	13
METODO DE DEPOSITACIÓN.....	13
VERIFICACIÓN DE LA DENSIDAD.....	17
3.2 PROGRAMA DE ENSAYOS.....	18
CAPITULO 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	20
4.1 INTRODUCCION	20
4.2 PRIMERA ETAPA. CARGA VERTICAL CENTRADA.	20
4.3 SEGUNDA ETAPA. CARGA VERTICAL Y MOMENTO.	21
4.3.1 ASENTAMIENTOS DE LA PLACA.....	21
4.3.2 GIROS DE LA PLACA.....	23
4.4 TERCERA ETAPA. APLICACIÓN DE MOMENTO HASTA UNA CONDICION INTERMEDIA.	25
4.4.1 ASENTAMIENTOS DE LA PLACA.....	25
4.4.2 GIROS DE LA PLACA.....	27
CAPITULO 5 DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO... 30	30
5.1 DISCUSIÓN	30
5.1.1 ASENTAMIENTOS PRODUCIDOS POR LA APLICACIÓN DE MOMENTO.....	30
5.1.2 ENVOLVENTE PARA LA CONDICION $e = B / 6$	34
5.1.3 COEFICIENTES DE REACCION DEL SUELO	40

5.1.4	DENSIDAD RELATIVA DE LA MUESTRA	41
5.2	CONCLUSIONES	42
5.3	TRABAJO FUTURO.....	43
	REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS.....	44

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

Para el diseño de fundaciones es necesario conocer el comportamiento de la interacción entre la fundación y el suelo, el cual es generalmente modelado como una cama de resortes caracterizados por una constante k , conocida como coeficiente de balasto o coeficiente de reacción del suelo.

El uso de un valor único de este parámetro, el que es obtenido a través de ensayos de placa de carga in situ, utilizando criterios de asentamiento admisible o de carga admisible, o simplemente empleando correlaciones con otros parámetros del suelo, es reconocido como inválido. Por otra parte, al obtener el valor del coeficiente de reacción del suelo a partir de ensayos de placa de carga sometidos solo a carga vertical, se está ignorando que en la realidad las fundaciones están sometidas simultáneamente a solicitaciones de carga vertical y momento, combinación asociada a mayores valores de este coeficiente.

Un primer estudio experimental sobre este tema fue realizado por Darío Mutoli (Ref. 1) quien analizó las deformaciones de una placa rígida cuadrada de 15 cm de arista sometida a carga vertical y momento, cuando apoyada en arena con diversos estados de compacidad. Los ensayos demostraron que los valores de k obtenidos para carga vertical centrada resultan significativamente menores que los obtenidos para aplicación de un momento cuando la carga vertical es mantenida constante.

En este nuevo estudio, también experimental, se analizan los casos de carga vertical centrada sobre una placa rígida, carga vertical centrada constante con sollicitación de momento variable, y además se incluyen sollicitaciones monotónicamente crecientes tanto para la carga vertical como para el momento, a fin de complementar el análisis del comportamiento de la placa rígida para las diversas condiciones de carga vertical y momento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERALES

El objetivo de este estudio es complementar las informaciones de los ensayos realizados en el estudio de Mutoli para obtener bases que permitan validar y extender los resultados y recomendaciones de aplicación para su posible incorporación al diseño de las fundaciones.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Para la misma arena colocada a densidades relativas de 50% y 80% se busca determinar las curvas carga – deformación de una placa rígida sometida a carga centrada y luego las mismas curvas para aplicación de incrementos sucesivos de carga centrada y momento, cuidando, en esta última aplicación, no sobrepasar el valor de $B/6$ en la excentricidad.

En otras palabras, se intentará verificar la existencia de una envolvente única para cada condición de compacidad de la arena, lo que permitirá al ingeniero desplazarse en el campo esfuerzo-deformación con valores de k confiables y dentro de los límites de aplicación definidos por esta envolvente.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES EXPERIMENTALES

2.1 ENSAYOS PLACA DE CARGA EN ARENA

Es necesario considerar que este trabajo es una continuación de la tesis de Mutoli, por lo que sus ensayos, resultados y conclusiones son parte integral de los antecedentes de este estudio.

Además, las fuentes bibliográficas de la tesis de Mutoli, entre las cuales se encuentran los estudios experimentales realizados por Georgiadis y Butterfield (Ref. 6), Montrasio y Nova (Ref. 7) y Smith (Ref. 8), constituyen igualmente parte de los antecedentes considerados.

De estos últimos estudios, se presentan en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3 los resultados obtenidos.

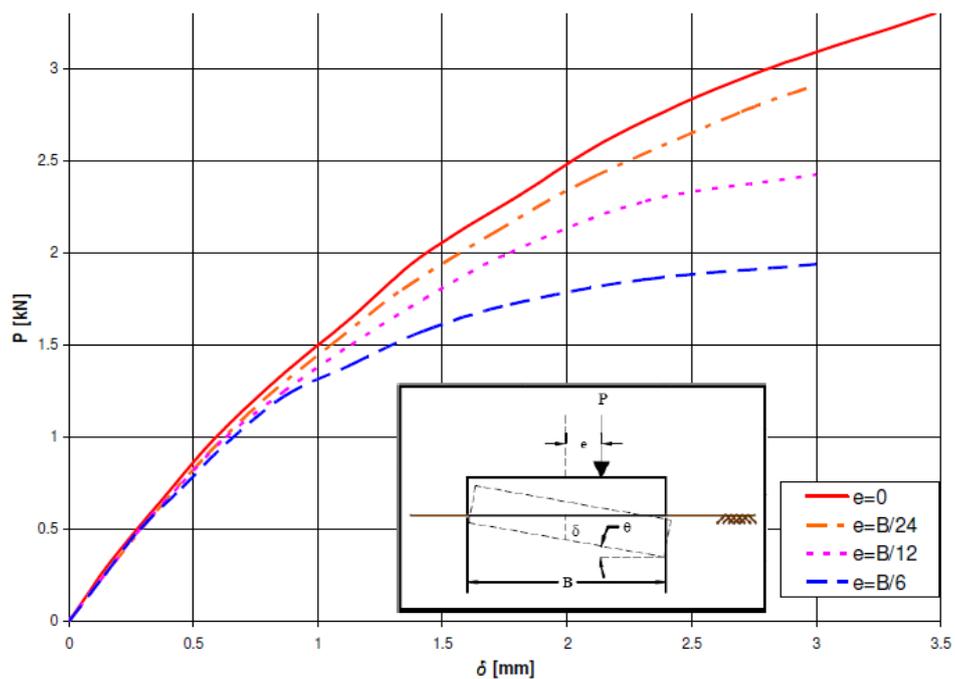


Figura 1 Resultado de los ensayos realizados por Geogiadis y Butterfield (1988) para una arena con densidad relativa del 75% cargada para distintas excentricidades.

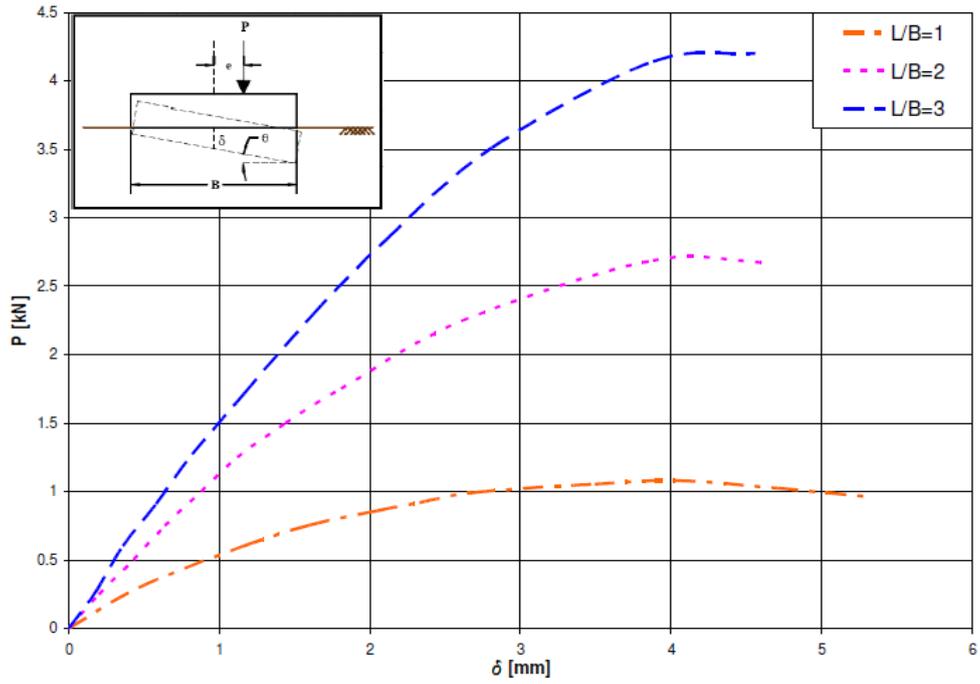


Figura 2 Resultado de los ensayos realizados por Montrasio y Nova (1997) para una arena con densidad seca de 1.7gr/cm^3 para distintas relaciones L/B ensayada con una excentricidad $e=B/8$.

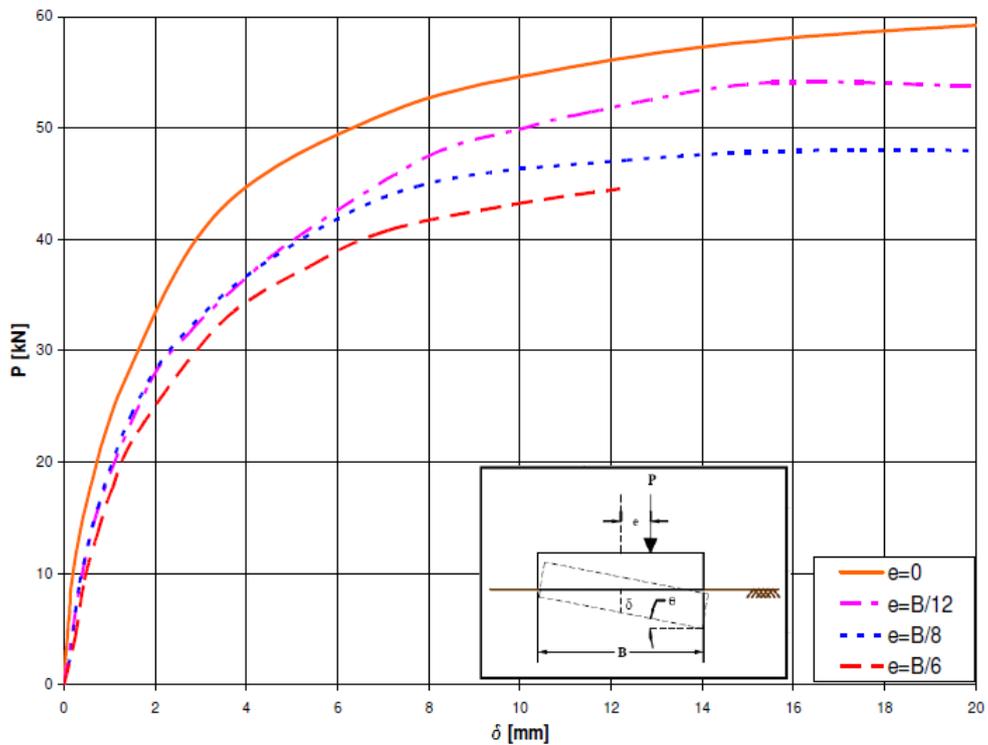


Figura 3 Resultado de los ensayos realizados por Smith (2004) para una arena con densidad seca de 1.76 gr/cm^3 para distintas excentricidades.

2.2 ENSAYOS DEPOSITACION EN ARENA (AIR PLUVIATION)

En la literatura existen numerosos estudios relacionados con este método de depositación, entre los que se cuentan: Miura y Toki 1982 (Ref. 9); Vaid y Negussey 1984b (Ref.10), 1988 (Ref.11) y Rad y Tumay 1987 (Ref.12). Sin embargo, todos estos corresponden a estudios realizados en muestras triaxiales de dimensiones significativamente menores a las que se utilizarán en el presente estudio.

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos por Vaid y Negussey en los ensayos de depositación, mediante el método de *air pluviation*, realizados en dos distintas variedades de la arena de Ottawa, para distintas alturas de caída y flujos. Estos ensayos fueron realizados en probetas destinadas a ensayos triaxiales tradicionales.

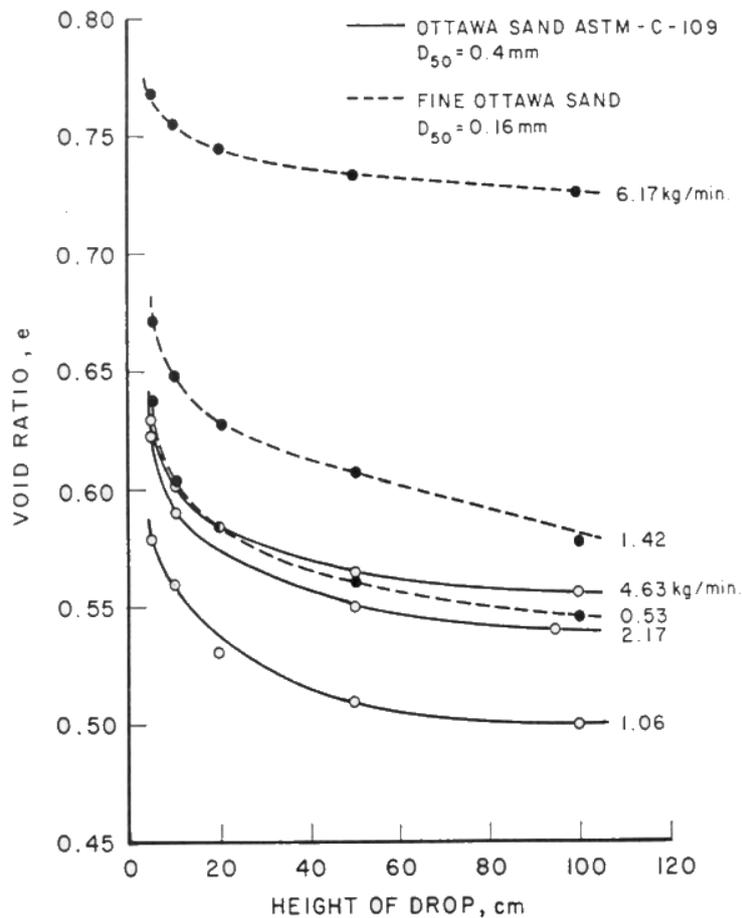


Figura 4 Resultados de los ensayos de densidad relativa para distintas alturas de caída realizados por Vaid & Negussey.

CAPITULO 3 DISEÑO DEL ENSAYO

3.1 MONTAJE

3.1.1 EQUIPO

El equipo ya construido en la primera etapa consiste en una caja de dimensiones 90cm x 90cm x 60cm, conformada por paneles de madera unidos y reforzados mediante zunchos formados por perfiles metálicos. Además, se utilizó una placa de acero cuadrada de 15cm de lado y 10mm de espesor reforzado con atiesadores para la aplicación de las solicitaciones.

La carga vertical se aplicó a través de un cilindro hidráulico el cual se apoya externamente en un marco de acero lo suficientemente rígido tal que asegura que sus deformaciones no resulten significativas y no afecten por tanto el ensayo.

Las mediciones de la carga fueron realizadas mediante una celda de carga con capacidad para 2 toneladas, mientras que las deformaciones se midieron con 4 diales ubicados sobre las esquinas de la placa, que tienen una precisión de 0.01mm.

3.1.2 CARACTERISTICAS DEL SUELO ENSAYADO

El suelo utilizado en los ensayos corresponde a una arena de playa, pobremente graduada de color amarillo claro, partículas angulares y subangulares, humedad ambiente y que posee un contenido de finos inferior al 1%. Esta arena fue tamizada con una malla ASTM#8, por lo que no posee partículas mayores a 2.4 mm.

La curva granulométrica del suelo se muestra en la Figura 5. De acuerdo a esta curva el coeficiente de uniformidad (C_u) es igual a 2.2 y el coeficiente de curvatura (C_c) es igual a 0.79. Por lo tanto el suelo, según la clasificación USCS, corresponde a una arena limpia pobremente graduada (SP).

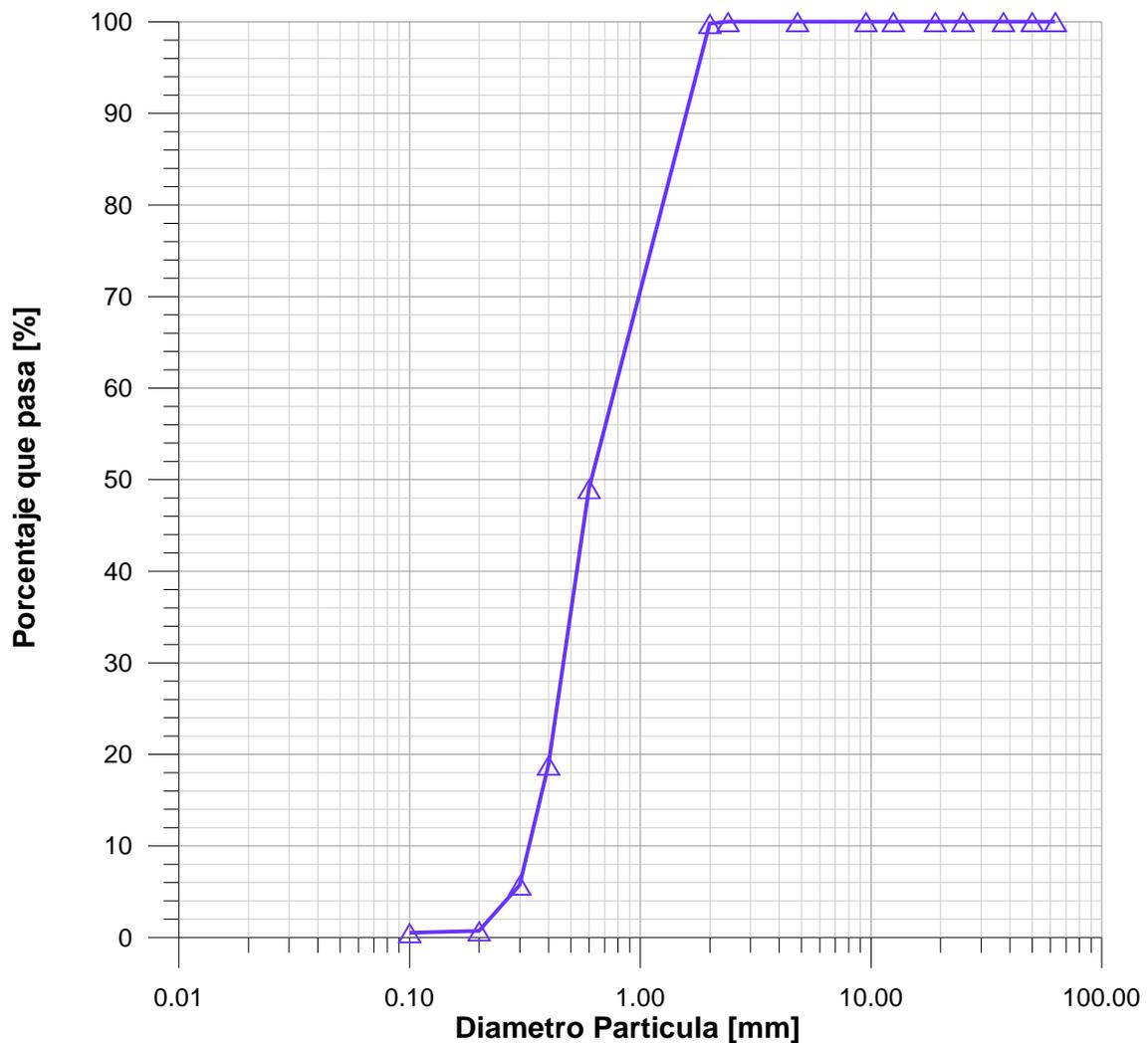


Figura 5 Curva granulométrica del suelo ensayado.

Las densidades, máxima y mínima, fueron calculadas de acuerdo a la norma NCh1726. En el caso de la densidad máxima se obtuvo un valor de 1.785 gr/cm³, mientras que para la densidad mínima el valor obtenido fue de 1.421gr/cm³.

Otro parámetro útil para caracterizar un suelo arenoso es el ángulo de fricción en reposo del suelo, el cual se puede interpretar como el mínimo ángulo de fricción interna que tendrá el suelo en su estado más suelto. En este caso, el suelo posee un ángulo de fricción interna en reposo igual a 31°.

3.1.3 DEPOSITACION DE LA ARENA

METODO DE DEPOSITACIÓN

La base de arena fue confeccionada mediante el método de depositación *air pluviation*, el cual ha sido ampliamente usado tanto en muestras pequeñas como en cajas de grandes dimensiones, como es este caso. Este método fue elegido debido a que permite obtener muestras uniformes y homogéneas, además de poder apuntar a densidades relativas que se obtienen con gran repetitividad.

Del estudio bibliográfico se destaca en esta área lo realizado por Mulilis et al. (1975) quienes concluyeron en un estudio realizado en arenas Monterrey N°0, que para obtener densidades relativas de 50%, 70% y 85%, era necesaria la utilización de un tubo con perforaciones de distintos diámetros, 6.9mm, 5.1mm y 3.8mm, respectivamente, como el que se aprecia en la Figura 6. Esto muestra que a mayor abertura, mayor es la intensidad de la depositación, lo cual genera menores densidades relativas para misma altura de caída.

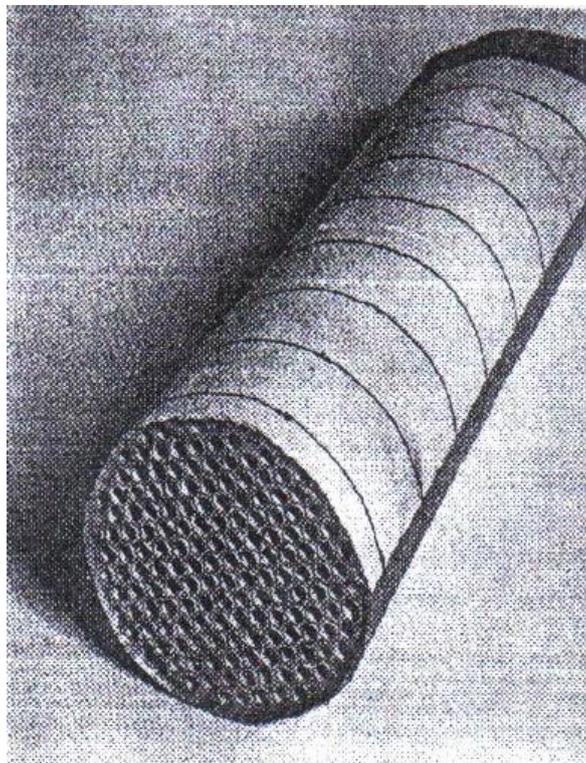


Figura 6 Tubo cilíndrico utilizado por Mulilis et al (1975)

También son relevantes los ensayos realizados por Vaid & Negusseyy en los cuales se muestra que la densidad relativa de las muestras preparadas por el método de *air pluviation* depende tanto de la altura de caída como del flujo o intensidad de depositación.

De este modo, y basándose en la literatura se confeccionó un equipo que permite una depositación uniforme, homogénea y más rápida en comparación al método utilizado en la etapa anterior de este estudio.

El sistema utilizado consta de un contenedor superior de dimensiones 60cmx90cmx90cm, una válvula, una manguera flexible, una tapa perforada que controla el flujo y un contenedor inferior de dimensiones 60cmx90cmx90cm, los cuales se muestran en la Figura 7.

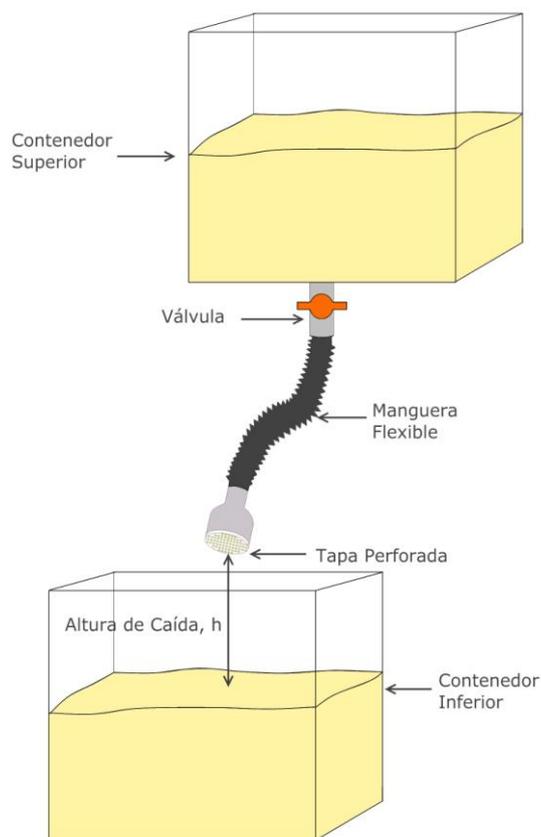


Figura 7 Esquema del nuevo sistema de depositación. Se muestra la incorporación de un rociador y una válvula.

Este equipo permite variar el flujo de depositación de acuerdo al diámetro y espaciamiento de las perforaciones de la tapa. En la Figura 8 se muestran las dos configuraciones utilizadas: (a) perforaciones de 0.8 cm de diámetro distanciadas entre sí por 0.8cm, que permiten un flujo de 7.5 kg/min, (b) perforaciones de 0.5 cm de diámetro distanciadas entre sí por 0.6 cm, que permiten un flujo de 15 kg/min.

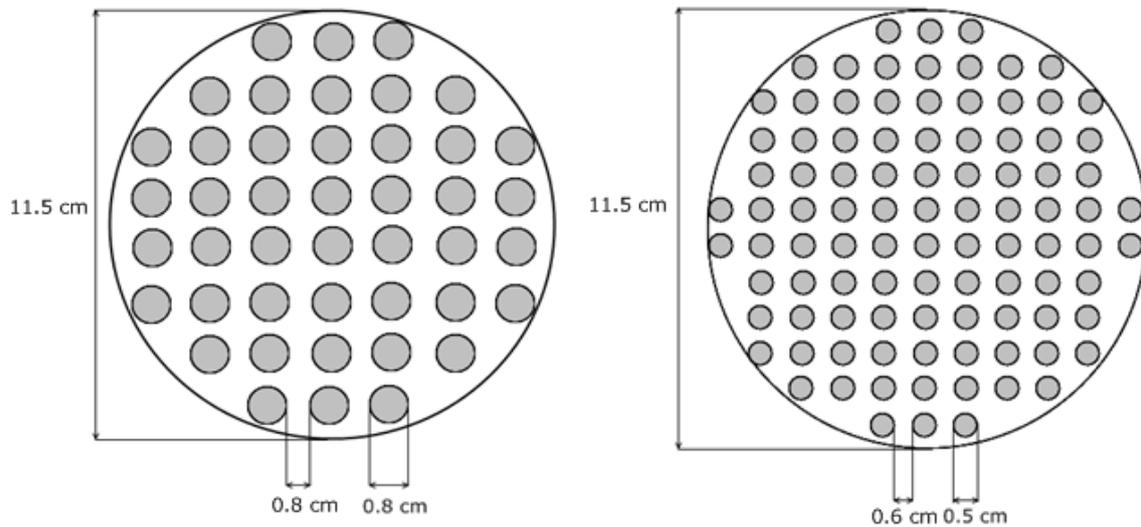


Figura 8 Vista frontal de las configuraciones utilizadas en las tapas perforadas.

Con el fin de estimar la densidad relativa final de la muestra se realizaron ensayos de depositación en una caja a escala de dimensiones 30cmx50cmx50cm, a distintas alturas de caída y para las dos configuraciones de perforaciones.

En la Figura 9 se muestran los resultados de los ensayos realizados en este estudio junto con los de Vaid & Negussey.

Se puede observar que los resultados obtenidos con el nuevo equipo siguen la misma tendencia que los realizados por Vaid & Negussey en probetas triaxiales, es decir, a medida que aumenta la altura de caída disminuye el índice de vacío y a medida que aumenta el flujo aumenta el índice de vacío.

De esta forma, utilizando las curvas obtenidas de los ensayos se deducen las alturas de caída que se utilizarán para obtener las densidades relativas deseadas. Para obtener la muestra de densidad media (D.R.~50%) se utilizará la configuración de perforaciones que permite un flujo de 15.5 kg/min, con una altura de caída de 19 cm, mientras que para la muestra densa (D.R.~80%) se utilizará la configuración que permite un flujo de 7.5 kg/min, con una altura de caída de 50 cm, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Tipos de muestra utilizados en el estudio de acuerdo a su densidad relativa con sus flujos y alturas de caída respectivas requeridas para obtenerlas.

Tipo	Densidad Relativa, DR [%]	Flujo [kg/min]	Altura de Caída, h [cm]
Media	50	15.5	19
Densa	77	7.5	50

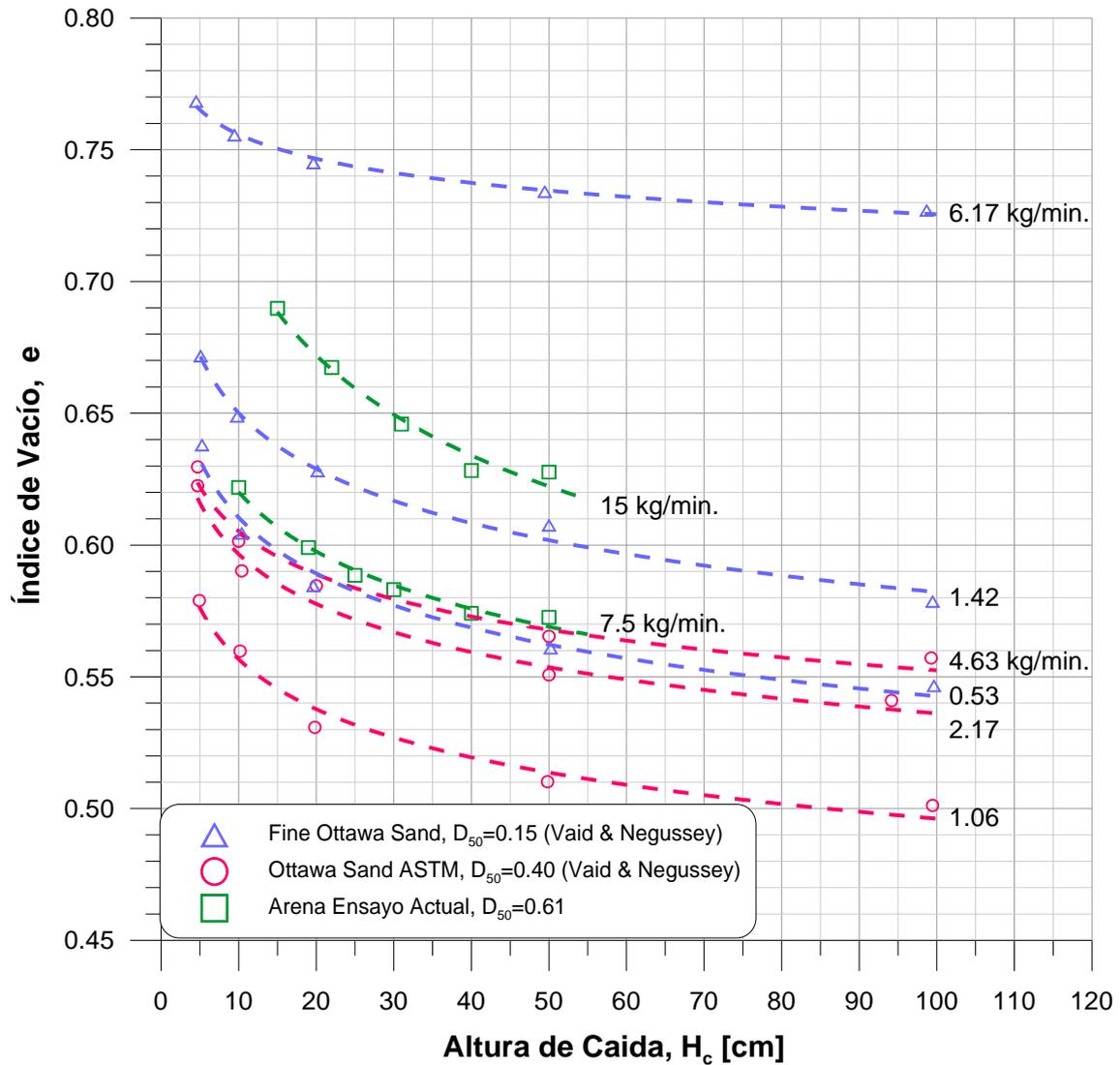


Figura 9 Resultados de los ensayos de densidad para el método de deposición *air pluviation* en la arena utilizada para el ensayo actual junto con los resultados de Vaid & Negussej en Fine Ottawa y Ottawa ASTM. Se indica el flujo utilizado en la depositación para cada curva.

VERIFICACIÓN DE LA DENSIDAD

Ante la imposibilidad de medir la densidad total de la muestra se utilizó un método, alternativo a la medición de la densidad en la caja a escala, que permite estimar la densidad de los 15 cm superiores.

Este método consistió en colocar cuatro testigos cilíndricos en cada esquina, de volumen conocido, en la porción superior de la caja una vez que el llenado de esta llegó a ese nivel, como se ve en la Figura 10. De esta forma, una vez finalizado cada ensayo, los testigos fueron retirados y pesados para calcular la densidad de cada testigo.

El promedio de la densidad de los cuatro testigos se mostrará en cada ensayo como referencia.

La ubicación de los testigos permite afirmar que estos no interfieren con los resultados del ensayo dado que están fuera del área de influencia de la placa de carga.

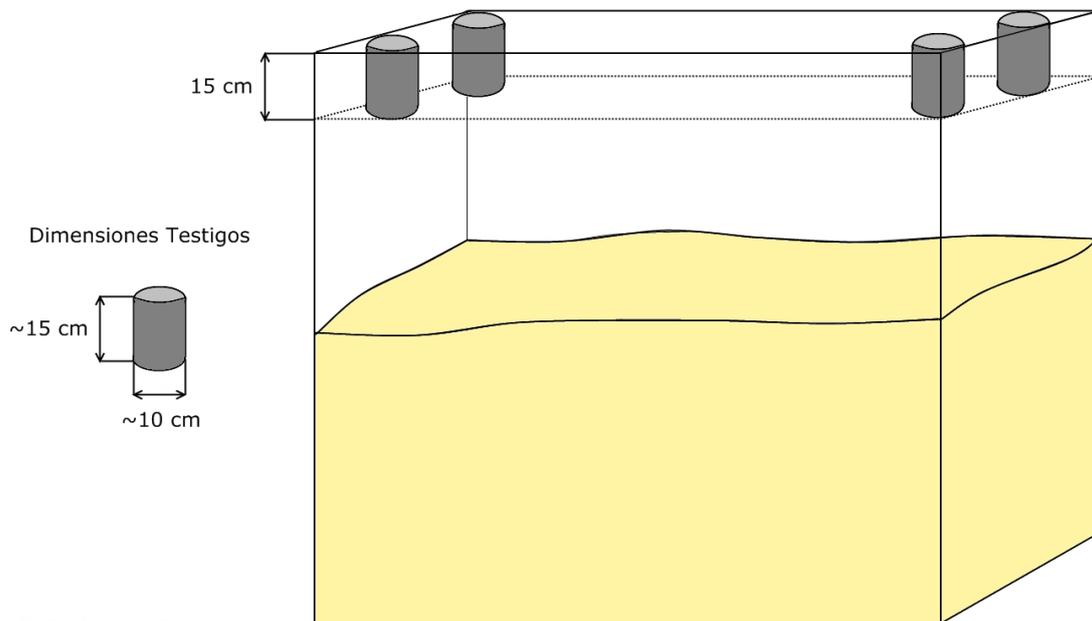


Figura 10 Esquema de la ubicación de los testigos utilizados para estimar la densidad relativa.

3.2 PROGRAMA DE ENSAYOS

El programa de ensayos de este estudio estuvo compuesto de tres etapas, las cuales se detallan a continuación.

Primera Etapa

Esta etapa consistió en la realización de los ensayos de carga vertical centrada para las densidades relativas de 50% y 80%, a fin de verificar que los procedimientos y metodologías de depositación y carga utilizados entregaran resultados compatibles con los obtenidos por Mutoli. De esta manera se obtuvieron las cargas máximas para cada densidad relativa, valores que fueron utilizados en las etapas posteriores.

Segunda Etapa

Cabe mencionar que la realización de esta etapa estuvo condicionada por el éxito que tuvo la etapa anterior para reproducir los resultados obtenidos en el estudio de Mutoli. Una vez asegurado esto, se procedió a realizar los ensayos con la siguiente secuencia de carga para las distintas densidades relativas:

1. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/4q_{m\acute{a}x}$.
2. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
3. Descarga de momento hasta volver a la condición de carga vertical centrada pura.
4. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/3q_{m\acute{a}x}$.
5. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
6. Descarga de momento hasta volver a la condición de carga vertical centrada pura.
7. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/2q_{m\acute{a}x}$.
8. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
9. Descarga de momento hasta volver a la condición de carga vertical centrada pura.
10. Aplicación de carga vertical centrada hasta la falla.

Tercera Etapa

Los pasos a seguir en esta etapa dependieron directamente de los resultados obtenidos en la etapa previa. Una vez concluida la etapa anterior, se procedió a realizar el ensayo para las diferentes densidades relativas de acuerdo a la siguiente secuencia de carga:

1. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/4q_{\text{máx}}$.
2. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
3. Descarga de momento hasta una condición equivalente a $e=B/12$.
4. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/3q_{\text{máx}}$.
5. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
6. Descarga de momento hasta una condición equivalente a $e=B/12$.
7. Aplicación de carga vertical centrada hasta un valor de $1/2q_{\text{máx}}$.
8. Aplicación de momento manteniendo la carga vertical constante hasta un valor máximo equivalente a una excentricidad $e=B/6$.
9. Descarga de momento hasta una condición equivalente a $e=B/12$.
10. Aplicación de carga vertical centrada hasta la falla.

CAPITULO 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se entregan los resultados de los ensayos de placa de carga realizados en muestras de densidades relativas del orden de 50% y 77%.

Los resultados que interesan son los asentamientos medidos en una placa de acero cuadrada de 15cm×15cm para diferentes condiciones de carga: (a) carga vertical centrada, (b) carga vertical centrada constante más la aplicación de momento hasta alcanzar la excentricidad $e = B/6$ y (c) carga vertical centrada con aplicación de momento hasta condiciones intermedias. Más detalles se entregan en Capítulo 3 donde estas condiciones de carga aparecen con denominaciones Primera, Segunda y Tercera Etapa respectivamente.

Las cargas y los asentamientos se consideran positivos en el sentido de aplicación de la carga, es decir, hacia abajo. La rotación se considera positiva en el sentido de aplicación del momento.

El término asentamiento promedio corresponde al asentamiento en el centro de la placa, promedio de los asentamientos medidos en cada esquina de la placa rígida.

4.2 PRIMERA ETAPA. CARGA VERTICAL CENTRADA.

En la Figura 11 se muestran los resultados de los ensayos realizados con carga vertical centrada para las muestras de densidad media (DR=50%) y densa (DR=77%). Además, se incluyen como referencia los resultados de carga vertical centrada del estudio de Mutoli realizado sobre la misma arena.

Se realizaron dos ensayos para cada densidad para comprobar la repetitividad de los resultados, la cual de acuerdo a los resultados que aparecen en la Figura 11 es considerada aceptable para esta investigación.

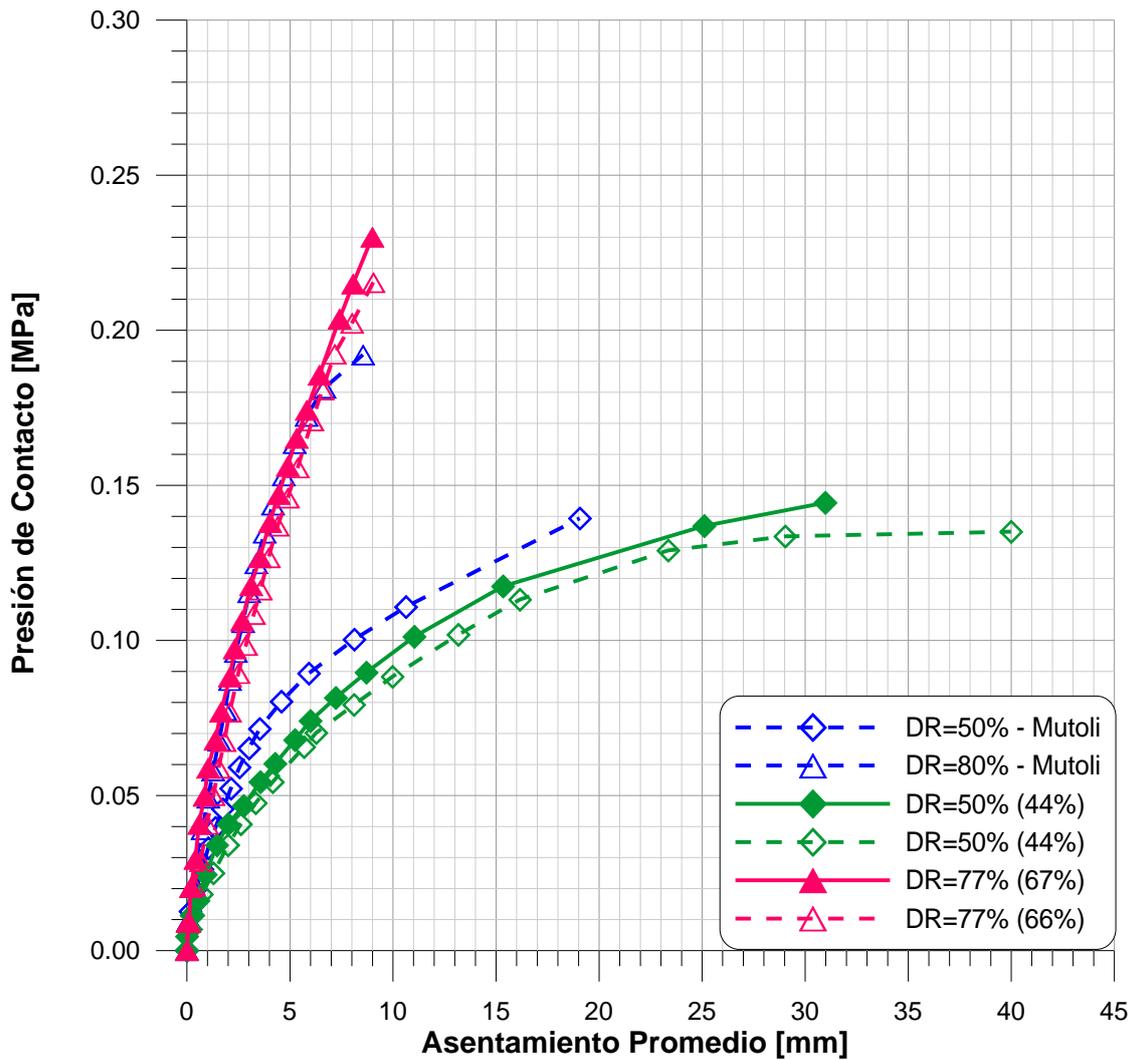


Figura 11 Resultados de los ensayos de carga vertical centrada para las muestras de densidad media y densa. Se incluyen los resultados de los ensayos de carga vertical centrada del estudio anterior como referencia. Entre paréntesis se indica la densidad promedio obtenida de los testigos.

4.3 SEGUNDA ETAPA. CARGA VERTICAL Y MOMENTO.

4.3.1 ASENTAMIENTOS DE LA PLACA

En la Figura 12 y Figura 13 se entregan los asentamientos del borde más solicitado versus la presión de contacto de este borde para los ensayos realizados en las muestras de densidad media (DR=50%) y densa (DR=77%) para la Segunda Etapa, la cual consiste en aplicación de carga vertical centrada hasta cierto nivel, para luego, manteniendo la carga vertical constante, aplicar momento hasta $e=B/6$ y, finalmente, disminuir el momento hasta volver a la condición de carga vertical centrada inicial. Este

proceso se realizó, al igual que en el estudio de Mutoli, para tres distintos niveles de carga vertical constante, $Q_{m\acute{a}x}/4$, $Q_{m\acute{a}x}/3$ y $Q_{m\acute{a}x}/2$.

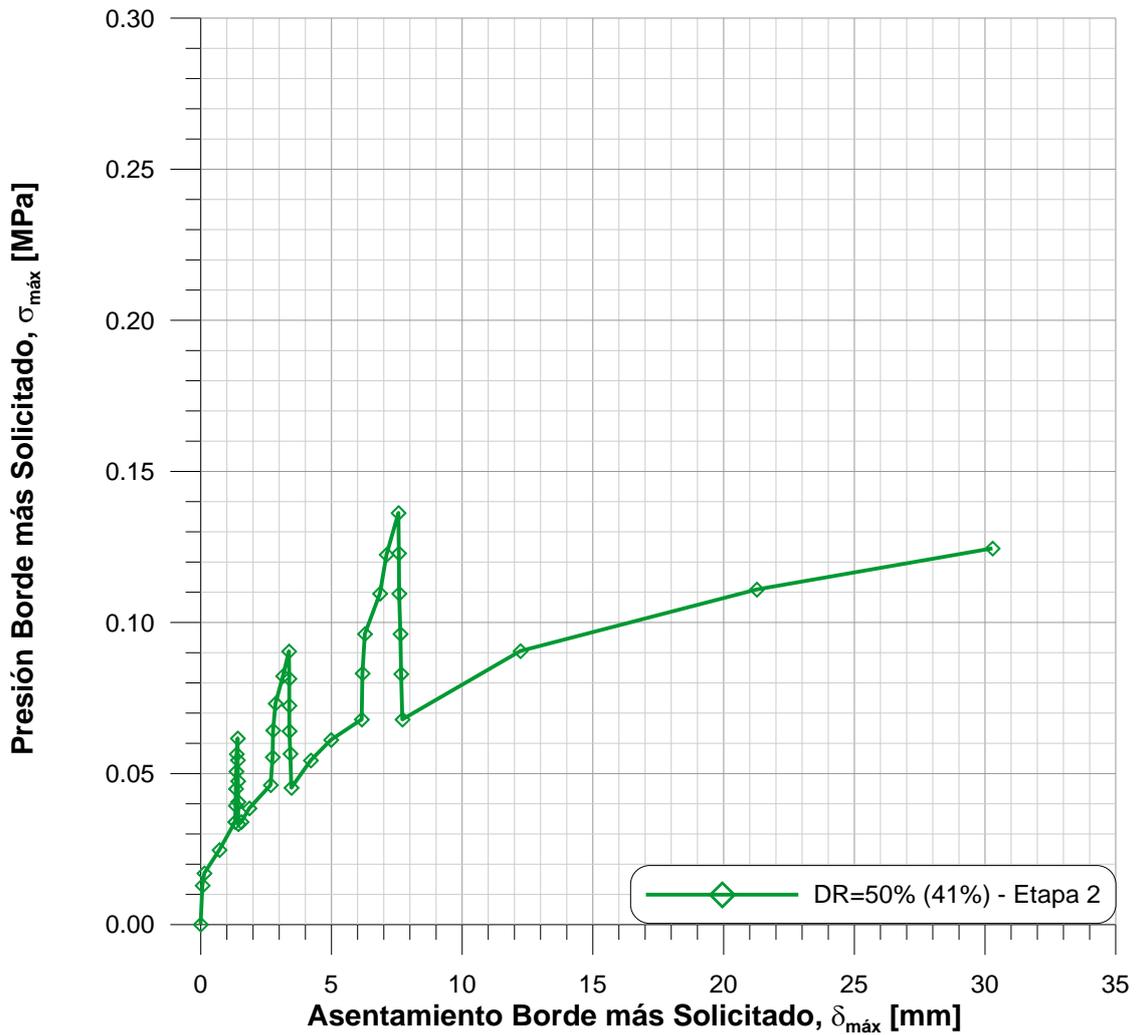


Figura 12 Asentamiento del borde más solicitado para los ensayos de carga vertical y momento para la muestra densa. Entre paréntesis se indica la densidad promedio obtenida de los testigos.

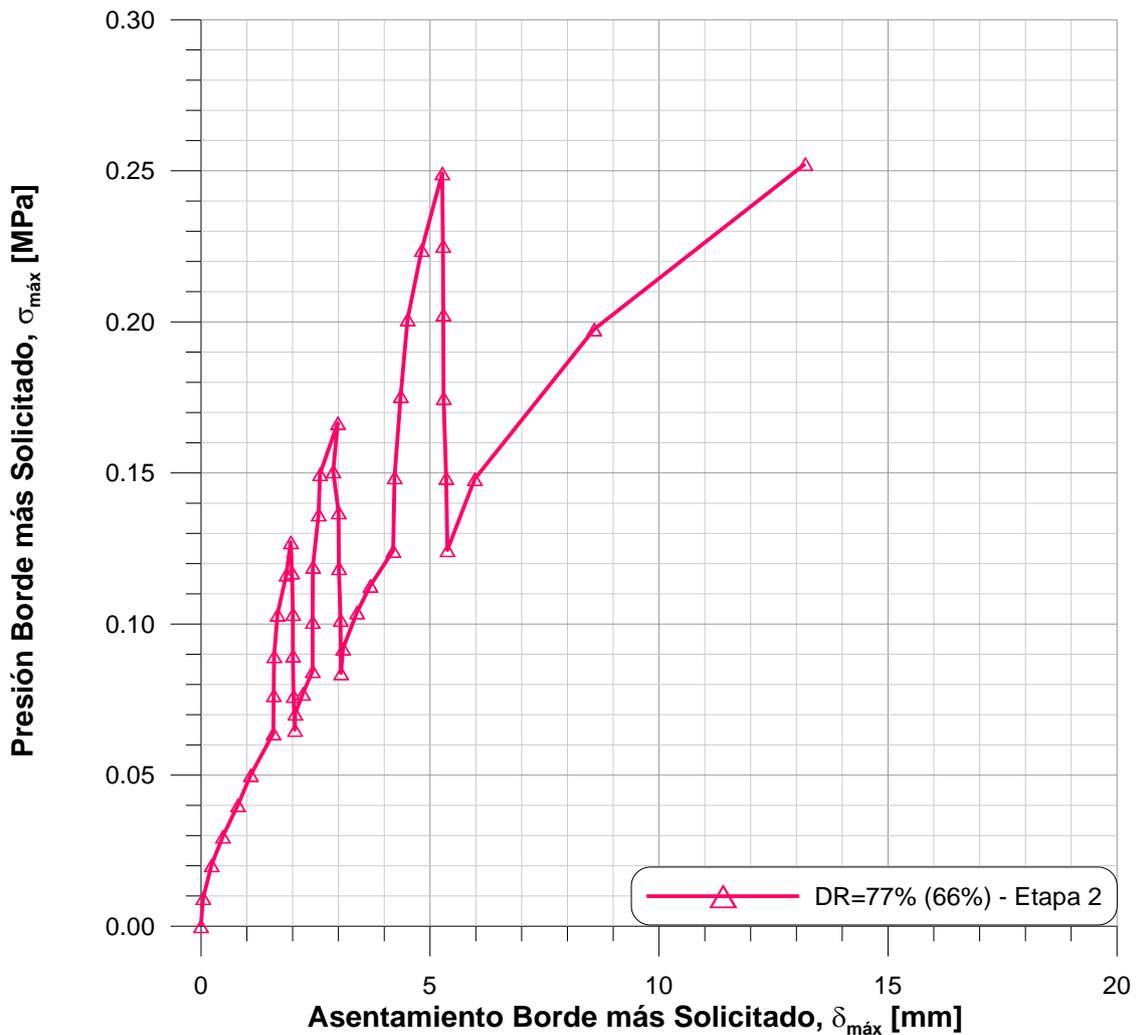


Figura 13 Asentamiento del borde más solicitado para los ensayos de carga vertical y momento para la muestra densa. Entre paréntesis se indica la densidad promedio obtenida de los testigos.

4.3.2 GIROS DE LA PLACA

En la Figura 14 y Figura 15 se muestran los ángulos de giro producidos por la aplicación de momento a la placa rígida para las muestras de densidad media y densa, en ensayos de carga vertical y momento. Se consideran tres niveles de carga centrada constante, $Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$, para posterior aplicación de momento.

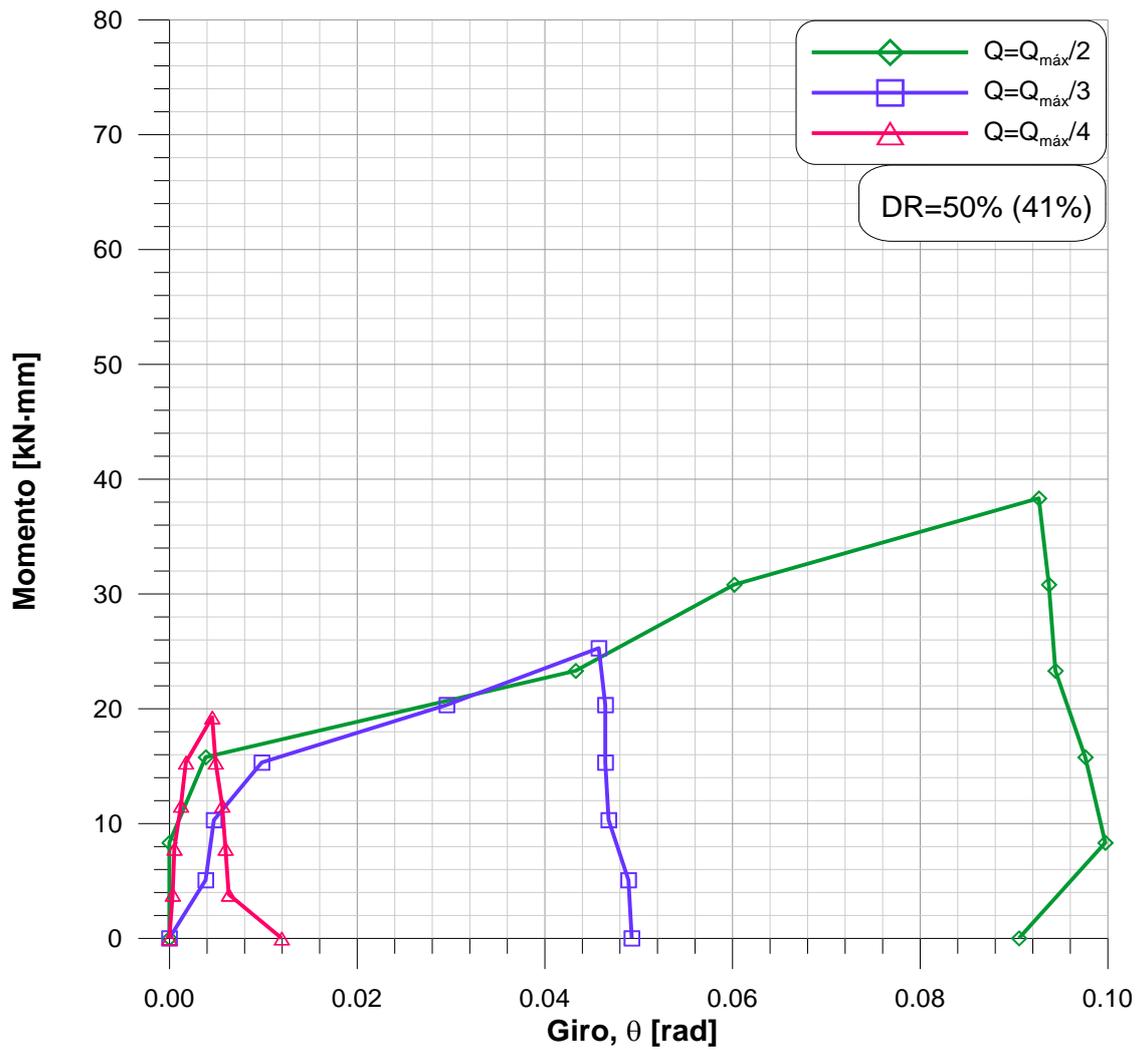


Figura 14 Giro de la placa rígida para el ensayos de carga vertical y momento en la muestra de densidad media.

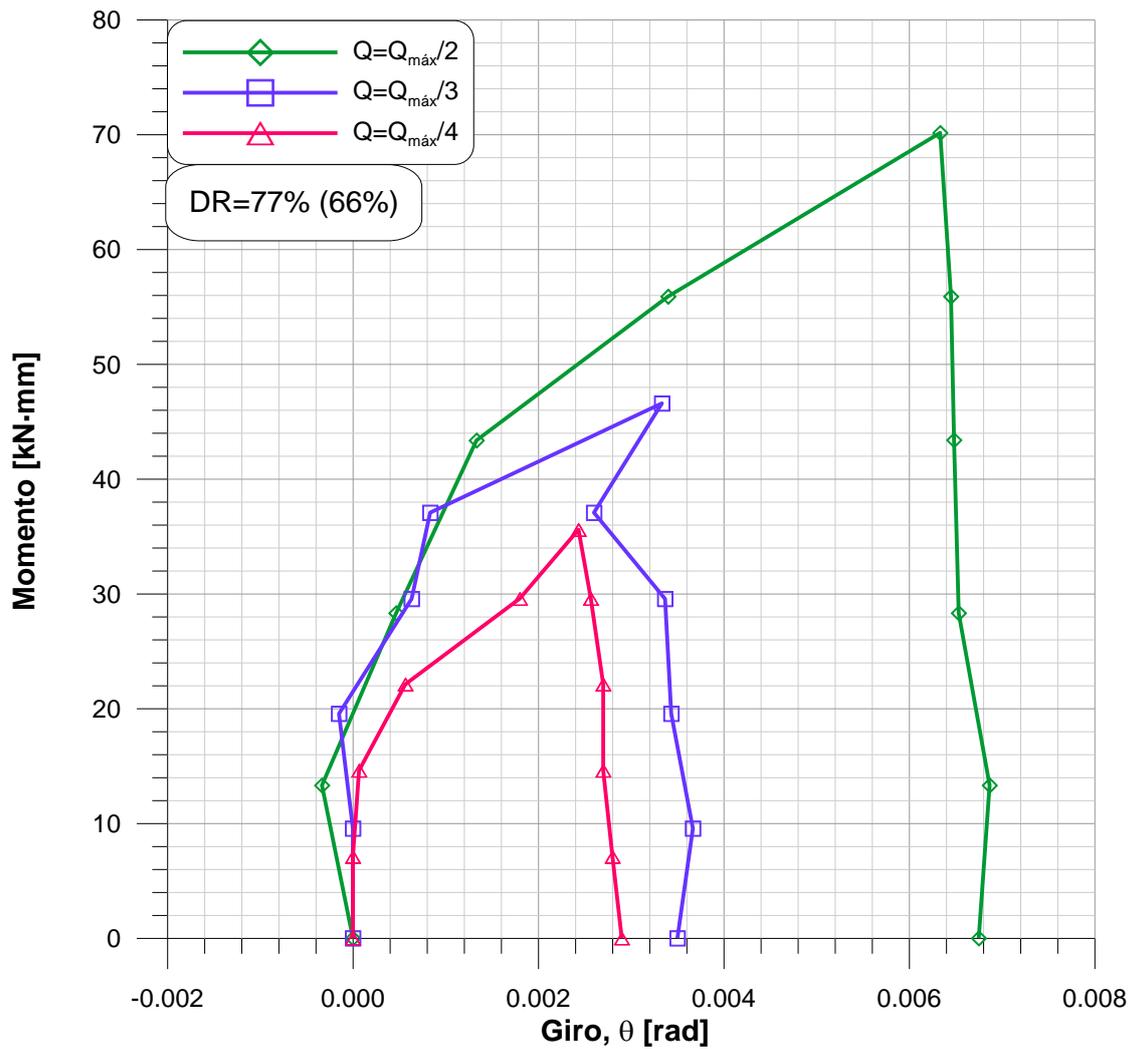


Figura 15 Giro de la placa rígida para el ensayos de carga vertical y momento en la muestra densa.

4.4 TERCERA ETAPA. APLICACIÓN DE MOMENTO HASTA UNA CONDICION INTERMEDIA.

4.4.1 ASENTAMIENTOS DE LA PLACA

En la Figura 16 y Figura 17 se entregan los asentamientos del borde más solicitado versus la presión de contacto de este borde para los ensayos realizados en las muestras de densidad media ($DR=50\%$) y densa ($DR=77\%$) para la Tercera Etapa, la cual consiste en aplicación de carga vertical centrada hasta cierto nivel, para luego, manteniendo la carga vertical constante, aplicar momento hasta $e=B/6$ y, finalmente, disminuir el momento hasta una condición de $e=B/12$. Este proceso se realizó para tres distintos niveles de carga vertical ($Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$).

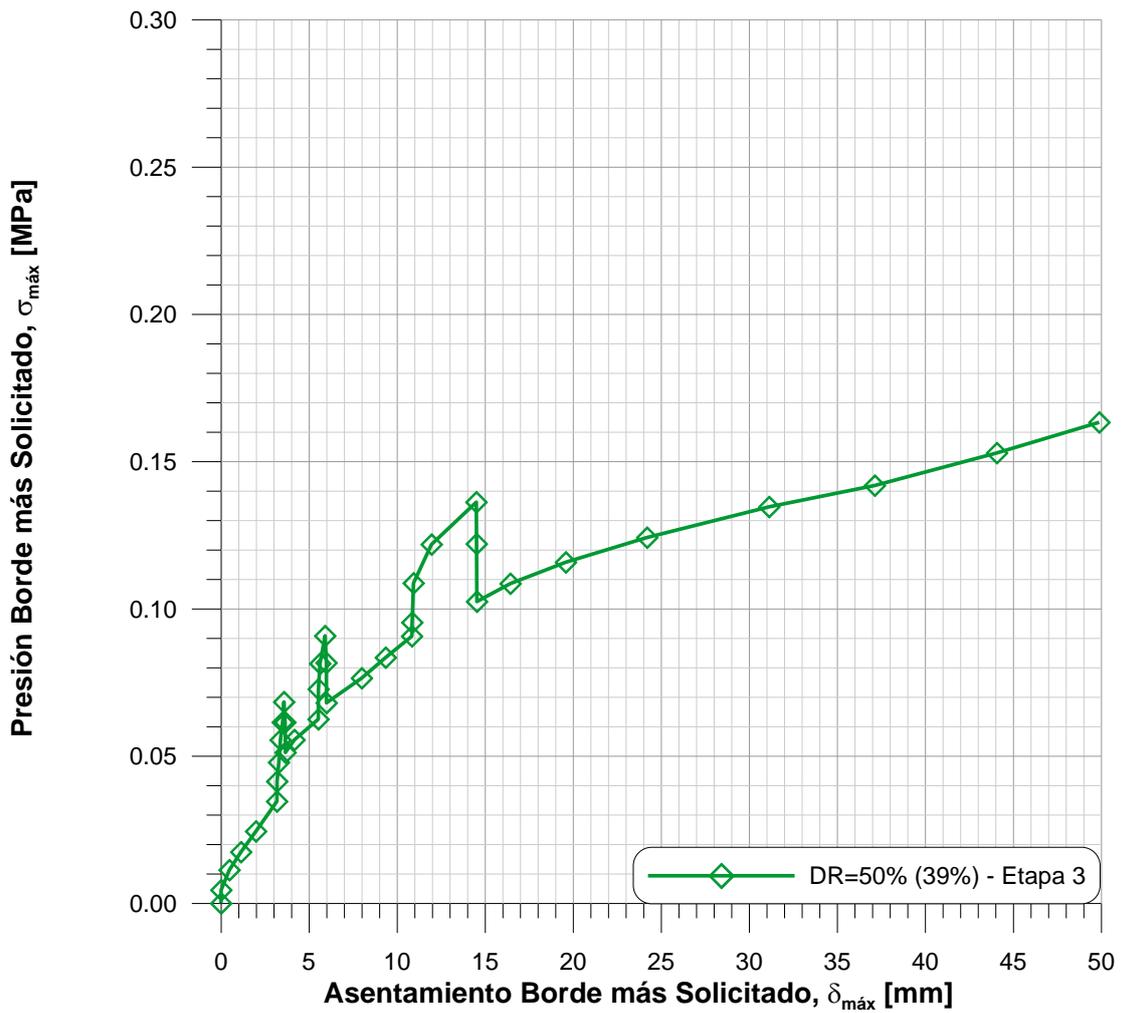


Figura 16 Asentamiento del borde más solicitado para los ensayos de aplicación de carga vertical centrada constante y momento hasta una condición intermedia para la muestra de densidad media. Entre paréntesis se indica la densidad promedio obtenida de los testigos.

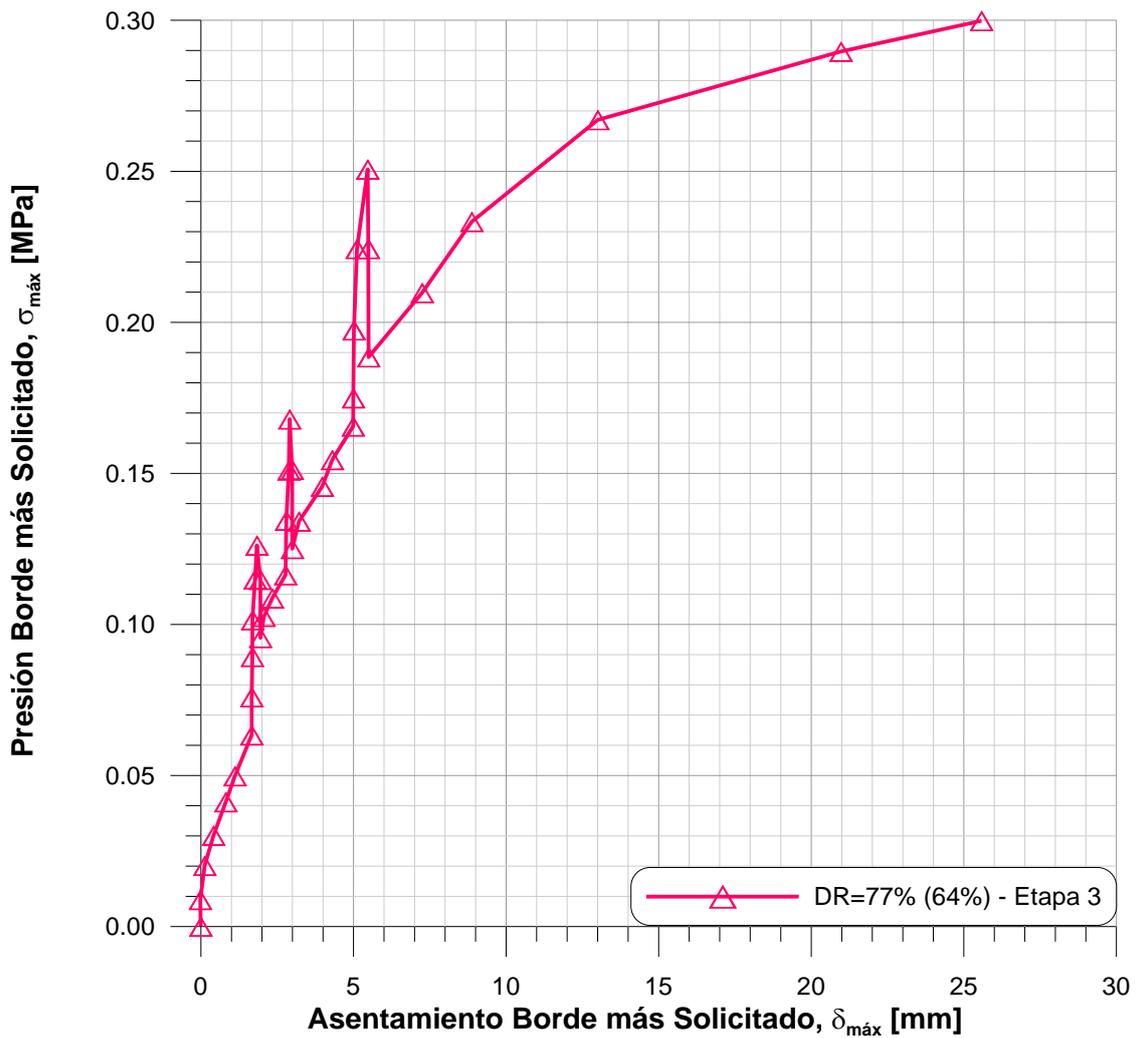


Figura 17 Asentamiento del borde más solicitado para los ensayos de aplicación de carga vertical centrada constante y momento hasta una condición intermedia para la muestra densa. Entre paréntesis se indica la densidad promedio obtenida de los testigos.

4.4.2 GIROS DE LA PLACA

En la Figura 18 y Figura 19 se muestran los ángulos de giro producidos por la aplicación de momento a la placa rígida, para las muestras de densidad media y densa, en el ensayo de aplicación de momento hasta una condición intermedia. Se consideran tres niveles de carga centrada constante, ($Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$), para posterior aplicación de momento.

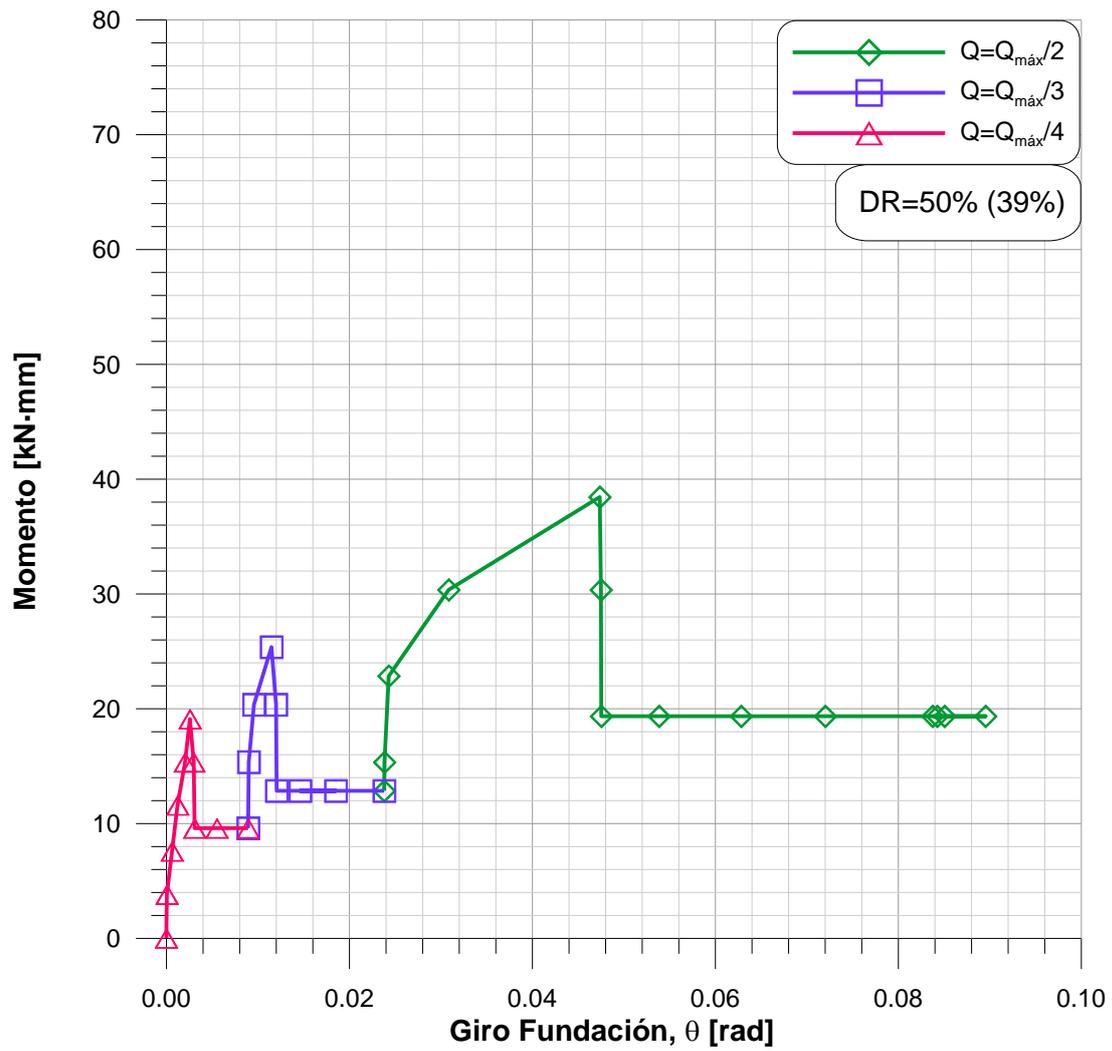


Figura 18 Giro de la placa rígida para el ensayos de aplicación de carga vertical centrada constante y momento hasta una condición intermedia para la muestra de densidad media.

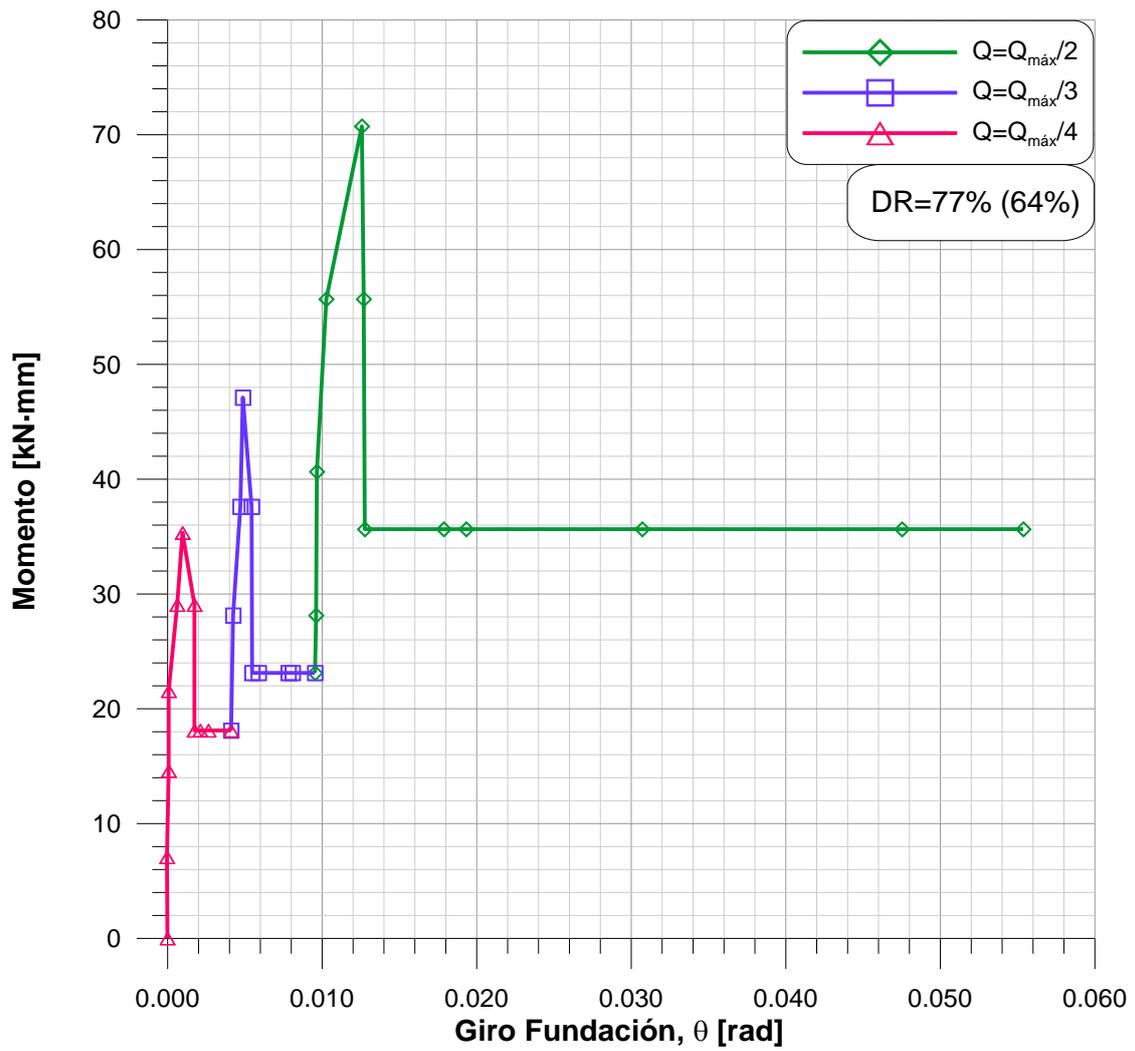


Figura 19 Giro de la placa rígida para el ensayos de aplicación de carga vertical centrada constante y momento hasta una condición intermedia para la muestra densa.

CAPITULO 5 DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 DISCUSIÓN

5.1.1 ASENTAMIENTOS PRODUCIDOS POR LA APLICACIÓN DE MOMENTO

En las Figura 20 y Figura 21 se grafican los asentamientos producidos por la aplicación de momento a partir del asentamiento producido por la aplicación de cada carga centrada (Segunda Etapa).

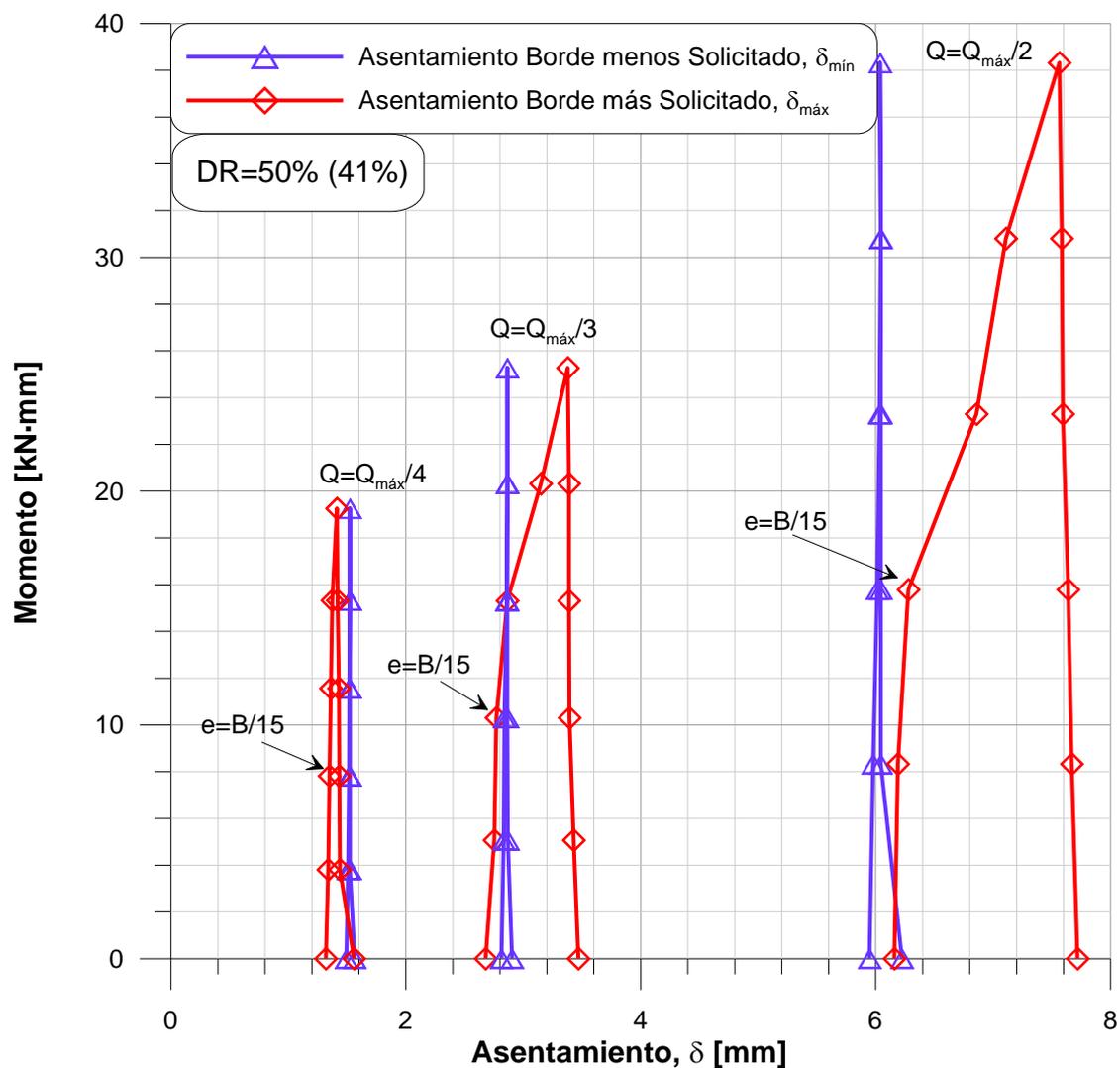


Figura 20 Asentamiento producido por la aplicación de momento por sobre el asentamiento de carga centrada (Segunda Etapa) para la muestra de densidad media para tres niveles de carga ($Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$).

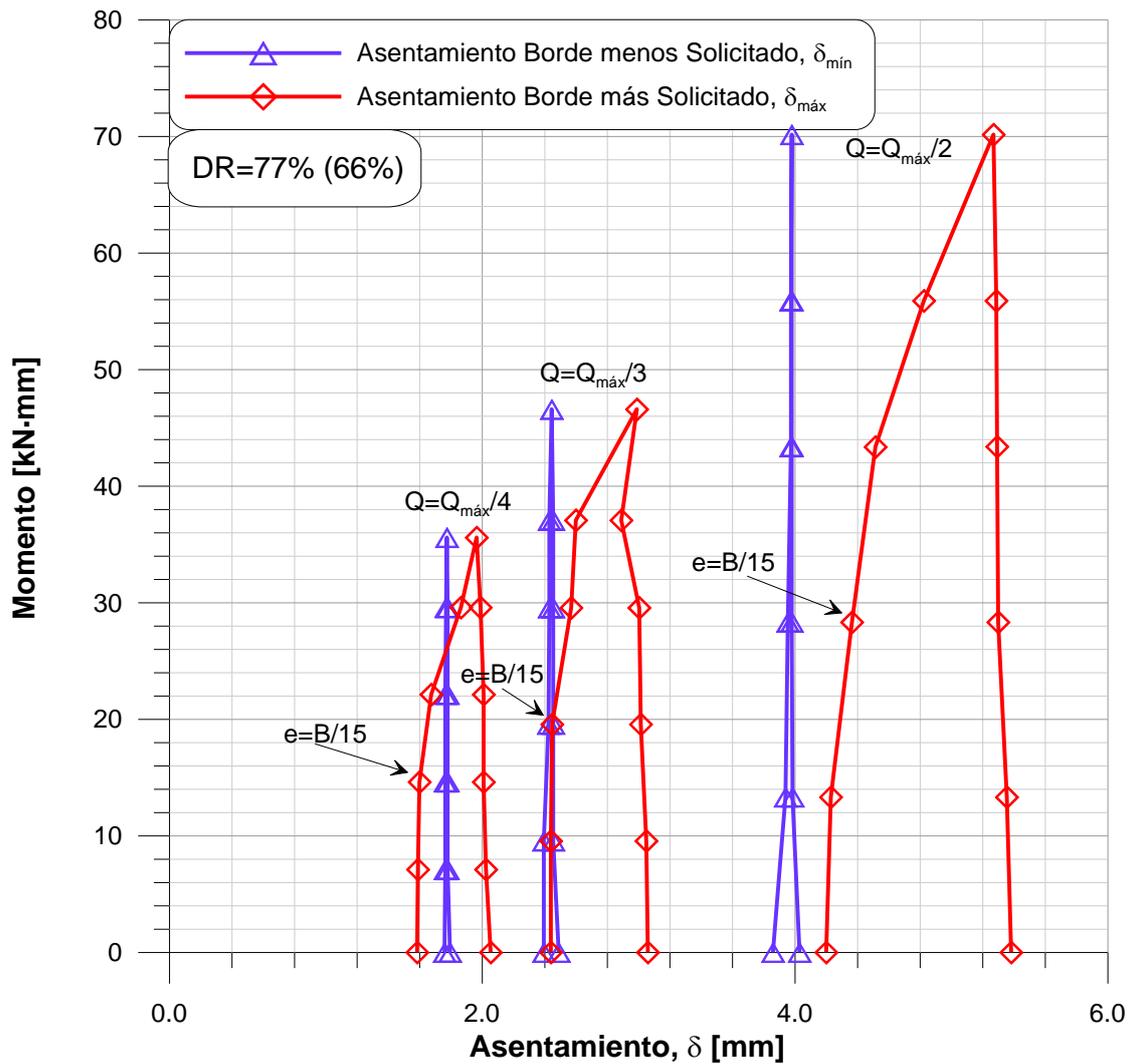


Figura 21 Asentamiento producido por la aplicación de momento por sobre el asentamiento de carga centrada (Segunda Etapa) para la muestra de densa para tres niveles de carga ($Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$).

Se puede apreciar en estos gráficos que el asentamiento del borde menos solicitado permanece vertical cuando se aplica momento, tanto para la muestra de densidad media como para la densa, es decir ese borde no sufre asentamientos para esta aplicación de carga. El giro por momento se produce por lo tanto en torno al borde menos solicitado, lo que confirma lo obtenido anteriormente por Mutoli. De acuerdo al estudio bibliográfico la placa debía girar en torno a su centro para esta condición de carga.

Otra observación de interés es el reducido a nulo asentamiento que sufre el borde más solicitado para una aplicación de momento que no supere una excentricidad $e = B / 15$. Más allá de este límite el borde más solicitado manifiesta asentamientos.

Sin embargo, el borde más solicitado en toda la etapa de descarga del momento muestra asentamientos muy reducidos a nulos, al igual que el borde menos solicitado.

En la Figura 22 y Figura 23 se muestran los asentamientos producidos por una sucesión de cargas sobre una misma muestra, que combina incrementos de carga vertical centrada y aplicación de momento por etapas, la que se ha denominado en este estudio condición intermedia (Tercera Etapa).

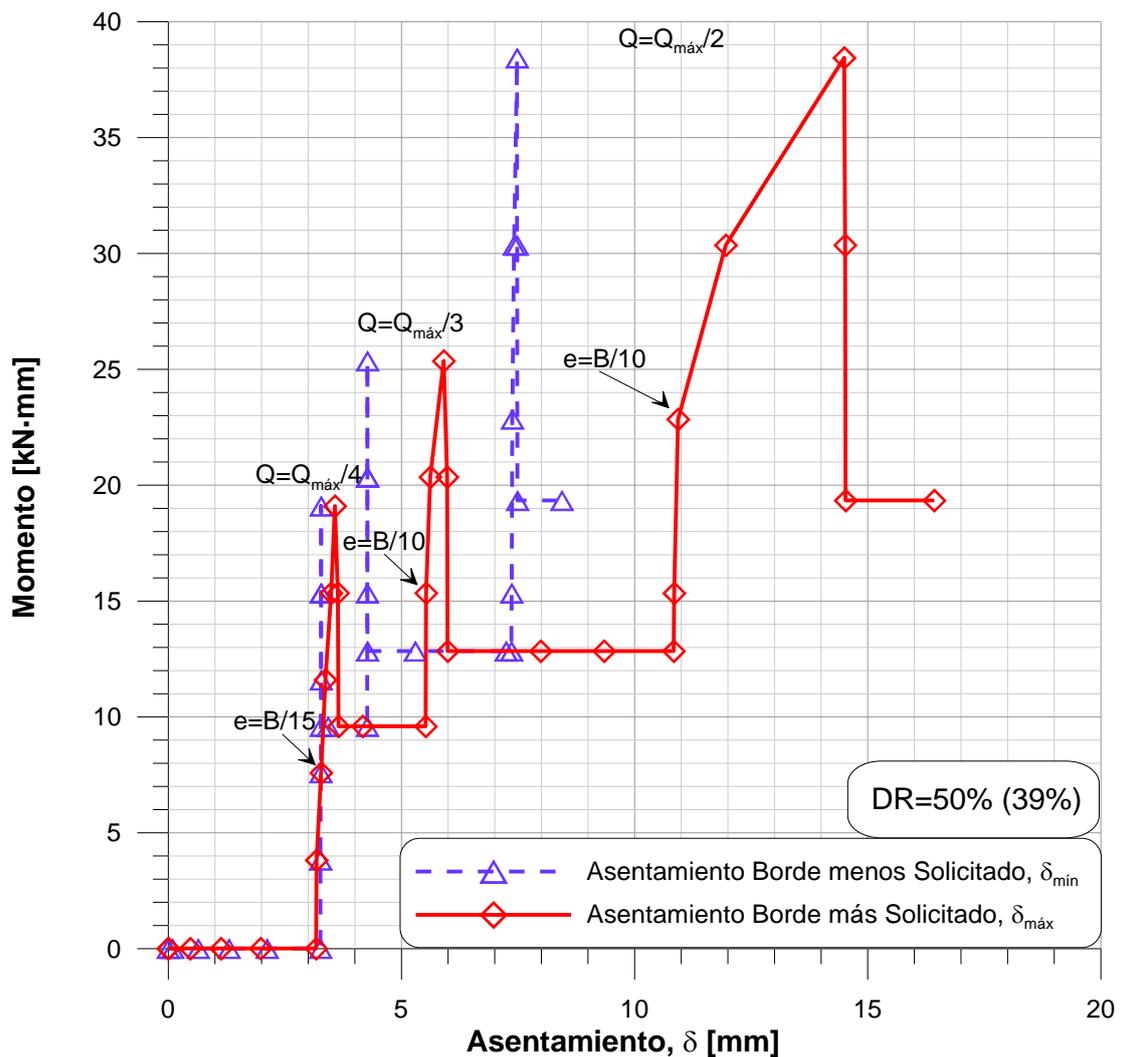


Figura 22 Asentamiento producido por la aplicación de momento por sobre el asentamiento de carga centrada en forma sucesiva (Tercera Etapa) para la muestra de densidad media para tres niveles de carga ($Q_{máx}/4$, $Q_{máx}/3$ y $Q_{máx}/2$).

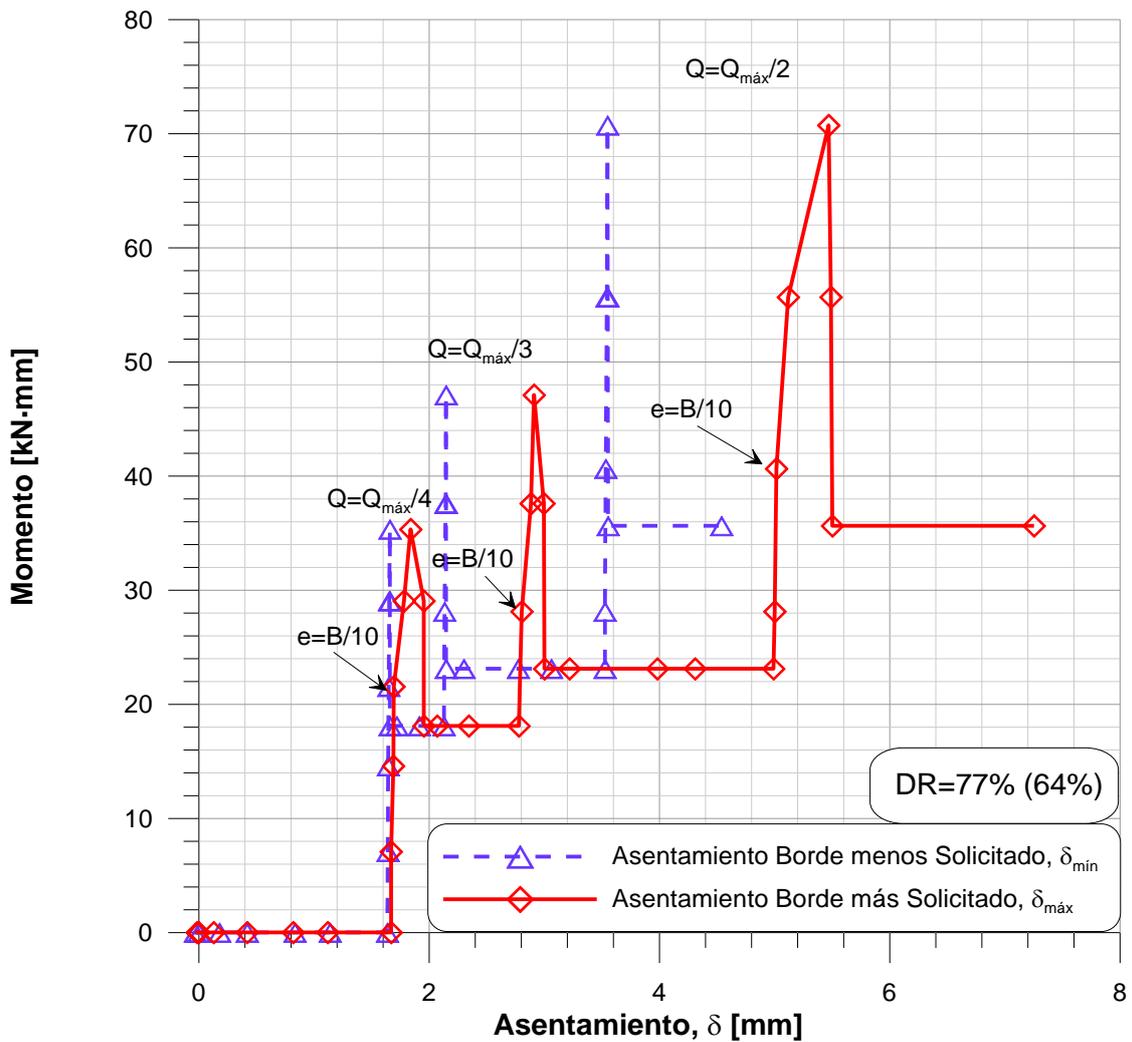


Figura 23 Asentamiento producido por la aplicación de momento por sobre el asentamiento de carga centrada en forma sucesiva (Tercera Etapa) para la muestra de densa para tres niveles de carga ($Q_{\max}/4$, $Q_{\max}/3$ y $Q_{\max}/2$).

Como en el caso de los ensayos de la segunda etapa se puede apreciar que tanto para la muestra de densidad media como para la densa los asentamientos en el borde menos solicitado son prácticamente despreciables.

En el caso del borde más solicitado el asentamiento es prácticamente despreciable antes de superar una excentricidad $e = B / 10$.

Para ambos bordes, es decir el más y el menos solicitado, los asentamientos en la etapa de descarga del momento permanecen cercanos a cero, indicando que no hay un incremento de los asentamientos, ni tampoco una recuperación del material bajo la placa.

Utilizando los gráficos del estudio anterior (Mutoli) de la Figura 24, se confirma la validez del esquema que se muestra a derecha para explicar el comportamiento de una placa rígida sometida a carga vertical y momento.

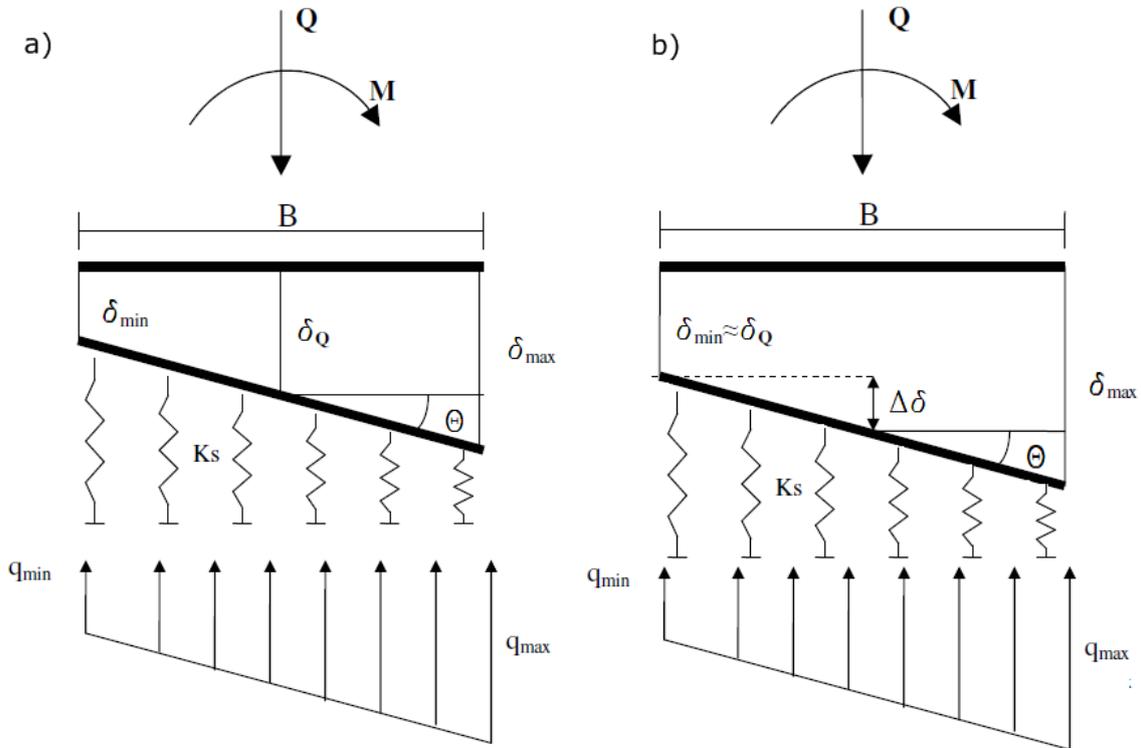


Figura 24 a) Esquema teórico y ampliamente aceptado del comportamiento de una placa rígida sometida a carga vertical y momento; b) Esquema del comportamiento de una placa rígida sometida a carga vertical y momento de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio anterior (Mutoli) y confirmados por el presente estudio.

Lo que diferencia estos dos casos graficados en la figura es que la placa, según los resultados del presente estudio, gira en torno al borde menos solicitado cuando se aplica momento para una carga vertical centrada constante, lo que contradice la teoría graficada a la izquierda que indica que el giro se produciría en torno al centro de la placa.

5.1.2 ENVOLVENTE PARA LA CONDICION $e = B / 6$

Uno de los objetivos principales de este estudio era mostrar que existe una envolvente única en términos de asentamientos, para cada densidad relativa, para los ensayos realizados sobre una placa rígida cuando, manteniendo constante la carga vertical centrada, se aplican incrementos sucesivos de momento limitados por la excentricidad $e = B / 6$.

Con el fin de verificar esta hipótesis se grafican en las Figuras Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28 la envolvente para los asentamientos del borde más solicitado en una condición de carga vertical centrada y momento tal que la excentricidad es igual a $B / 6$. Junto a ella se grafican la curva de carga vertical centrada y los asentamientos del borde más solicitado para carga vertical centrada y aplicación de incrementos de momento limitados por una excentricidad $e = B / 6$.

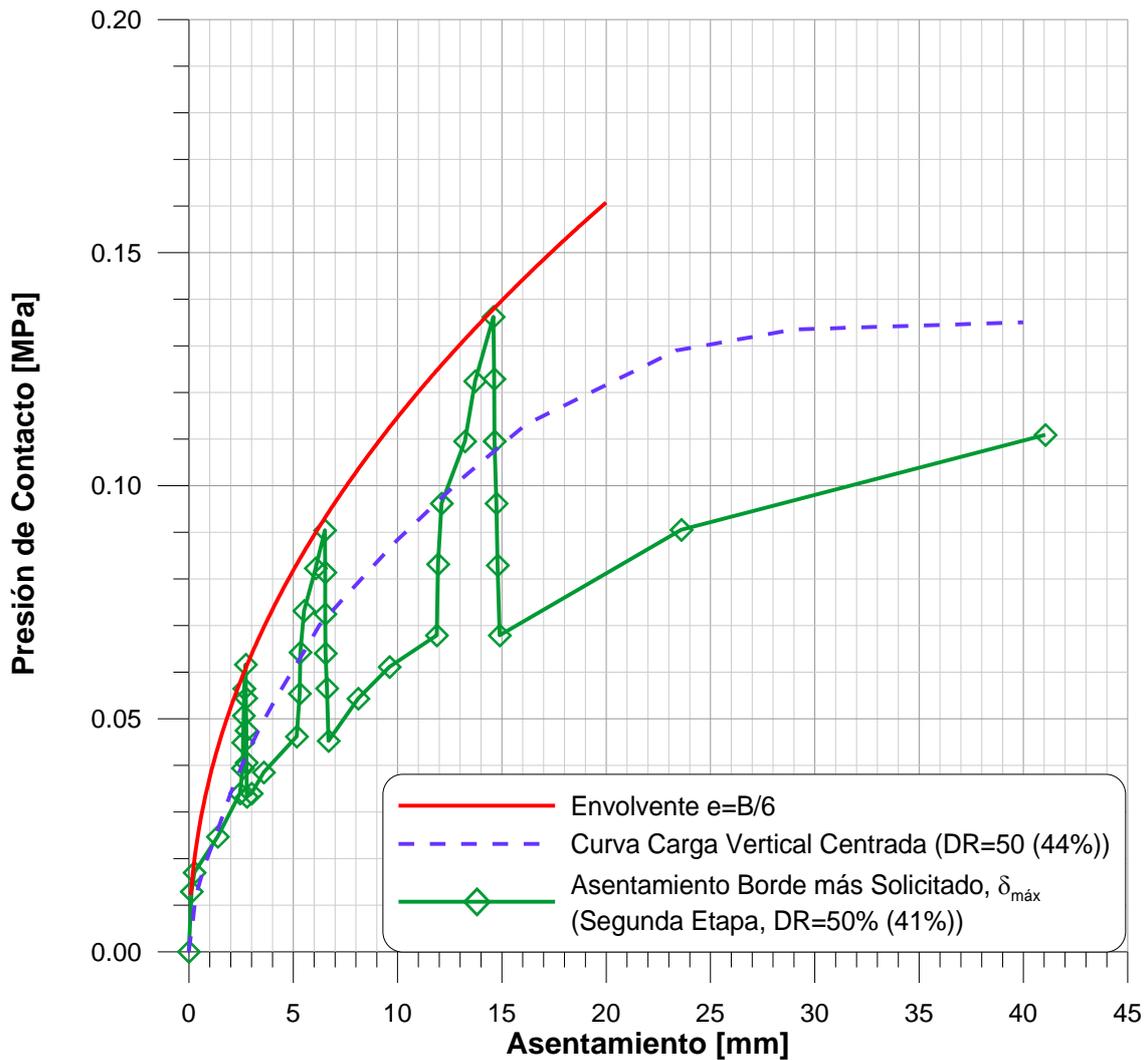


Figura 25 Resultados del ensayo de carga vertical centrada y momento para la muestra de densidad media. Se muestran también la envolvente estimada para $e=B/6$ y la curva de carga vertical centrada.

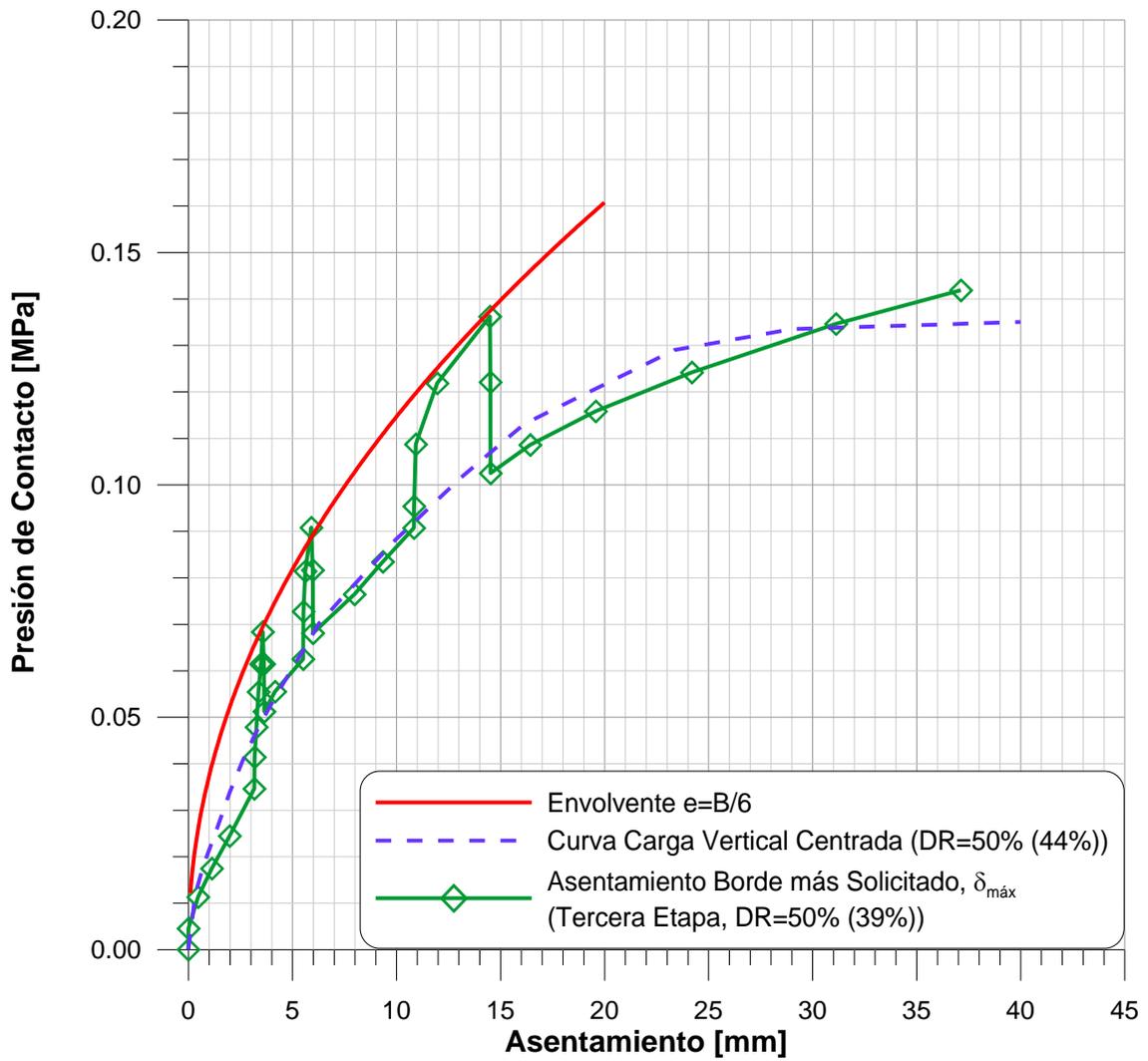


Figura 26 Resultados del ensayo de carga vertical centrada y aplicación de momento hasta una condición intermedia para la muestra de densidad media. Se muestran también la envolvente estimada para $e=B/6$ y la curva de carga vertical centrada.

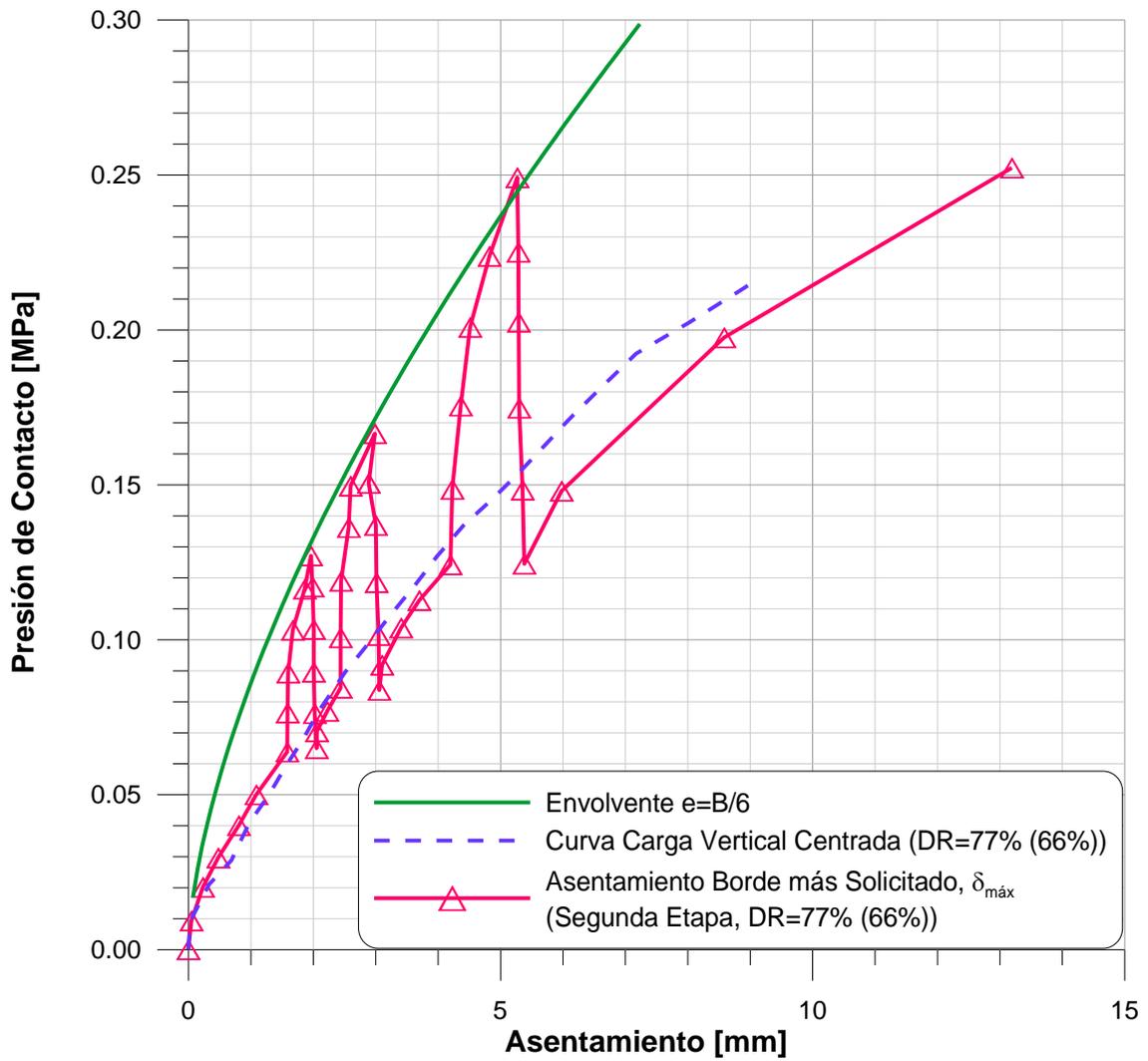


Figura 27 Resultados del ensayo de carga vertical centrada y momento para la muestra densa. Se muestran también la envolvente estimada para $e=B/6$ y la curva de carga vertical centrada.

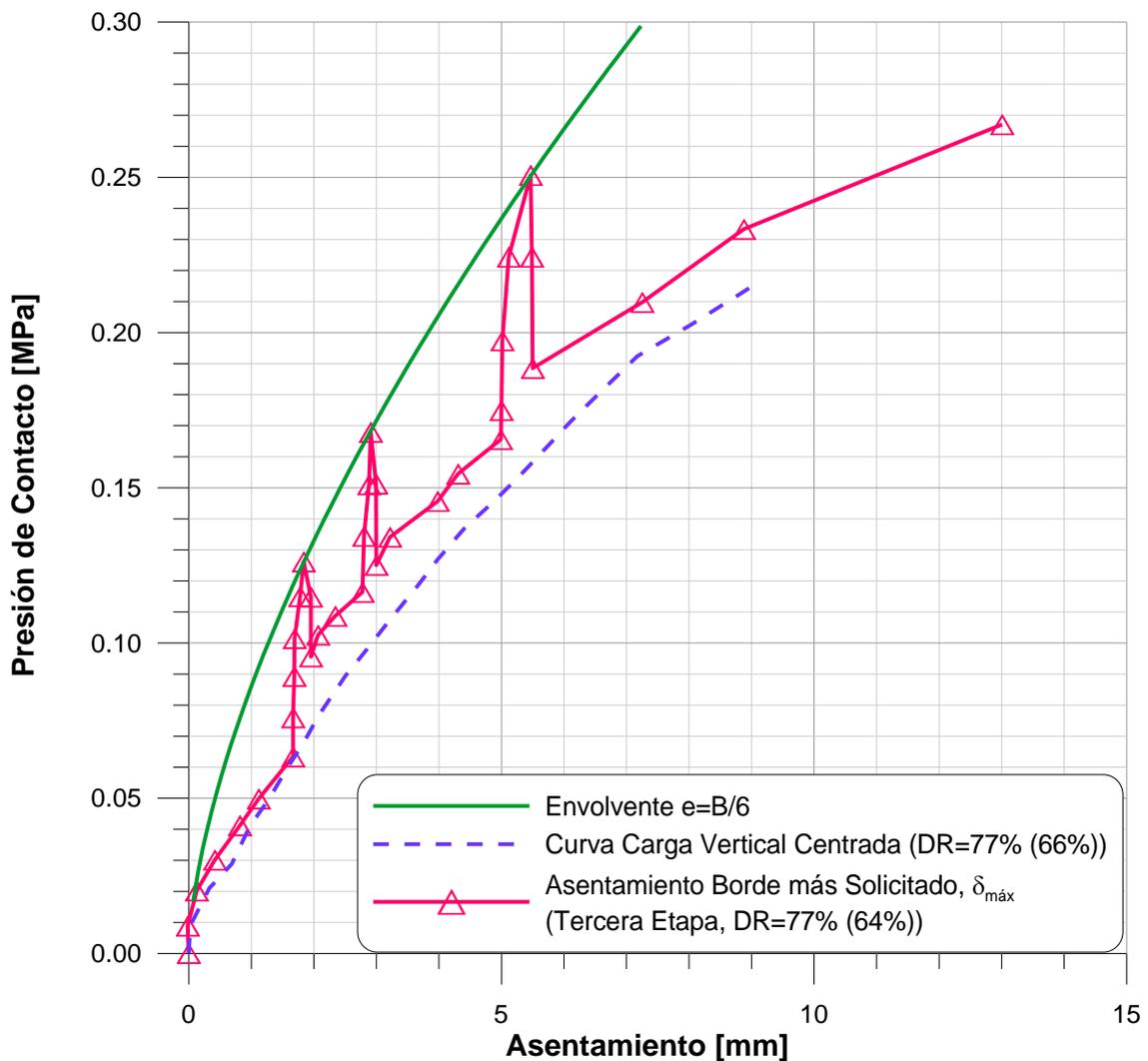


Figura 28 Resultados del ensayo de carga vertical centrada y aplicación de momento hasta una condición intermedia para la muestra densa. Se muestran también la envolvente estimada para $e=B/6$ y la curva de carga vertical centrada.

Observando las envolventes graficadas para cada densidad relativa y en cada etapa se puede corroborar que, para una misma densidad, no importando el historial de carga anterior se alcanzan los mismos asentamientos para una misma condición de carga vertical centrada y momento, la cual corresponde a una excentricidad $e = B / 6$. Esto quiere decir que existe una envolvente única para esta condición de carga.

Además se puede observar que, en general, una vez terminado el proceso de aplicación de momento, ya sea para la Segunda Etapa o la Tercera, la curva descrita por el asentamiento del borde más solicitado tiende a la curva de carga vertical centrada.

En el caso de los ensayos de la Tercera Etapa esto es esperable ya que el momento aplicado nunca es retirado completamente, por lo tanto, la excentricidad en estos casos tiende a cero a medida que aumenta la carga vertical.

Es necesario hacer notar la diferencia que existe entre la etapa de carga vertical centrada y la etapa de aplicación de momento. La primera consiste en un ensayo de deformación controlada en donde el vástago del cilindro hidráulico impone una deformación y el suelo responde con una carga resistente, por contraparte la aplicación de momento se realiza aplicando cargas discretas que mediante un brazo palanca ejercen un momento a la placa rígida, por lo que se trata de un ensayo de carga controlada en donde se impone un momento y el suelo responde con una deformación. De esta forma, es normal apreciar diferencias, como, por ejemplo, que las deformaciones producidas por la aplicación de momento se producen casi en su totalidad después de cierto instante, marcado en el análisis por una excentricidad entre $e = B / 10$ y $e = B / 15$.

Como se aprecia en la Figura 29, para el ensayo de la muestra densa (DR=77%) de la Segunda Etapa, tomado como ejemplo, la curva para una excentricidad igual a $B/10$ separa el espacio antes mencionado en un área en la cual prácticamente no hay deformaciones provocadas por la aplicación de momento y otra en que se producen la mayoría de las deformaciones. Esto implica, por supuesto, una diferencia significativa en los valores del módulo de reacción el suelo.

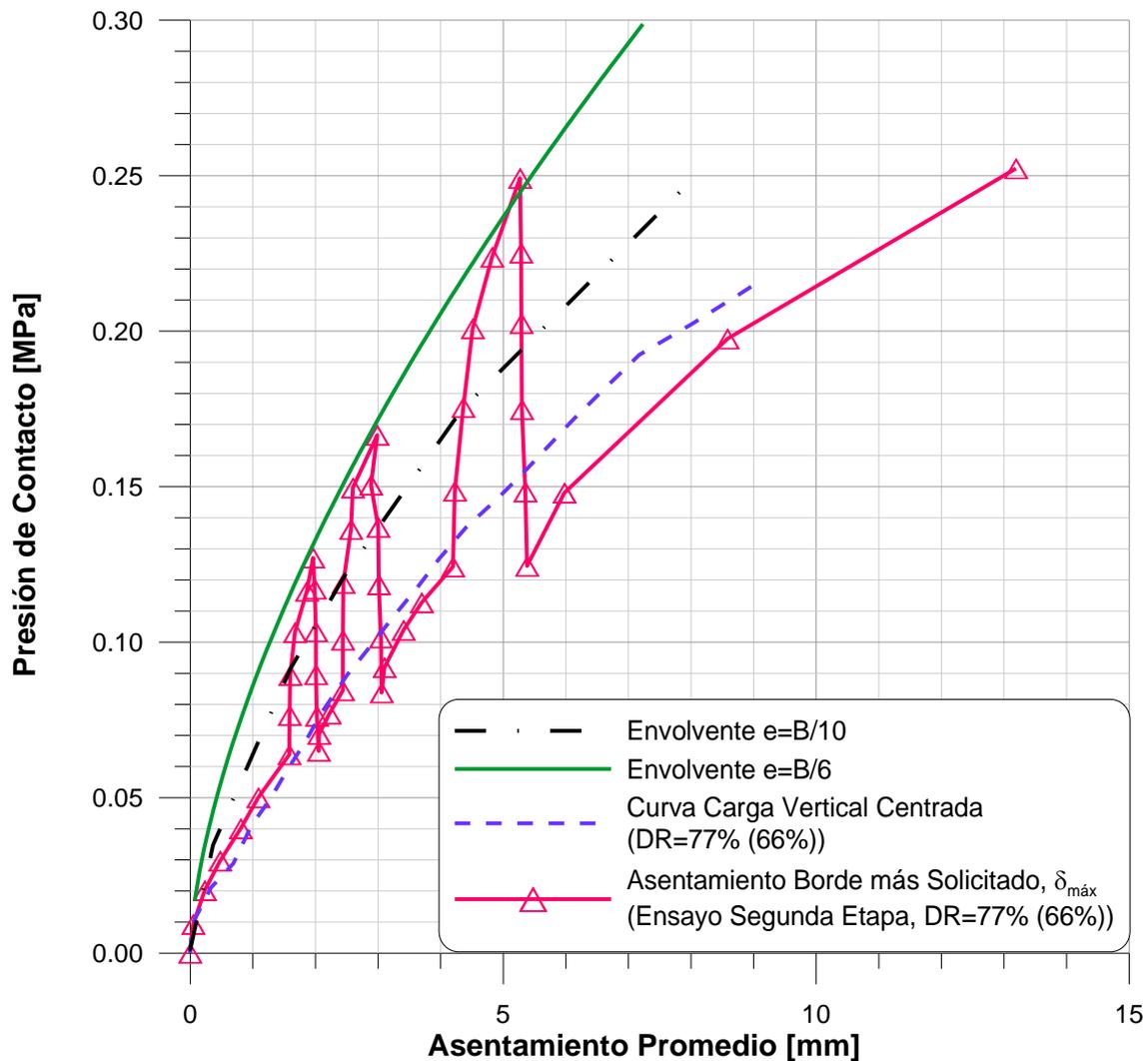


Figura 29 Envoltorio para $e = B / 10$ que separa el espacio comprendido entre la envoltorio para una excentricidad $e = B / 6$ y la curva de carga vertical centrada en un espacio con deformaciones reducidas o nulas y otro con la mayoría de las deformaciones producidas por momento en el borde más solicitado.

5.1.3 COEFICIENTES DE REACCION DEL SUELO

Los coeficientes de reacción del suelo se calcularon de acuerdo a lo propuesto en el estudio anterior, es decir, como la pendiente de la recta que une el origen de la aplicación de momento con el punto de la curva correspondiente a la presión de contacto, $2q^*$, alcanzada en el borde más solicitado de la placa al llegar a una excentricidad igual a $B/6$.

En la Tabla 2 se resumen los coeficientes de reacción del suelo calculados para las distintas etapas de este estudio para las muestras de densidad media y densa.

Tabla 2 Resumen de los coeficientes de reacción del suelo calculados para las distintas etapas del presente estudio para las muestras de densidad media y densa.

Muestra	Coeficientes de Reacción del Suelo, K_s [MPa/mm]						
	Primera Etapa (*)	Segunda Etapa			Tercera Etapa		
		$Q_{m\acute{a}x}/4$	$Q_{m\acute{a}x}/3$	$Q_{m\acute{a}x}/2$	$Q_{m\acute{a}x}/4$	$Q_{m\acute{a}x}/3$	$Q_{m\acute{a}x}/2$
Media	0.010	0.101	0.063	0.049	0.084	0.073	0.012
Densa	0.025	0.167	0.149	0.117	0.369	0.389	0.178

- Estos valores fueron calculados para una deformación admisible asumida de 10 mm

Se puede apreciar que el coeficiente de reacción del suelo para el borde más solicitado disminuye a medida que la aplicación del momento se realiza para una carga vertical constante mayor.

En cuanto a las diferencias existentes entre el modulo de reacción del suelo para carga vertical centrada y el calculado para el borde más solicitado, en la Segunda y Tercera Etapa de este estudio, se puede decir que este ultimo puede ser hasta 10 veces mayor que el valor obtenido para carga vertical centrada.

5.1.4 DENSIDAD RELATIVA DE LA MUESTRA

Se puede observar que las densidades estimadas para el nuevo método no coinciden exactamente con las estimadas en el estudio anterior.

En el caso de los ensayos realizados en muestras densas se aprecia que la carga máxima de falla no es alcanzada, esto permite pensar que estas muestras se encuentran a una mayor densidad relativa que las ensayadas en el estudio anterior.

Por otro lado, los ensayos realizados en muestras de densidad media alcanzan valores muy similares a las cargas máximas verticales del estudio de Mutoli, pero los asentamientos resultan mayores, lo que permite pensar que estas muestras se encuentran a una menor densidad relativa que las ensayadas en el estudio anterior.

Sin embargo, estas diferencias son mínimas por lo que no representan un impedimento a la hora de la discusión o el análisis de resultados, como así tampoco para las conclusiones.

5.2 CONCLUSIONES

En base al análisis de los resultados obtenidos y la recopilación bibliográfica de antecedentes se puede concluir lo siguiente:

1. Este estudio confirma que cuando se aplica una carga vertical centrada sobre una placa rígida seguida de un momento, pero manteniendo la carga vertical constante, la placa no gira en torno al centro como indican la teoría y la bibliografía existentes, sino que en torno al borde menos solicitado.
2. Los ensayos realizados muestran que cuando se aplica momento después de aplicar una carga vertical centrada, los asentamientos de la placa – tanto en el borde más solicitado como en el menos solicitado – son muy reducidos a nulos en la primera etapa de aplicación de momento limitada por una excentricidad entre $e = B / 10$ y $e = B / 15$.
3. Los resultados de los ensayos del presente estudio confirman la existencia de una envolvente única en términos de asentamientos para cada densidad relativa, cuando la placa es sometida a distintas condiciones de carga, que incluyen incrementos sucesivos de carga vertical centrada y de momentos, estos limitados por excentricidades $e = B / 6$.
4. La existencia de envolventes únicas para cada caso entrega las bases que permitirán considerar en el futuro del diseño de fundaciones una superposición de solicitaciones asociada a asentamientos que no superarán los valores de la envolvente siempre que se respete la condición de $e < B / 6$.
5. Los coeficientes de balasto calculados para el borde más solicitado, en el caso de carga vertical centrada constante e incrementos de momento limitado por una excentricidad $e = B / 6$, alcanzan valores superiores a los que se obtienen para carga vertical centrada. Estos valores pueden llegar incluso a ser 10 veces mayores. Sin embargo, estos valores dependen del punto de la curva de carga vertical centrada en que se aplique el momento. A mayor carga vertical centrada constante menor es el coeficiente de reacción del suelo para el borde más solicitado.

5.3 TRABAJO FUTURO

El estudio de solicitaciones dinámicas, tanto de cargas como momentos, no fue cubierto por este estudio ni el anterior por lo que se propone que a futuro se realicen ensayos que permitan modelar el comportamiento de las fundaciones bajo este tipo de solicitaciones.

El nuevo equipo instalado, que consiste en un cilindro hidráulico de doble efecto de 10 toneladas de capacidad y 300 milímetros de carrera, permite realizar ensayos de carga y descarga. Por lo tanto, se propone realizar ensayos de este tipo, con lo cual será posible calcular y comparar los módulos de reacción del suelo entre estas dos etapas.

El método de depositación puede ser mejorado, para esto se proponen los siguientes cambios:

- Cambiar el diseño de la caja superior contenedora de la arena, por una caja con forma cónica en la base que impida la acumulación de la arena en ella, mejorando así la eficiencia.
- Aumentar el área perforada del rociador, aumentando así la velocidad de llenado de la caja. Esto puede materializarse aumentando el área de la tapa perforada o duplicando el sistema ya existente. En ninguno de los casos anteriores cambiaría la densidad relativa depositada.

La medición de la densidad relativa real de la muestra es importante para comprobar y corroborar los resultados obtenidos. Sin embargo, este problema no ha sido resuelto hasta este estudio. Para resolver este problema se propone la compra de un dinamómetro, dada la utilidad en este estudio como en otros experimentos que se puedan realizar en el laboratorio.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

1. **Mutoli Lopich, Darío**, 2007. "Estudio experimental de la reacción de un suelo arenoso ante una placa rígida solicitada por carga vertical y momento", Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
2. **Terzaghi, K.**, 1967. "Soil Mechanics in Engineering Practice", *John Wiley and Sons*, 2da Edición, pp 216-490.
3. **Terzaghi, K.**, 1955. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, "Geotechnique", Vol 5, N°4, pp 297-326.
4. **Bowles, J.E.**, 1996. "Foundations Analysis and Design", Mc-Graw Hill, 5th Edition.
5. **Parry, R. H. G.**, 1978. Estimating Foundation Settlements in Sand from Plate Bearing Tests, "Geotechnique, Vol. 28, N°.1, pp. 107-118.
6. **Georgiadis, M. and Butterfield, R.**, 1988. Displacements of Footings on Sand under Eccentric and Inclined Loads, "Canadian Geotechnical Journal", Vol. 25, pp. 199-211.
7. **Montrasio, L. and Nova, R.**, 1997, Settlement of Shallow Foundations on Sand: Geometrical Effects, "Geotechnique", Vol. 47, N° 1, pp. 49-60.
8. **Smith, J. P.**, 2004. "Wall-Frame Structures With Vulnerable Foundations", Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University.
9. **Miura, S., and Toki, S.** A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation strength properties of sand. *Soils and Found.*, 1982;22(1), 61-77.
10. **Vaid, Y.P., and Negusse, D.** Relative density of air and water pluviated sand. *Soils and Found.*, 1984b ;4(2), 101-105
11. **Vaid, Y.P., and Negusse, D.** Preparation of reconstituted sand specimens. *Adv. Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, 1988;405-417
12. **Rad, N.S., and Tumay, M.T.** Factors affecting sand specimen preparation by raining. *ASTM Geotech. Testing J.*, 1987;10(1), 31-57.
13. **Feng TW, Cheng KH, Su YT, Shi YC.** Laboratory investigation of efficiency of conical-based pounders for dynamic compaction. *Geotechnique* 2000;50(6):667-74.