ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR EN PAVIMENTOS

JULIAN DAVID HURTADO MELO

Asesor:
Ph.D. BERNARDO CAICEDO HORMAZA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
JUNIO 2013

DEDICATORIA

A mi familia, por el apoyo brindado.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Bernardo Caicedo Hormaza, por la oportunidad brindada para desarrollar esta tesis de investigación

A Julieth Monroy, por su tiempo y acompañamiento en el montaje del equipo para el trabajo experimental.

A mi familia, por el apoyo incondicional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN…… 1
OBJETIVO GENERAL…… 2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS…… 2

1. MARCO TEÓRICO…… 3
1.1. TEORÍA DE HERTZ…… 3
1.2. EMISIONES ACÚSTICAS…… 4

2. TRABAJO EXPERIMENTAL……6
2.1. MATERIALES…… 6
2.2. EQUIPO UTILIZADO…… 7
2.2.1. Prototipo de dispositivo…… 8
2.2.2. Dispositivo definitivo ……12
2.2.3. Montaje final…… 12
2.3. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS…… 16
2.4. PRUEBAS REALIZADAS…… 18

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS…….. 20

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…… 28

5. REFERENCIAS…….. 29

ANEXOS…… 30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del dispositivo a construir……7
Figura 2. Modelado 3D del dispositivo a construir……8
Figura 3. Lecturas sensores acústicos 1 y 2……27

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Carga última según diámetro…… 21
Gráfica 2. Deformación según diámetro……..22
Gráfica 3. Carga vs. Deformación……..22
Gráfica 4. Influencia del contenido de agua en las partículas…….. 23
Gráfica 5. Comparación entre resultados laboratorio y teoría de Hertz…… 24
Gráfica 6. Ensayo cíclico…….…….. 25
Gráfica 7. Carga y Conteos de Emisión Acústica en el tiempo…….. 26

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados obtenidos para la resistencia de 20Mpa bajo carga monotónica…… 20
Tabla 2. Resultados obtenidos para las resistencia de 12MPa y 28Mpa bajo carga dinámica……24

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Esferas de mortero utilizadas…… 6
Fotografía 2. Ejes lineales…….. 8
Fotografía 3. Bujes IR……..9
Fotografía 4. Discos de acrílico…… 9
Fotografía 5. Base metálica…… 10
Fotografía 6. Vista en planta y lateral del prototipo del dispositivo …….. 11
Fotografía 7. Prototipo del dispositivo ……..11
Fotografía 8. Dispositivo definitivo…… 12
Fotografía 9. Equipo utilizado……13
Fotografía 10. Celda de carga……13
Fotografía 11. Deformímetro…….. 14
Fotografía 12. Preamplificadores de señales acústicas y sensores instalados 15
Fotografía 13. Detalle del montaje……16
Fotografía 14. Falla típica de las esferas bajo carga normal. ……..27

LISTA DE ANEXOS

Resultados esferas de 20MPa y 25mm

Esf-R2-25mm-S-2013-06-11

Esf-R2-25mm-H-2013-06-11

Esf-R2-25mm-H-2013-06-11

Resultados esferas de 20MPa y 20mm

Esf-R2-20mm-S-2013-06-14

Esf-R2-20mm-H-2013-06-14

Esf-R2-20mm-H-2013-06-14

Resultados esferas de 20MPa y 15mm

Esf-R2-15mm-S-2013-06-14

Esf-R2-15mm-H-2013-06-14

Resultados esferas de 20MPa y 25mm

Esf-R3-25mm-S-2013-06-15

Resultados esferas de 12MPa y 25mm

Esf-R1-25mm-S-2013-06-17

Esf-R1-25mm-S-2013-06-17

INTRODUCCIÓN

Los materiales granulares que hacen parte de estructuras geotécnicas como en pavimentos flexibles, experimentan abrasión y fracturamiento como resultados de cargas estáticas y dinámicas aplicadas durante los procesos de compactación en la construcción o durante su operación, lo que altera las características físicas de las partículas y las capas en conjunto deteriorándose hasta llegar al fin de su vida útil.

El objeto de la presente investigación es estudiar el comportamiento de materiales granulares utilizados en las estructuras de pavimento, para lo cual se analiza el comportamiento de partículas esféricas bajo cargas monotónicas y dinámicas. El componente de laboratorio de este estudio involucra esferas de mortero saturadas y no saturadas de diferentes diámetros y resistencias. Las esferas son ensayadas a la compresión bajo cargas a compresión monotónicas o dinámicas registrando la carga en el tiempo, la deformación y la emisión acústica.

Las emisiones acústicas son utilizadas ampliamente en el estudio de materiales, y se ha utilizado en esta investigación para evaluar el comportamiento de las partículas esféricas bajo compresión para conocer la respuesta que pueden tener los materiales percibiendo las ondas sonoras que transmiten, encontrando una relación directa entre la micro respuesta sonora y su degradación.

Se busca mediante la modelación física comparar los resultados obtenidos con los modelos numéricos que se han formulado para simular el fracturamiento de materiales granulares.

Los resultados de este estudio proporcionan nuevos datos experimentales que pueden ser implementada en los modelos para evaluar el fracturamiento de materiales granulares en una forma más realista.

OBJETIVO GENERAL

Trabajo experimental de partículas esféricas a la compresión para el estudio del fracturamiento de materiales granulares utilizados en pavimentos en conjunto con la técnica de emisión acústica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y elaborar un dispositivo que permita realizar ensayos a la compresión de esferas de hasta 25mm controlando la deformación vertical y monitoreando con sensores de emisión acústica.

- Obtener curvas de esfuerzo-deformación para los diferentes diámetros y resistencias de esferas de mortero sometidas bajo cargas continuas y cíclicas.

- Comparar los resultados obtenidos con la teoría de Hertz de mecánica de contacto.

- Obtener una relación entre los estados de esfuerzos producidos en las esferas de mortero bajo compresión y las emisiones acústicas.

- Contribuir con datos experimentales que puedan ser implementados en modelos para evaluar el fracturamiento de materiales granulares en una forma más realista.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. TEORÍA DE HERTZ

La teoría de Hertz expone los contactos elásticos de dos partículas esféricas en la dirección normal. Considera dos esferas i y j en contacto, con radios $_{(i)}R$ y $_{(j)}R$ respectivamente y sujetadas por una fuerza de contacto normal P. Las propiedades del material de cada esfera se denotan por $_{(i)}E$ para el Módulo de Young y $_{(i)}\nu$ para la relación de Poisson e igualmente para la esfera j.

En el presente trabajo se utilizaran siempre dos esferas de propiedades iguales, por lo tanto se tiene que:

$$_{(i)}R = {}_{(j)}R = R$$
$$_{(i)}E = {}_{(j)}E = E$$
$$_{(i)}\nu = {}_{(j)}\nu = \nu$$

De acuerdo a lo anterior, la ecuación para hallar el Módulo de Young equivalente por la teoría de Hertz es:

$$E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}$$

La ecuación para hallar el radio de curvatura relativo de contacto es:

$$R^* = \frac{1}{2}R$$

El radio del área de contacto es:

$$a = \left[\frac{3PR(1-v^2)}{4E}\right]^{\frac{1}{3}}$$

El desplazamiento $_{(ij)}\alpha$ es igual a:

$$_{(ij)}\alpha = \frac{a^2}{R} = \left[\frac{3PR(1-v^2)^2}{16RE^2}\right]^{\frac{1}{3}}$$

1.2. EMISIONES ACÚSTICAS

El sonido es un fenómeno vibratorio transmitido en forma de ondas, para que se genere un sonido es necesario que vibre alguna fuente.

La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de diversos medios elásticos, entre los más comunes se encuentran el aire y el agua. Cuando las vibraciones se producen en la misma dirección en la que se propaga el sonido, se trata de una onda longitudinal.

La onda sonora es la perturbación en el aire de las moléculas que son excitadas por un elemento vibratorio cercano a estas y a su vez excitan (vibración) a las moléculas más próximas y así sucesivamente, lo que se llamaría la propagación del sonido.

La física del sonido es estudiada por la acústica, que trata tanto de la propagación de las ondas sonoras en los diferentes tipos de medios continuos como la interacción de estas ondas sonoras con los cuerpos físicos.

La acústica tiene una terminología asociada que sirve para describir de manera física las características del sonido. Algunos conceptos básicos son:

• Emisiones acústicas (E.A.): ondas generadas por la descarga rápida de energía dentro de un material y que se desplazan a través de un medio.

• Señal: percepción eléctrica por parte de un transductor y que es llevada a través de un equipo especializado.

• Amplitud: expresada en Decibeles (dB), indica la cantidad de energía que contiene una señal sonora.

• Frecuencia: expresada en Hertz (Hz), es el número de ciclos que ocurren en una unidad de tiempo

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

Para aplicar las teorías desarrolladas en torno al fracturamiento de materiales granulares se realizó un montaje que permitiera evaluar el comportamiento de partículas esféricas bajo cargas de compresión. Para tal fin, se ensayaron partículas esféricas artificiales de modo que tuvieran propiedades controladas (módulo de elasticidad y relación de Poisson). Se utilizaron esferas de mortero de diferente tamaño, resistencia y humedad, para después ensayarlas a compresión bajo cargas monotónicas y dinámicas, registrando el esfuerzo-deformación, la resistencia y la emisión acústica hasta la falla..

2.1. MATERIALES

En la modelación se requiere analizar el comportamiento de areniscas, material granular utilizado en la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá, por lo tanto se utilizaron esferas de mortero que habían sido fabricadas anteriormente y se encontraban en el inventario del laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad. Dichas esferas tenían diámetros de 15 mm, 20 mm y 25 mm, y para cada diámetro se tenían resistencias nominales de 12 MPa, 20MPa y 28 MPa.

Fotografía 1. Esferas de mortero utilizadas

2.2. EQUIPO UTILIZADO

Para la realización de los ensayos de laboratorio se ideó un dispositivo que permitiera el ensayo a compresión normal de las esferas de mortero de diámetro variable (máximo de 25 mm), de modo que se restringiera el desplazamiento horizontal y/o giro de las esferas para que las mediciones de la deformación vertical entre los ejes horizontales de las dos esferas fuera absoluto.

A continuación se presenta el esquema del dispositivo a construir para la acomodación de las esferas, al cual se le adicionarían posteriormente los sensores de emisión acústica y deformación:

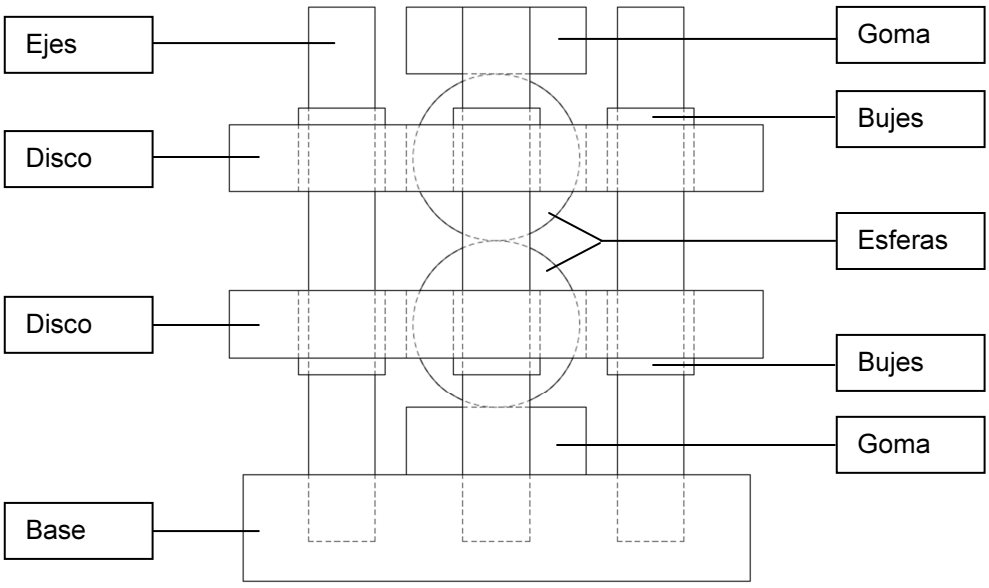


Figura 1. Esquema del dispositivo a construir

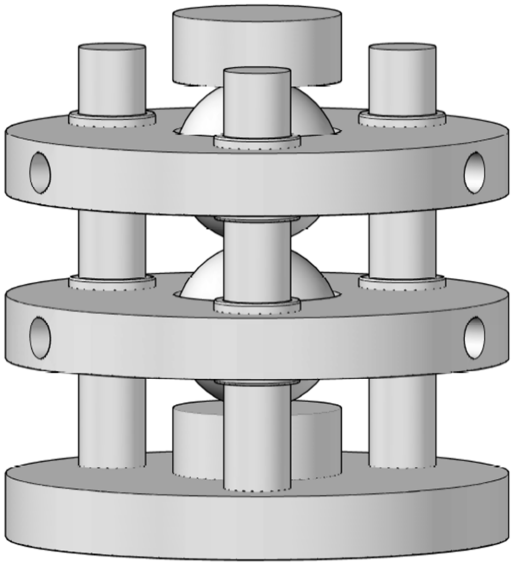


Figura 2. Modelado 3D del dispositivo a construir

2.2.1. Prototipo de dispositivo

Para la construcción del dispositivo se utilizaron los siguientes materiales:

- Tres (3) Ejes lineales de acero de 10 mm de diámetro y 80 mm de largo, su función es servir de guía para el desplazamiento vertical.

Fotografía 2. Ejes lineales

- Seis (6) Bujes IR (Inner Ring) de acero de 10x13x12,5 mm, su función es permitir el desplazamiento vertical en los ejes de forma suave.

Fotografía 3. Bujes IR

- Dos (2) discos de acrílico de 80 mm de diámetro y 10 mm de espesor, su función principal es servir como punto de apoyo para centrar las esferas en el montaje, sirviendo también como planos horizontales para la medición de la deformación vertical.

Fotografía 4. Discos de acrílico

- Un (1) disco de acero de 76 mm de diámetro y 15 mm de espesor, su función es servir de base para el emplazamiento de los ejes lineales.

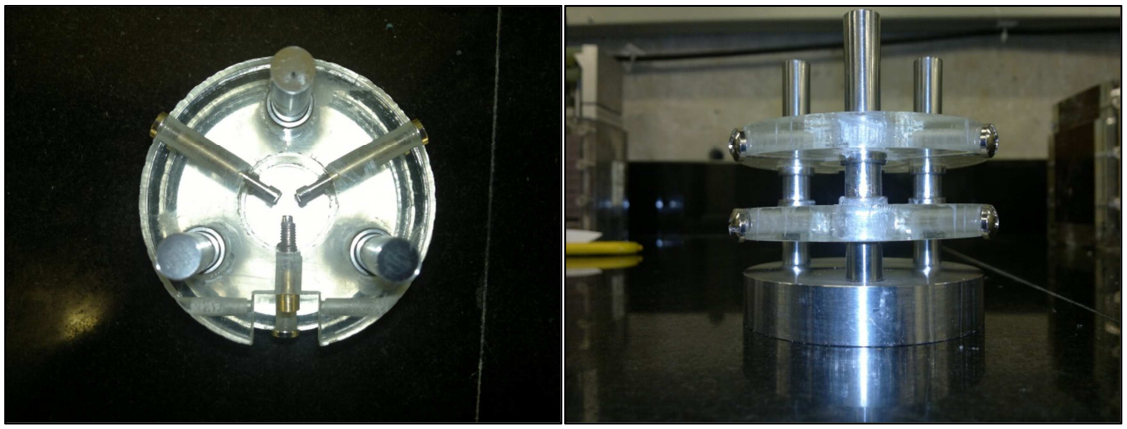
Fotografía 5. Base metálica

- Seis (6) tornillos, su función es centrar las esferas en los discos.

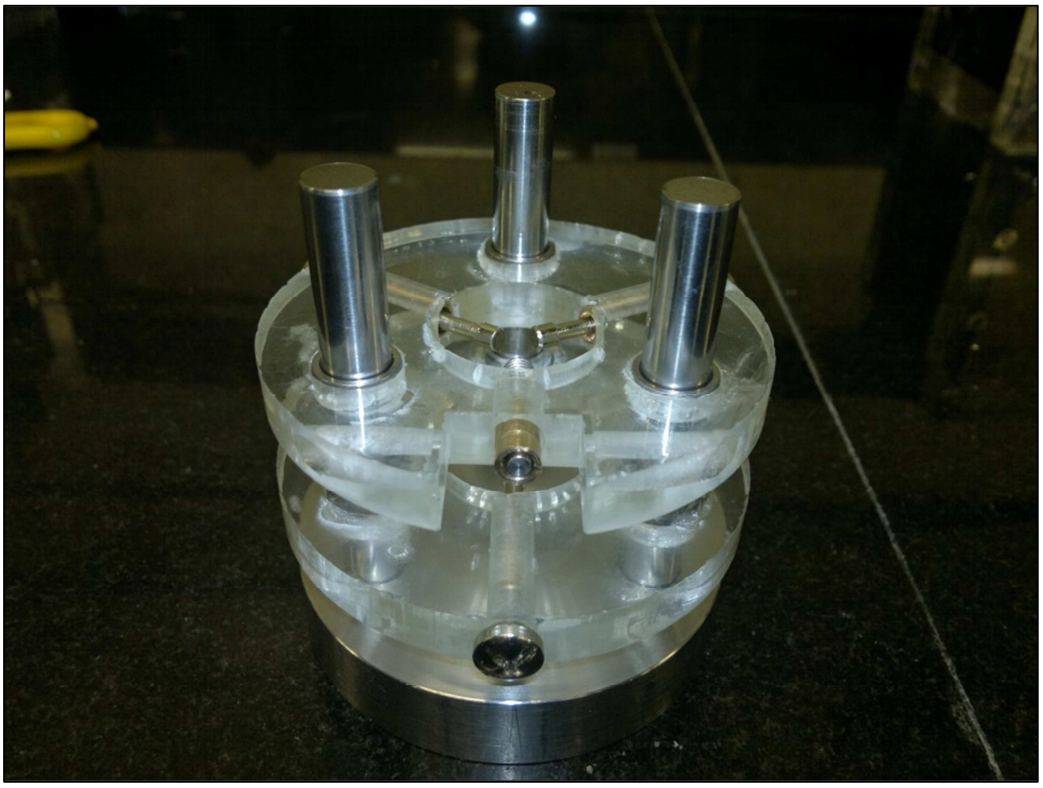
- Dos (2) amortiguadores de caucho, su función es distribuir la carga puntual que va a ser aplicada a las esferas, buscando que fallen en el punto de contacto entre esferas.

En las fotografías 6 y 7 se muestra el ensamble del prototipo del dispositivo, el cual sirvió para confirmar que el diseño era funcional y que podía utilizarse para los ensayos de laboratorio.

La dificultad encontrada fue que debido al nivel de precisión necesario para el ajuste de los tres ejes con los dos discos acrílicos, no fue posible que estos tuvieran un desplazamiento vertical libre, sino que era necesario aplicarles una pequeña fuerza para que se desplazaran, lo cual podía interferir con los resultados de los ensayos de laboratorio a realizar.



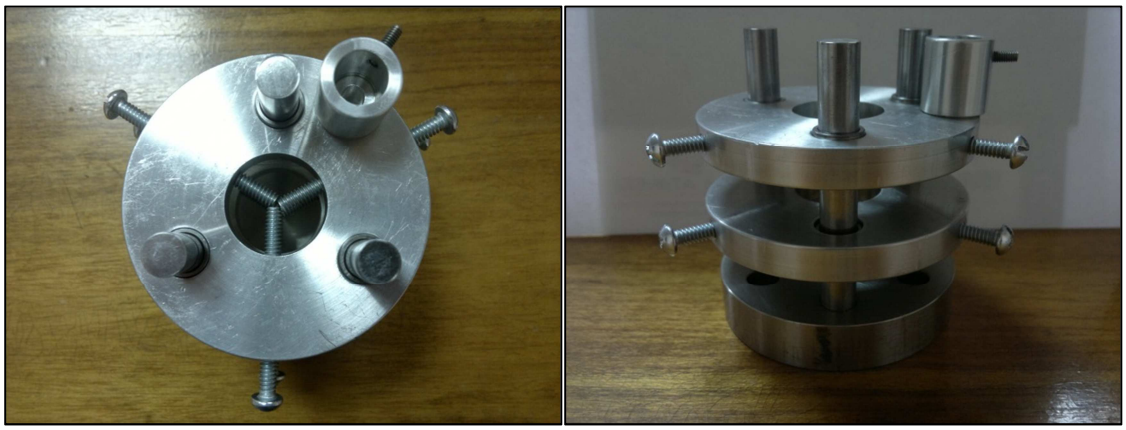
Fotografía 6. Vista en planta y lateral del prototipo del dispositivo



Fotografía 7. Prototipo del dispositivo

2.2.2. Dispositivo definitivo

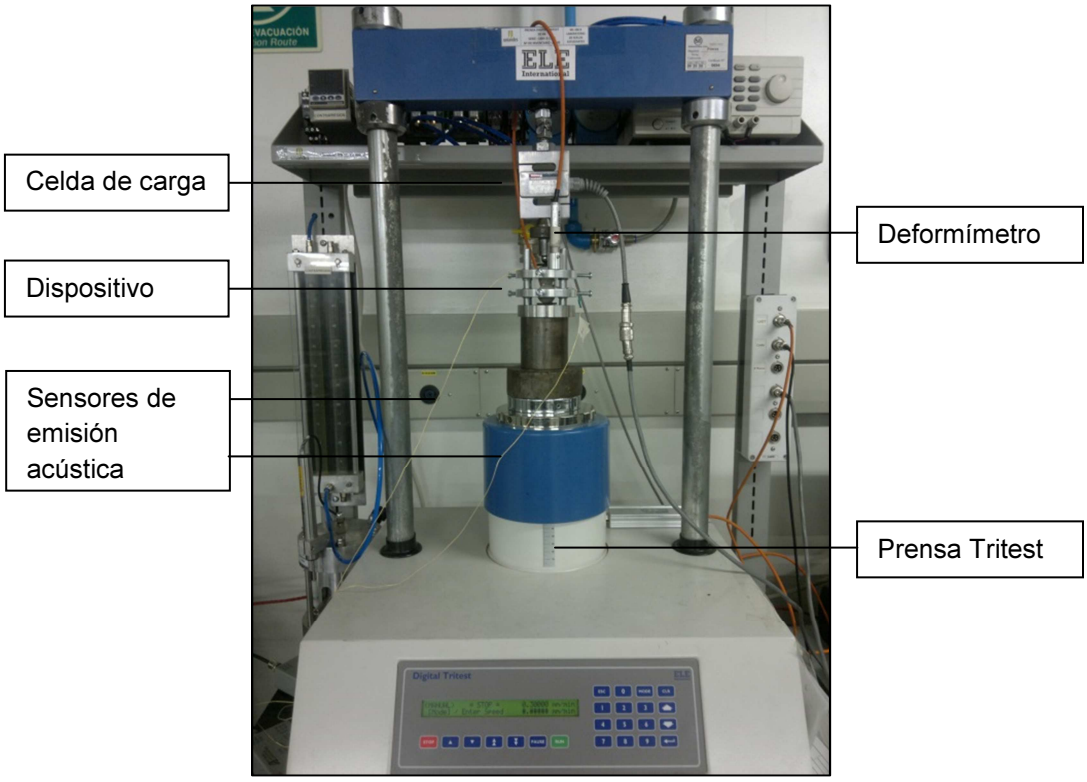
Debido a la precisión requerida para el montaje, se mandó a ensamblar el dispositivo a un taller de ingeniería mecánica donde se reemplazaron los discos acrílicos por discos de aluminio donde las tres perforaciones para los ejes lineales tuvieran el diámetro exacto y con absoluta verticalidad, con lo cual se logró que los discos cayeran libremente por los ejes, de modo que al estar ajustados con las esferas de mortero se pudiera registrar cualquier variación en el tamaño de las esferas causado por la deformación a la compresión vertical.



Fotografía 8. Dispositivo definitivo.

2.2.3. Montaje final

En la fotografía 9 se observa el montaje definitivo para los ensayos a compresión normal de las esferas de mortero.

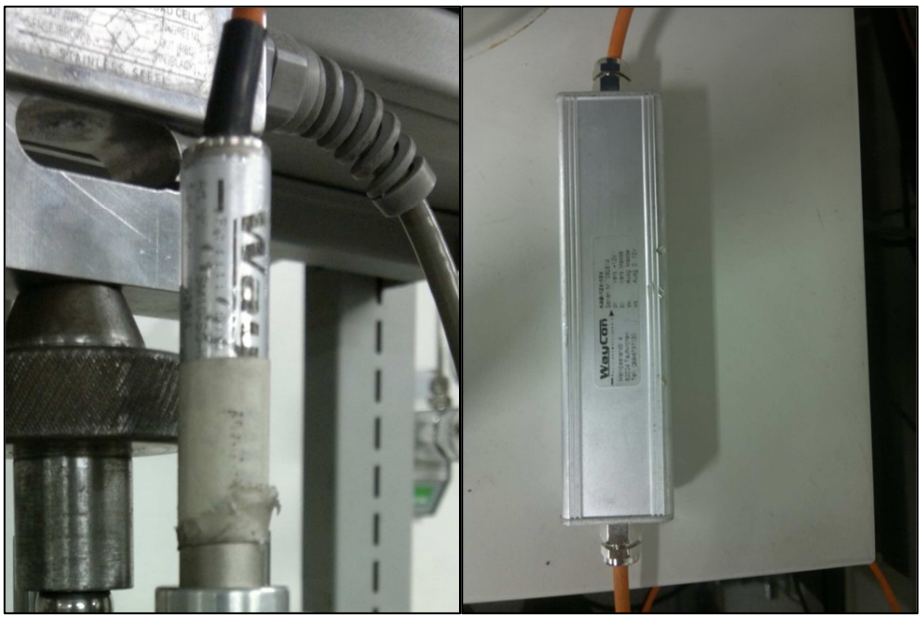


Fotografía 9. Equipo utilizado.

- Celda de carga Tedea Huntleight de 1000 kg: su función es capturar la carga a la cual se van a someter las esferas en el tiempo.

Fotografía 10. Celda de carga

- Deformímetro WayCon: la función del sensor LDVT (Linear Variable Differential Transformer) es medir el desplazamiento vertical entre las dos esferas.



Fotografía 11. Deformímetro

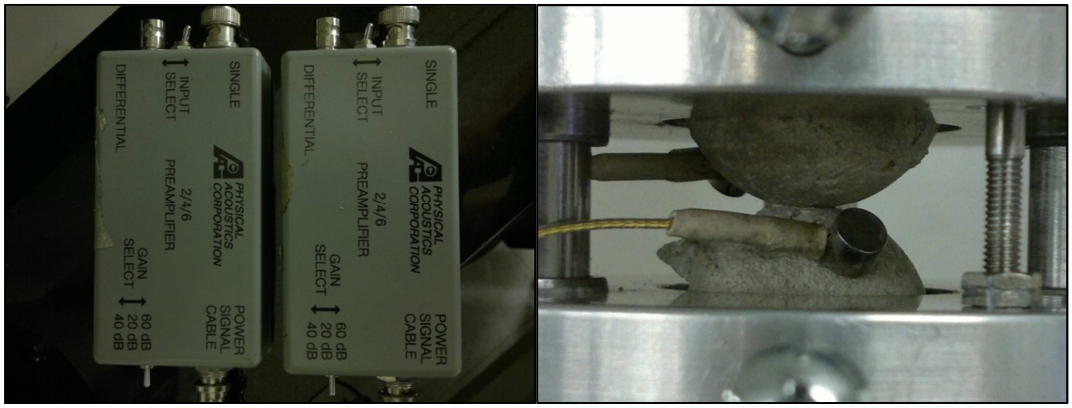
- Equipo de captación acústica: está compuesto por un computador personal que puede tener un micro procesador de la familia Pentium III o posterior, disco duro de al menos 100Mb, memoria ram mínima de un gigahercio, una unidad de lectora de discos y un monitor para visualizar información.

  Una tarjeta de adquisición de datos acústicos del tipo PCI-2 de 18 bit análoga – digital, la cual contiene dos canales para adaptar máximo dos sensores de captaciones acústicas con detección y procesamiento de ondas con independencia en cada canal y cuya función es la de capturar las señales sonoras emitidas por un material cuando se somete a esfuerzo, esta tarjeta posee un ancho de banda análogo en un rango de 1KHz – 3

MHz, frecuencia de muestreo de 40 MHz, cuatro filtros High pass y seis filtros Low pass.

Preamplificadores que permiten amplificar las señales emitidas por las muestras y captadas por el elemento piezoeléctrico del sensor antes de ser transmitidas al circuito de medición. El preamplificador empleado para este trabajo tiene tres posibles modos de selección de amplificación de la señal en decibles (20dB, 40 dB, 60dB).

Un Sensor de captaciones acústicas cuya finalidad es la captura de las emisiones sonoras debido al fracturamiento de las partículas esféricas.



Fotografía 12. Preamplificadores de señales acústicas y sensores instalados

En la fotografía 13 se presenta con mayor detalle el montaje con esferas de mortero de 25 milímetros, donde se pueden apreciar los elementos mencionados anteriormente.

Fotografía 13. Detalle del montaje

2.3. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

Una vez configurado el software de emisión acústica AEwin se realiza el siguiente procedimiento para los ensayos a compresión:

- Se escoge un par de esferas con iguales características según lo deseado en cuanto a resistencia, diámetro y si son saturadas o secas al aire.

- Colocar el caucho inferior para amortiguar la esfera con la base.

- Se ubica la primera esfera en el disco inferior, buscando que la altura del disco este en el eje horizontal de la esfera. Luego se ajustan los tornillos de forma que la esfera quede en el centro del disco y que el disco se sostenga de la esfera por medio del ajuste de los tornillos.

- De la misma forma descrita en el punto anterior, se ubica la segunda esfera en el disco superior.

- Posteriormente se adiciona una gota de pegante en cada sensor de emisión acústica y se localizan en cada una de las esferas, cuyas superficies deben estar limpias para garantizar una buena adherencia y una buena lectura. Adicionalmente se debe procurar que queden en un área despejada para que en ningún momento del ensayo hagan contacto con otro objeto circundante. En los ensayos realizados el sensor No. 1 siempre se dispuso en la esfera superior mientras que el sensor No. 2 se dispuso en la esfera inferior.

- Una vez ubicadas las esferas y los sensores en el dispositivo, se sube la prensa hasta que ajuste el pistón de carga con la esfera superior, sin olvidar colocar el caucho entre estos para amortiguar la carga. Se debe verificar que las esferas estén bien centradas con el pistón para que la carga se aplique correctamente en el eje.

- A continuación se ubica el deformímetro en el cilindro del disco superior destinado para tal fin, de tal modo que la aguja caiga y descanse sobre el disco inferior.

- Se configura la prensa para una velocidad de carga de 0,3 mm/min. En todos los ensayos e utilizo la misma velocidad con el objeto de limitar las variables de estudio.

- Previamente se debe haber configurado el software de emisión acústica AEwin y el software de la prensa Tritest. Es importante la constante de la celda de carga utilizada.

- Realizados los puntos anteriores y después de haber verificado que los sensores de emisión acústica, el deformímetro y la celda están dando respuesta, se inician al tiempo los software de registro de datos y la prensa.

- Terminado el ensayo, se registran los datos de desplazamiento, carga y emisión acústica para un posterior análisis.

2.4. PRUEBAS REALIZADAS

- Inicialmente se realizaron tres ensayos para verificar que el ensayo fue diseñado y montado correctamente.

- Luego, se realizaron las pruebas con carga monotónica para las esferas de resistencia nominal de 20 Mpa así:

  - 4 ensayos con las esferas de 25 mm, dos con las esferas secas al aire y dos con las esferas saturadas.

  - 6 ensayos con las esferas de 20 mm, tres con las esferas secas al aire y tres con las esferas saturadas.

  - 6 ensayos con las esferas de 15 mm, tres con las esferas secas al aire y tres con las esferas saturadas.

  - Las esferas saturadas se dejaron sumergidas en agua por un tiempo superior a 10 días para conocer de forma se ve afectado su comportamiento mecánico.

- Posteriormente se realizaron las pruebas con carga dinámica para las esferas de 25 mm de resistencia nominal de 12 Mpa y 28 Mpa así:

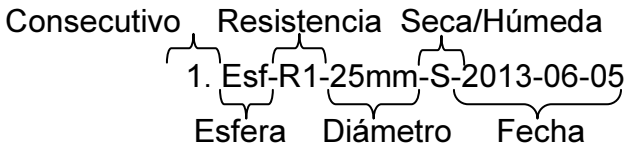
  - 1 ensayo inicial para cada resistencia para comprobar la carga a la cual se espera fallen las esferas.

  - La carga máxima obtenida se dividió en 3, para realizar 3 ciclos de carga. Para la resistencia de 12 MPa los ciclos fueron de 80Kg, 160Kg y luego hasta llegar a la falla. Para la resistencia de 28 MPa los ciclos fueron de 100Kg, 200Kg y luego hasta llegar a la falla.

  - Se realizaron 2 ensayos con las esferas de 25 mm y 12 MPa de resistencia y 2 ensayos con las esferas de 25 mm y 28 MPa de resistencia.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la realización de los ensayos se le dio la siguiente codificación a los archivos de salida tanto del AEwin como de la Prensa:



En los anexos se presentan tablas resumen de los ensayos realizados, indicando las condiciones del ensayo y un breve resumen de la falla obtenida. Adicionalmente se presentan graficas de Tiempo vs. Carga junto con los Conteos de Emisión Acústica, Tiempo vs. Carga junto con la Deformación, y Deformación vs. Carga junto con la curva obtenida de acuerdo a la teoría de Hertz. También se presentan las gráficas del software AEWwin de Conteos vs. Tiempo e Hits vs. Tiempo de los dos sensores de emisión acústica. Por último se muestran dos fotografías, la primera que muestra el tipo de falla de una esfera y la segunda las partes de la esfera que falló junto a la otra esfera.

A continuación se presenta un resumen de las cargas máximas alcanzadas por las esferas antes de fallar de cada uno de los ensayos realizados:

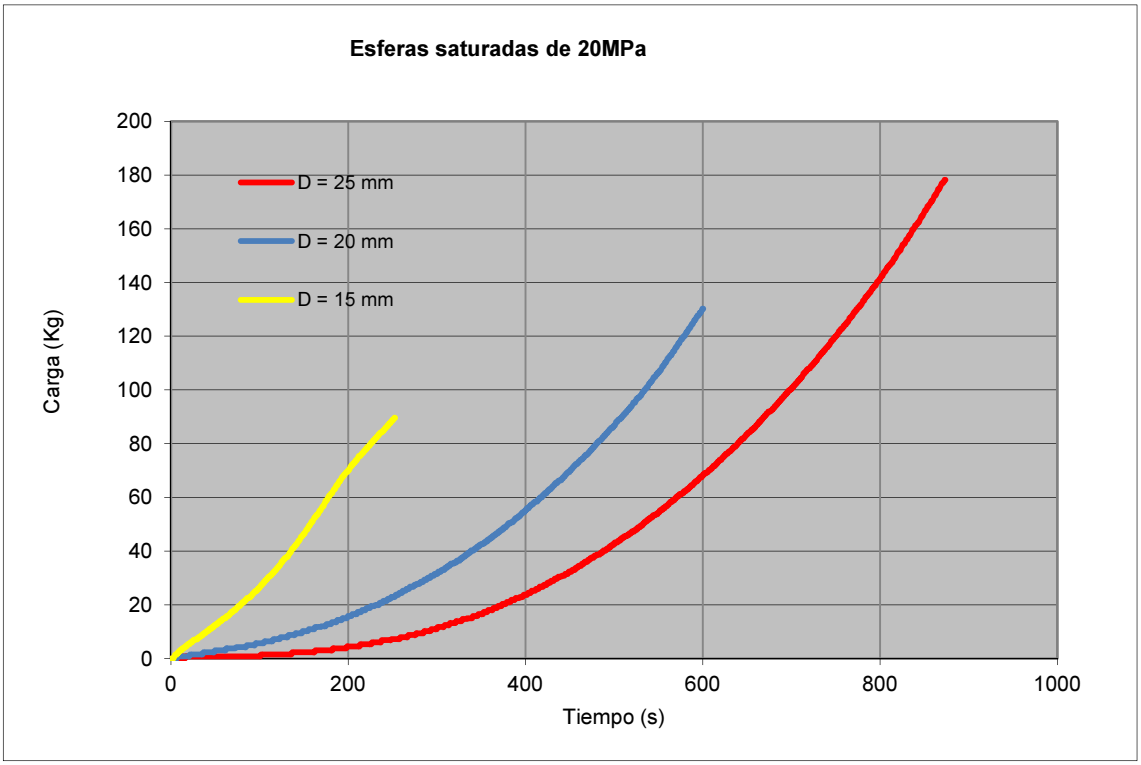
Ensayo	20MPa, 25mm	
	Secas	Saturadas
1	321,0	185,3
2	247,5	178,2
Promedio	285,25	181,75

Ensayo	20MPa, 20mm	
	Secas	Saturadas
1	259,5	148,9
2	242,7	136,5
3	152,6	130,2
Promedio	218,2	138,5

Ensayo	20MPa, 15mm	
	Secas	Saturadas
1	157,9	96,0
2	186,0	89,6
3	183,0	85,2
Promedio	175,6	90,3

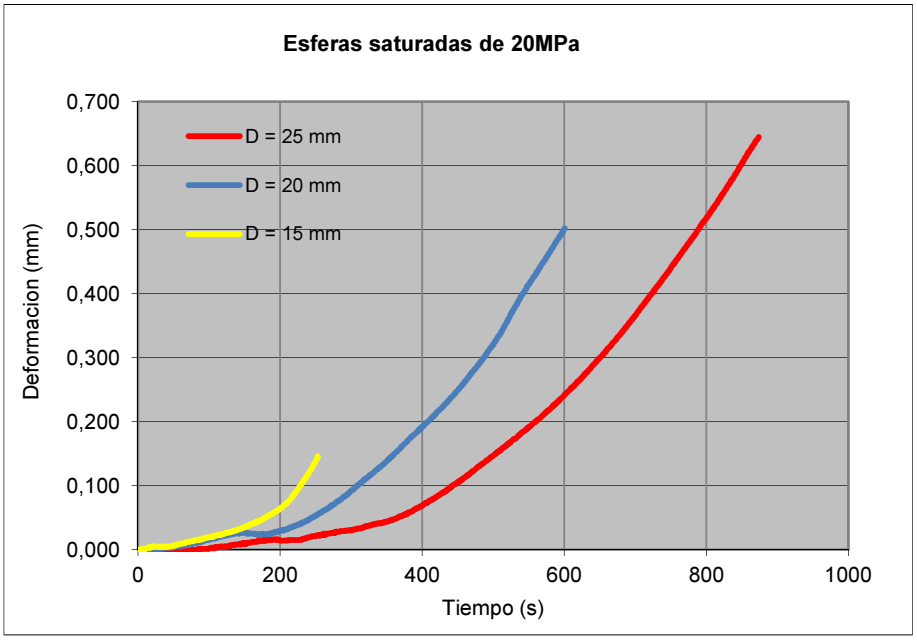
Tabla 1. Resultados obtenidos para la resistencia de 20Mpa bajo carga monotónica.

En la gráfica 1 se muestran las curvas obtenidas de carga vs. tiempo para las esferas saturadas de 20 MPa y diámetros de 15mm, 20mm y 25 mm, en la que se puede observar como era de esperarse, que a medida que aumenta el diámetro de las partículas la resistencia última es mayor, es decir que es directamente proporcional.



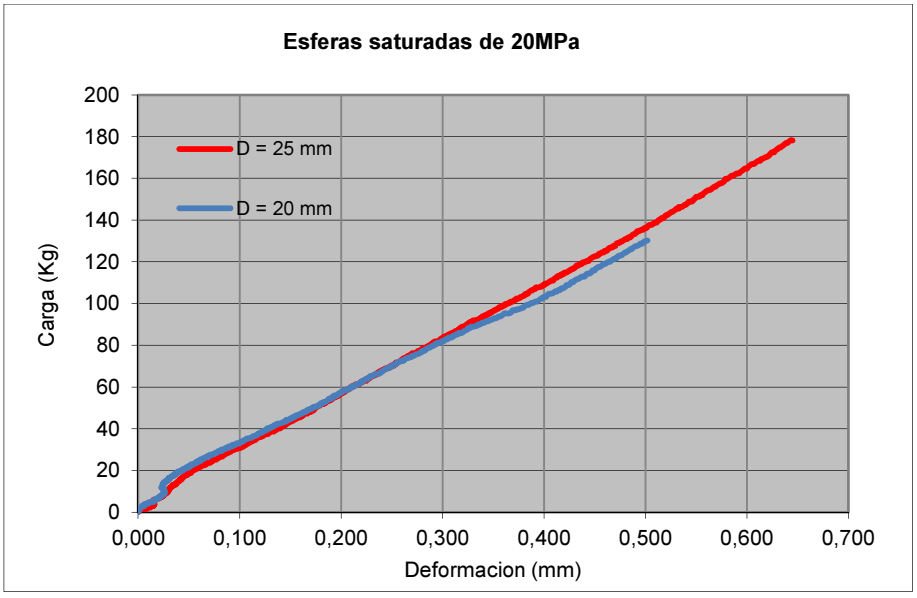
Gráfica 1. Carga última según diámetro

De igual forma en la gráfica 2 se observan las curvas de deformación vs. tiempo para las esferas saturadas de 20 MPa y diámetros de 15mm, 20mm y 25 mm (las mismas de la gráfica 1), donde se aprecia como la deformación máxima antes de la falla es directamente proporcional al diámetro de las partículas.



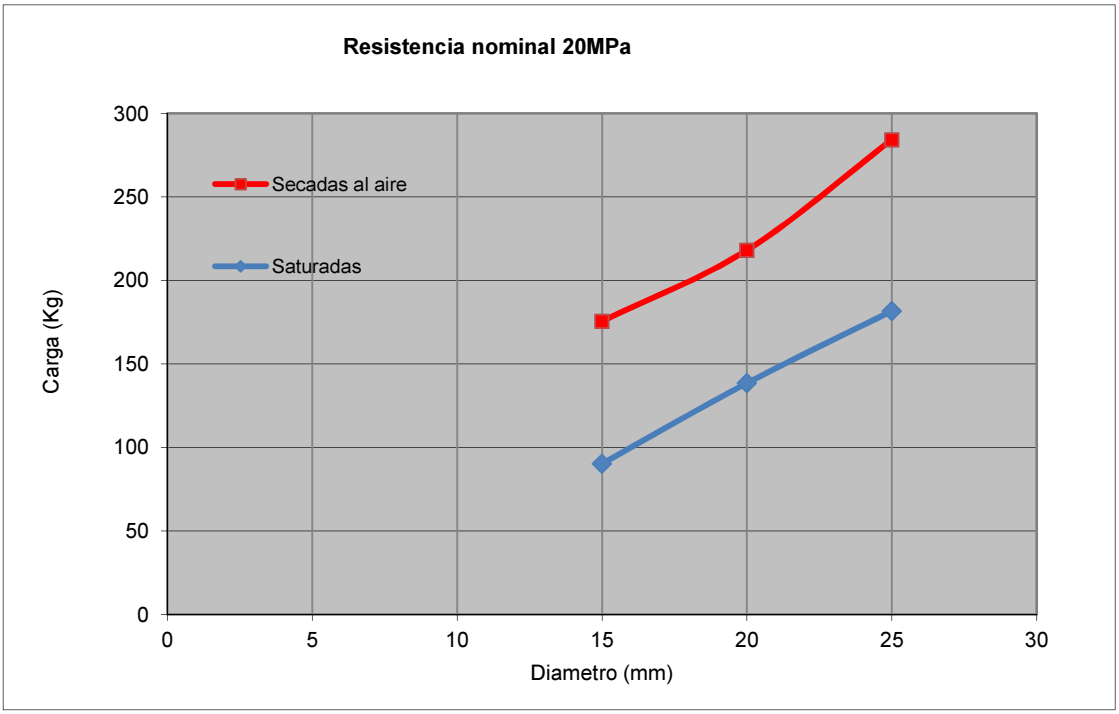
Gráfica 2. Deformación según diámetro

En la gráfica 3 se presentan las curvas de carga vs. deformación para las esferas saturadas de 20 MPa y diámetros de 20mm y 25 mm, donde se puede ver como el material se comporta de manera similar al ser sometido a carga ya que la pendiente de las curvas es similar.



Gráfica 3. Carga vs. Deformación

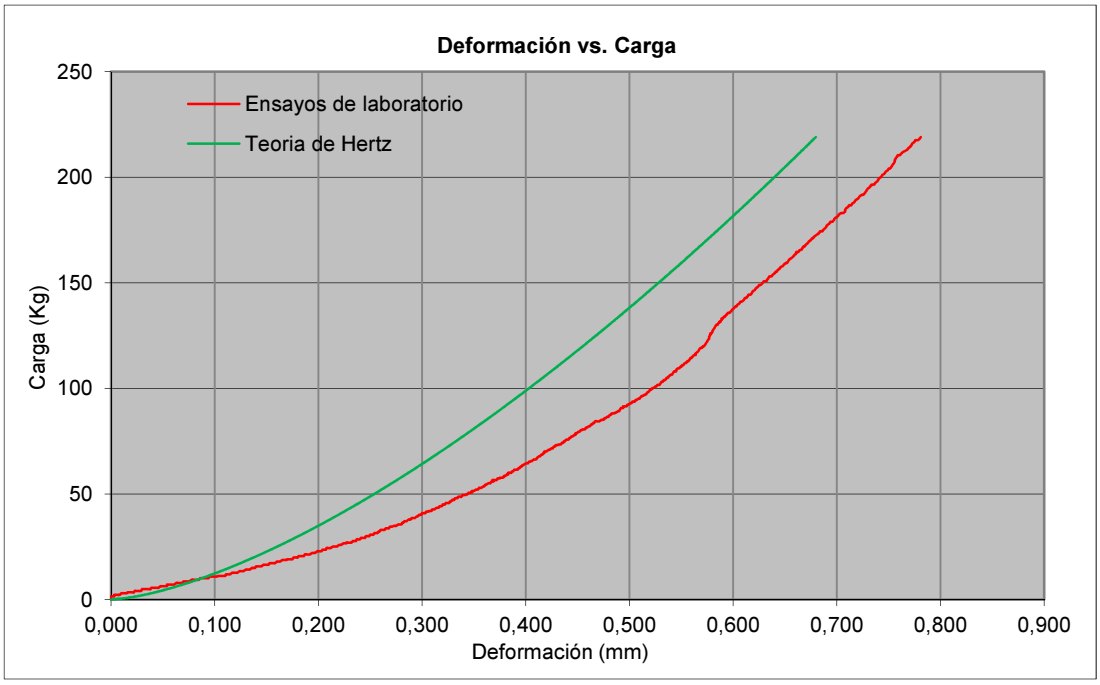
En la gráfica 4 se puede observar el cambio de la carga soportada por las esferas de diferente diámetro debido al cambio del contenido de agua en la muestra, donde se aprecia que el contenido de agua es inversamente proporcional a la carga soportada, en promedio la resistencia alcanzada por las esferas saturadas fue 35% menos que las secas.



Gráfica 4. Influencia del contenido de agua en las partículas

Con la información obtenida anteriormente, se optó por comparar los resultados obtenidos en los ensayos con el modelo elástico planteado por Hertz con el fin de comprobar si se ajustan a dicha teoría. En los anexos se presentan las curvas obtenidas mediante los ensayos de laboratorio y mediante la teoría de Hertz, aún en la gráfica 5 se ilustran las curvas típicas obtenidas, de donde se puede decir que aunque la tendencia de las curvas es similar la teoría de Hertz no se ajusta a los resultados obtenidos, por lo tanto no describe bien el comportamiento

mecánico de las partículas. Puede ser porque el modulo supuesto no es representativo del material.



Gráfica 5. Comparación entre resultados laboratorio y teoría de Hertz.

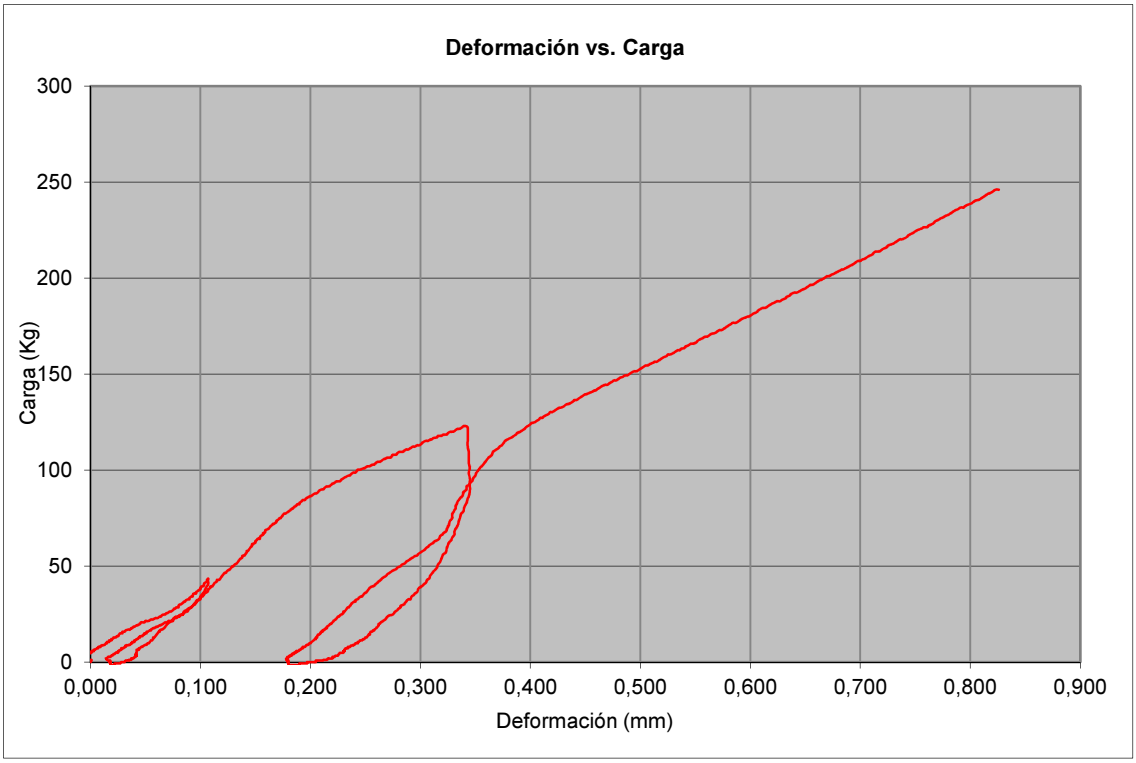
De los ensayos realizados con carga dinámica para las esferas de 25 mm y de resistencia nominal de 12 MPa y 28 MPa, se obtuvieron los datos que se presentan a continuación, la tabla 2 se muestra un resumen de las cargas máximas alcanzadas por las esferas antes de fallar de cada uno de los ensayos realizados:

Ensayo	12MPa, 25mm
	Secas
Pmax	270,3
1	359,2
2	204,4
Promedio	281,8

Ensayo	28MPa, 25mm
	Secas
Pmax	219,0
1	246,0
2	194,7
Promedio	220,35

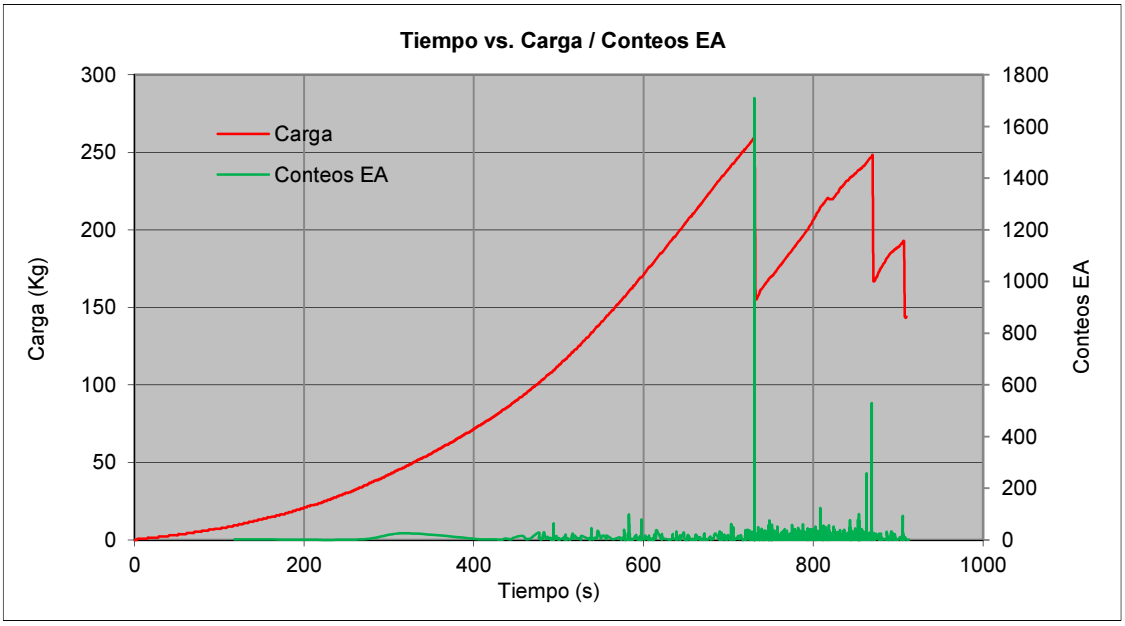
Tabla 2. Resultados obtenidos para las resistencia de 12MPa y 28Mpa bajo carga dinámica.

Se realizó primero un ensayo con carga monotónica para determinar la resistencia última de esta mezcla de mortero, la carga máxima alcanzada se dividió entre tres de forma que se pudieran hacer los ensayos en tres ciclos. A continuación se presenta en la gráfica 6 obtenida para las esferas de 25mm y 12Mpa.



Gráfica 6. Ensayo cíclico

En los ensayos por ciclos se encontró que desde el primer ciclo con una carga aproximada del 33% de la resistencia última ya existe deformación permanente en el material lo que indica que ha superado el límite elástico, acumulándose con la deformación del siguiente ciclo.



Gráfica 7. Carga y Conteos de Emisión Acústica en el tiempo

Finalmente se presentan las lecturas típicas obtenidas con los sensores de emisión acústica. En la gráfica 7 se puede ver como a medida que la carga normal aplicada a las esferas se va incrementando, también van apareciendo picos de Conteos (el número de veces que una señal supera el umbral establecido) y como coinciden exactamente las lecturas de emisión acústica con las rupturas del material. Lo anterior muestra que el uso de esta técnica puede ser muy útil en futuras investigaciones para estudiar las ondas sonoras emitidas por un material determinado para lograr predecir su comportamiento mecánico a medida que se acerca a la falla del material.

En las gráficas arrojadas por el AEwin se puede observar que las ondas acústicas se transmiten entre esferas y en consecuencia los sensores de emisión acústica dan lecturas similares, sin embargo en la esfera que se producen las ondas se obtienen registros más altos, tal como se aprecia en la figura 3.

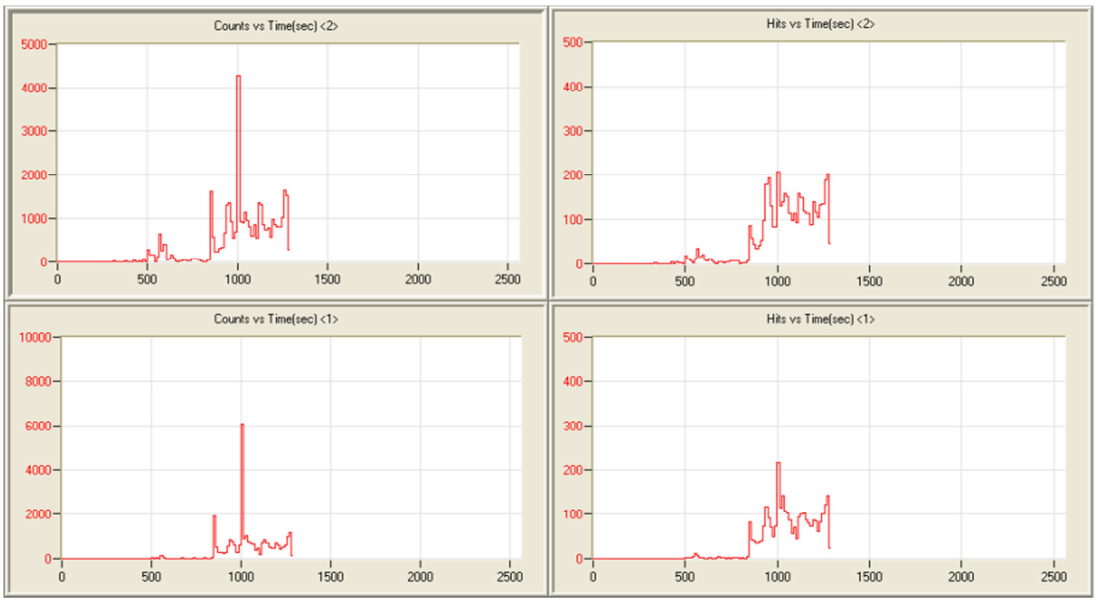


Figura 3. Lecturas sensores acústicos 1 y 2.

En los ensayos se continuó aplicando carga después de la falla para observar su comportamiento, lo que causo un trituramiento de la esfera que falló como se puede observar en algunas de las fotografías de los resultados, en algunos casos resistiendo mayor carga a la que causó la falla debido a la mayor área de contacto, y en cierta medida a que las esferas estaban confinadas por los tres tornillos con que se centraron en el dispositivo.

En la fotografía 14 se ilustra la falla típica de las esferas de mortero obtenida en los ensayos.

Fotografía 14. Falla típica de las esferas bajo carga normal.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La tesis presenta un estudio experimental de resistencia a la compresión de partículas esféricas, estudiando el efecto del tamaño, la resistencia nominal y la saturación.

El efecto de la succión es crítico en cuanto a la resistencia última de las partículas ya que de acuerdo a los resultados obtenidos las esferas saturadas resistieron en promedio 35% menos carga que las esferas secas.

Las resistencias más altas y las deformaciones más grandes se alcanzaron con las esferas de mayor diámetro que habían sido secadas al aire.

La teoría de Hertz o se ajusta a los resultados obtenidos, por lo tanto no describe bien el comportamiento mecánico de las partículas. Puede ser porque el modulo supuesto no es representativo del material.

Las resistencias más altas se alcanzaron con las partículas de mayor tamaño y secadas al aire.

Las esferas de mortero tienen un comportamiento elasto-plastico y desde un primer ciclo con carga aproximada del 33% de la resistencia última ya existe deformación permanente en el material lo que indica que ha superado el límite elástico, acumulándose con la deformación del siguiente ciclo.

5. REFERENCIAS

Caicedo B., Cacique A., Contreras C. (2006). Experimental Study of the strenght and crushing of unsaturated spherical particles. University of los Andes. Bogotá, Colombia.

Martínez A. (2009). Emisiones acústicas en suelo granulares cargados. University of los Andes. Bogotá, Colombia.

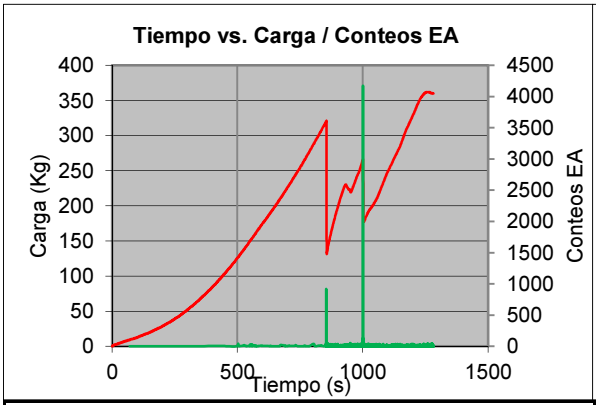
Felizzola R. (2010). Estudio del fracturamiento de materiales granulares sometidos a esfuerzos de corte mediante monitoreo de la técnica de emisión acústica. University of los Andes. Bogotá, Colombia.

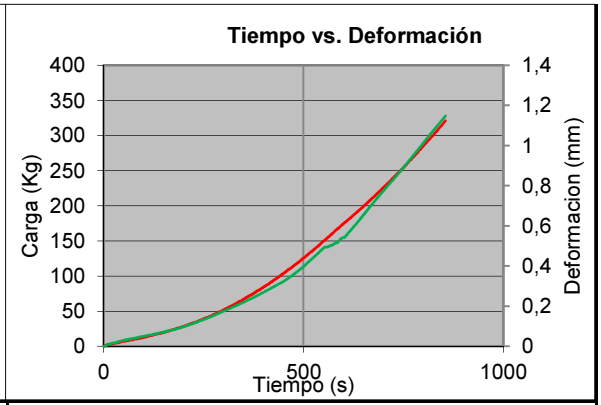
Vallejo, L.E., Chik, Z., Tucek, S., Caicedo, B., 2004. Fractal Analysis of the Abrasion and Crushing of Gravels. Pavements unbound, Taylor & Francis, 43−50.

Lobo-Guerrero, S.,Vallejo, L.E., 2004. Modeling of material crushing in granular road bases. Pavements unbound, Taylor & Francis, 33−41.

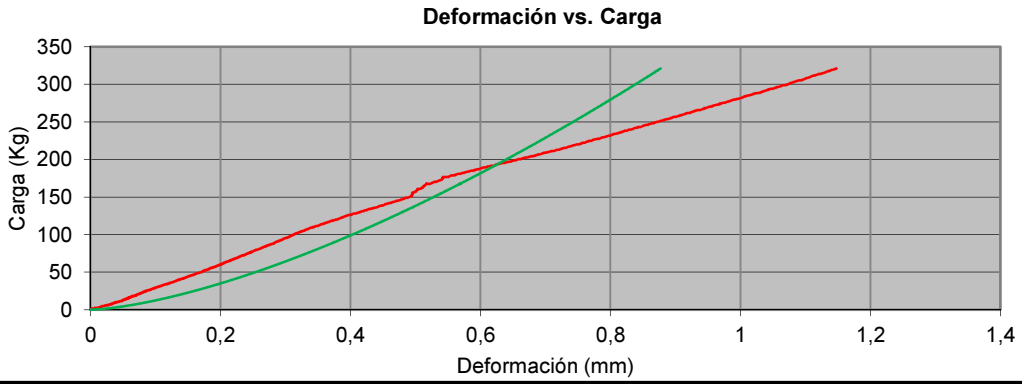
ANEXOS

FECHA DEL ENSAYO:	11-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas secas al aire
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R2-25mm-S-2013-06-11
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 321,0 Kg Tiempo de falla = 855 s



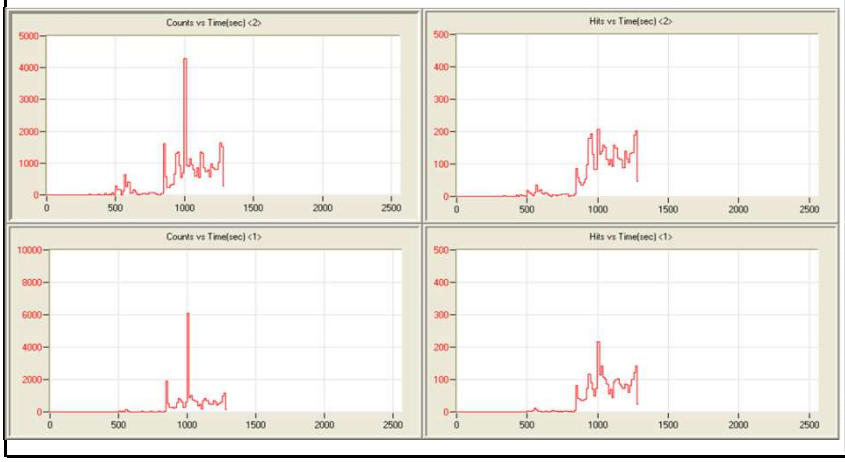


Carga — Conteos EA | Carga — Deformación

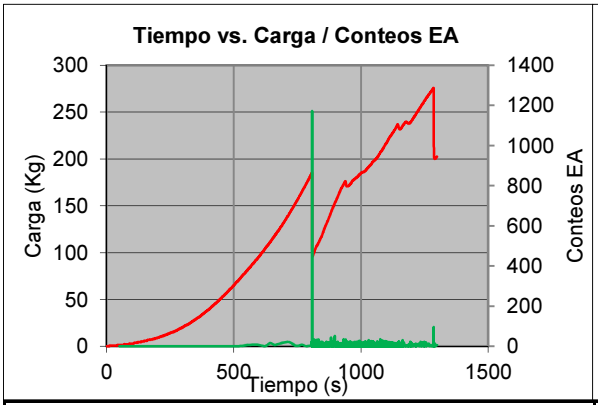


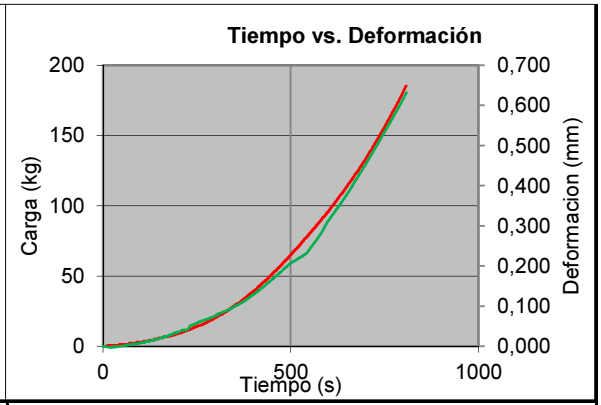
Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

GRAFICAS AEwin	FOTOS

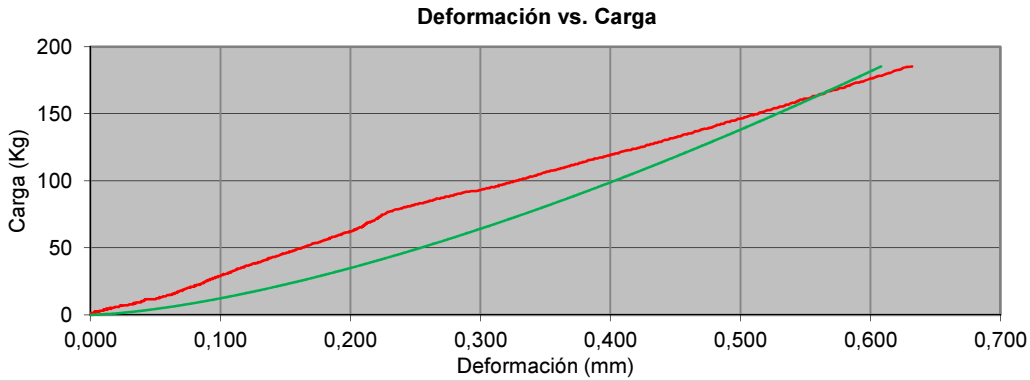


FECHA DEL ENSAYO:	11-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas saturadas
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	3. Esf-R2-25mm-H-2013-06-11
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 185,3 Kg Tiempo de falla = 808 s



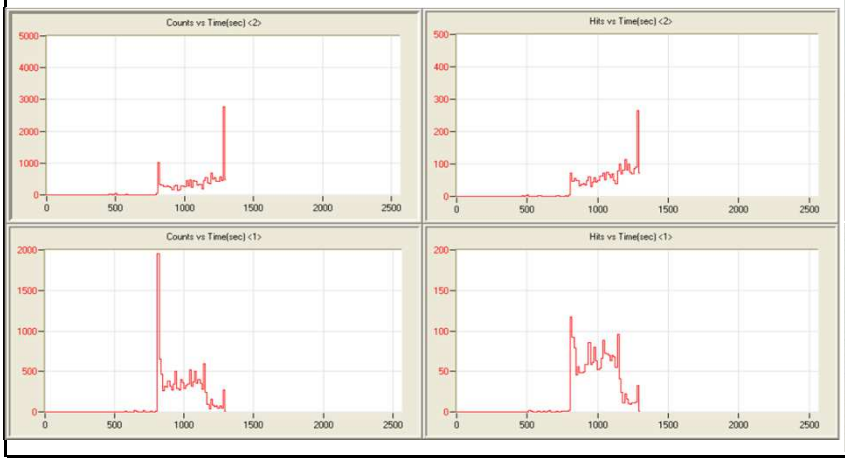


Carga — Conteos EA | Carga — Deformación

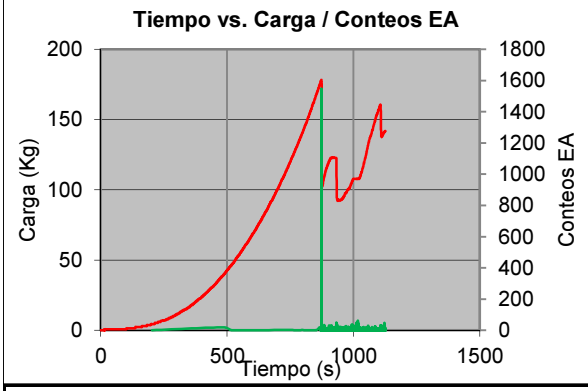


Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

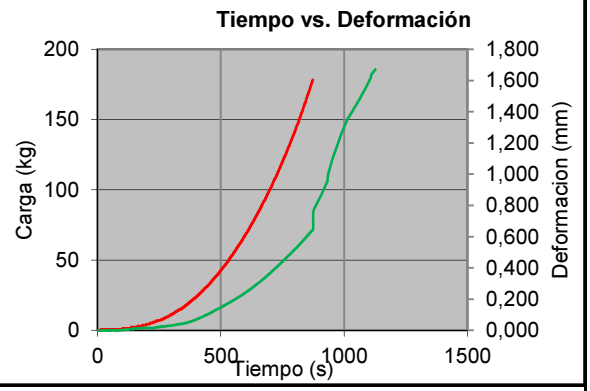
GRAFICAS AEwin	FOTOS



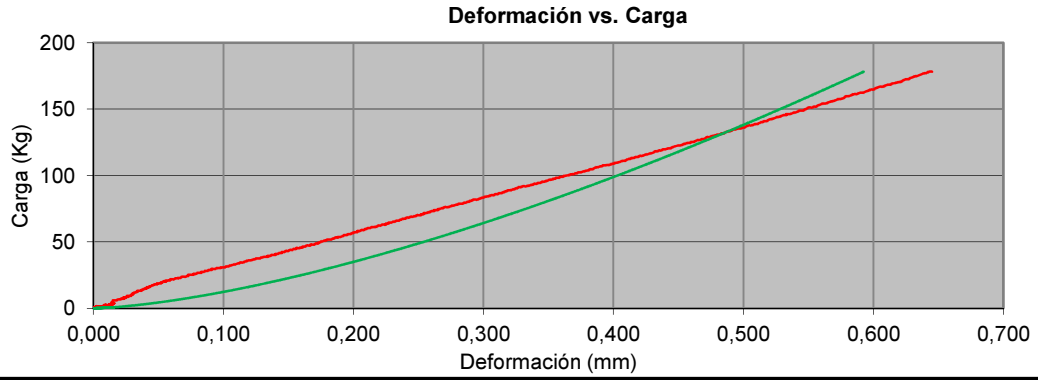
FECHA DEL ENSAYO:	11-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas saturadas
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	4. Esf-R2-25mm-H-2013-06-11
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 185,3 Kg Tiempo de falla = 874 s



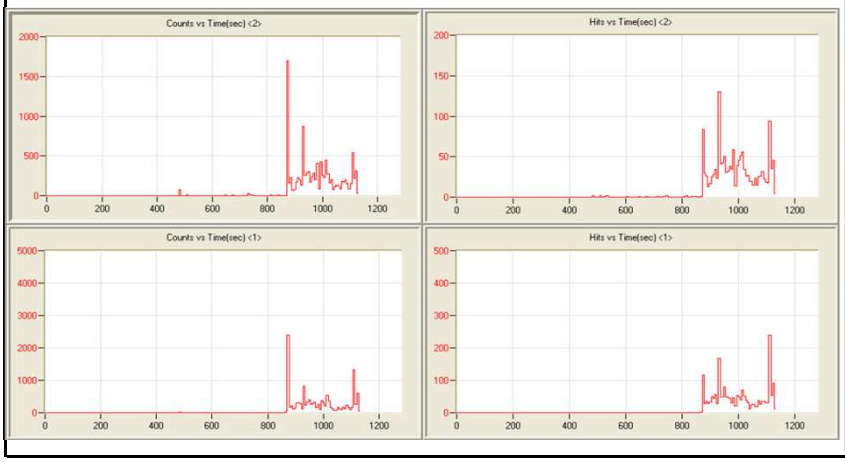
Carga — Conteos EA



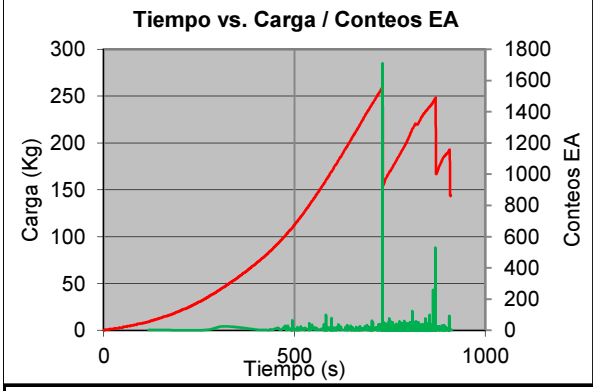
Carga — Deformación



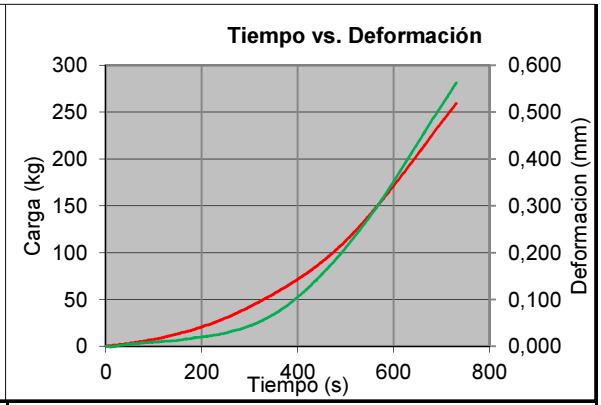
Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

GRAFICAS AEwin	FOTOS
	

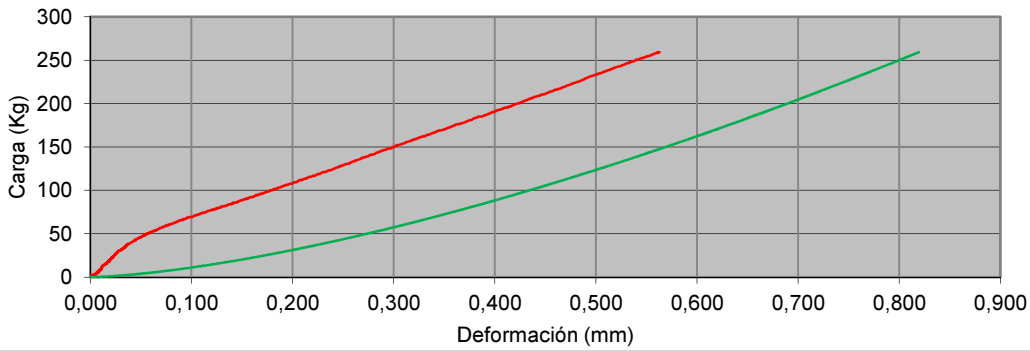
FECHA DEL ENSAYO:	14-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas secas al aire
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	20 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R2-20mm-S-2013-06-14
OBSERVACIONES:	Falla esfera inferior en 3 partes. Carga de falla = 259,2 Kg Tiempo de falla = 731 s



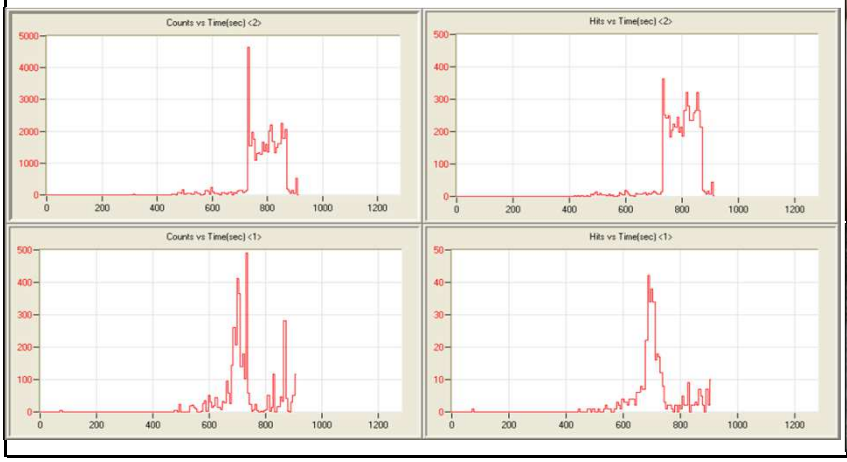
Carga — Conteos EA



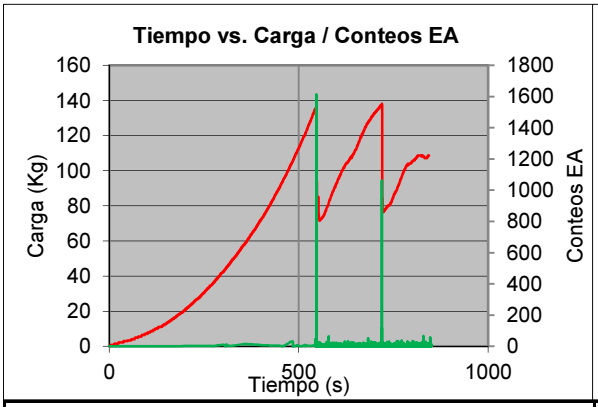
Carga — Deformación



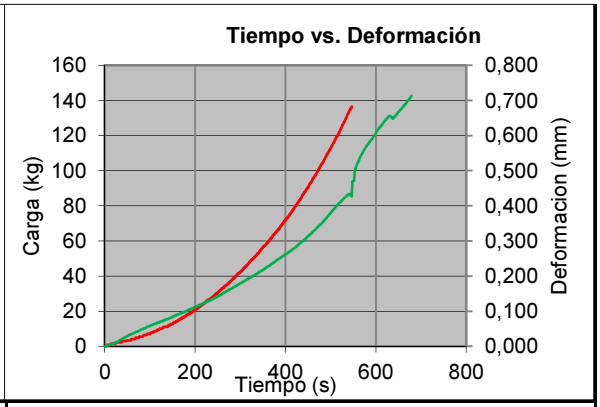
Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

GRAFICAS AEwin	FOTOS
	

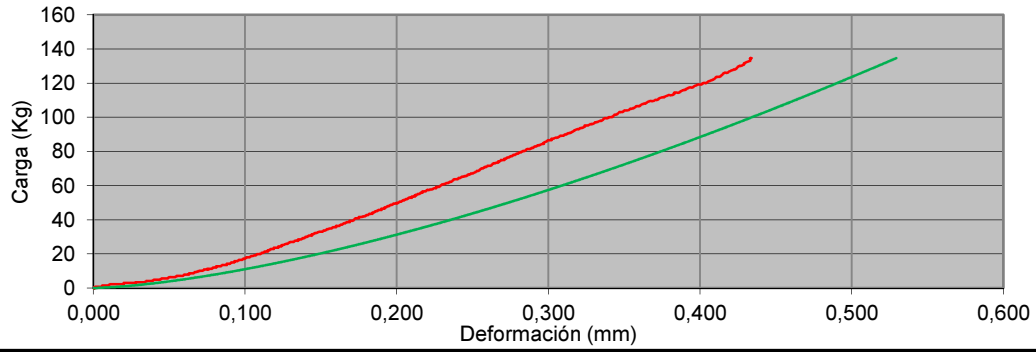
FECHA DEL ENSAYO:	14-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas saturadas
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	20 mm
IDENTIFICACION:	5. Esf-R2-20mm-H-2013-06-14
OBSERVACIONES:	Falla esfera inferior en 4 partes. Carga de falla = 136,5 Kg Tiempo de falla = 547 s



Carga — Conteos EA

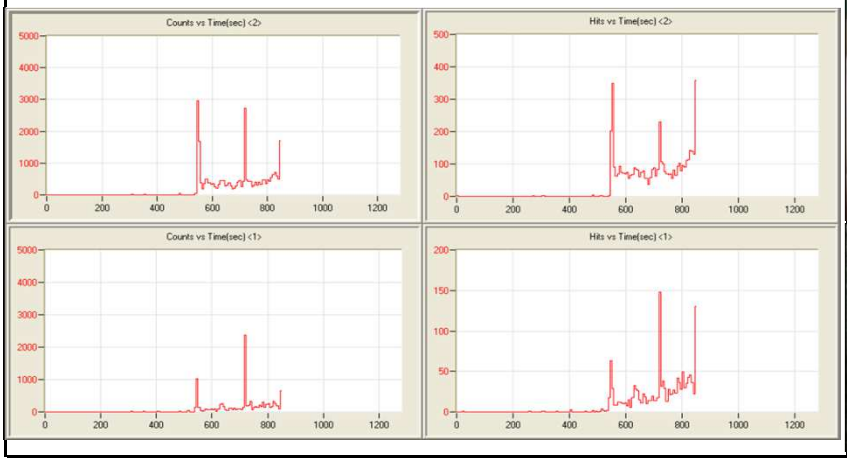


Carga — Deformación

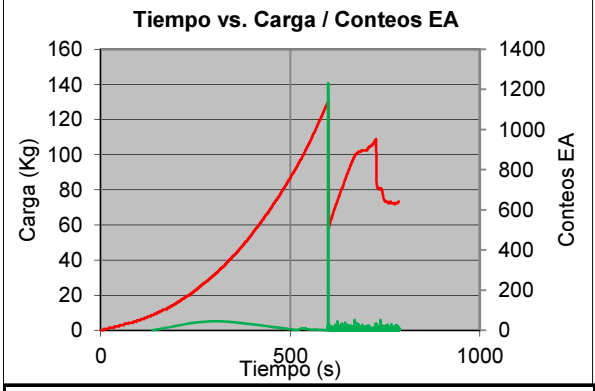


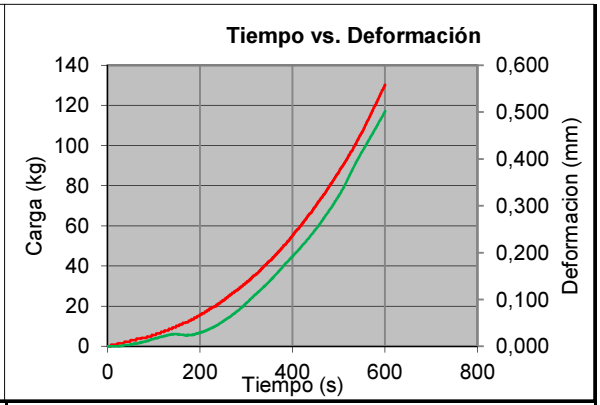
Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

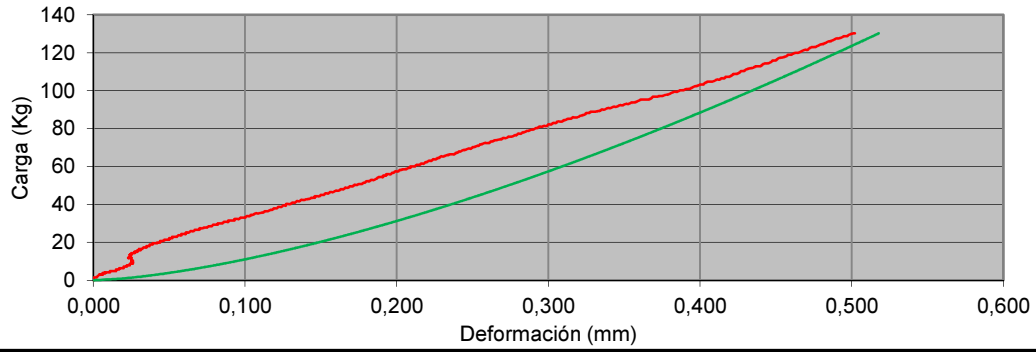
GRAFICAS AEwin	FOTOS

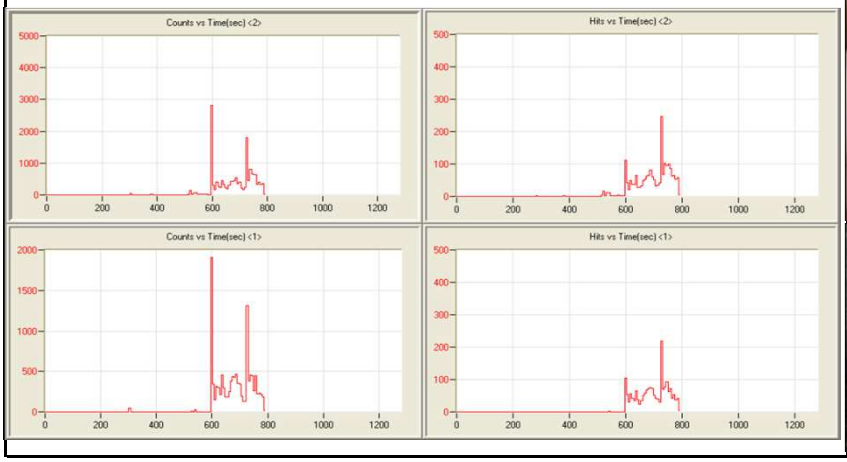


FECHA DEL ENSAYO:	14-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas saturadas
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	20 mm
IDENTIFICACION:	6. Esf-R2-20mm-H-2013-06-14
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 130,2 Kg Tiempo de falla = 600 s

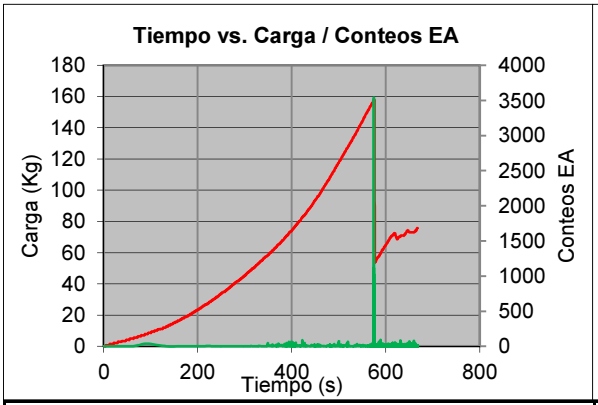




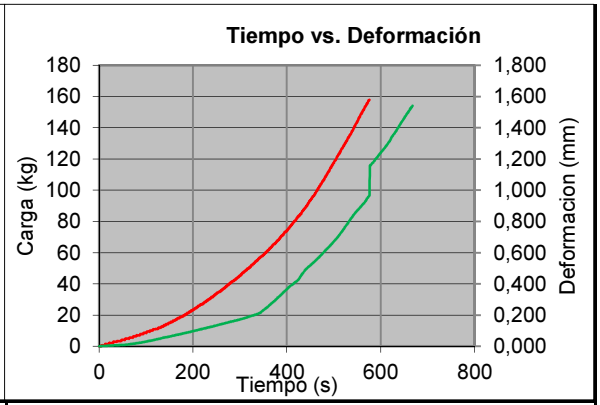


GRAFICAS AEwin	FOTOS
	

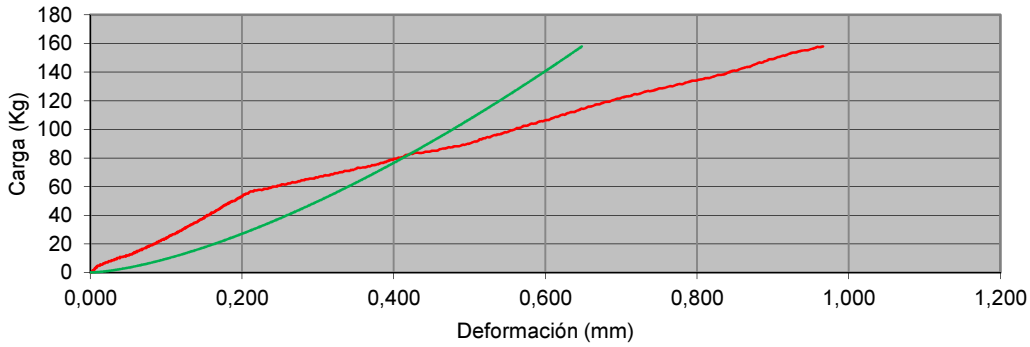
FECHA DEL ENSAYO:	14-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas secas al aire
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	15 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R2-15mm-S-2013-06-14
OBSERVACIONES:	Falla esfera inferior en 3 partes. Carga de falla = 157,9 Kg Tiempo de falla = 576 s



Carga — Conteos EA

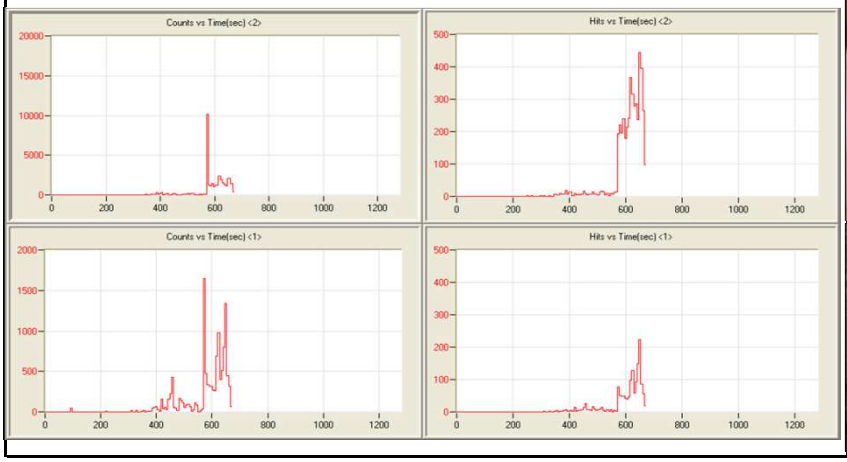


Carga — Deformación

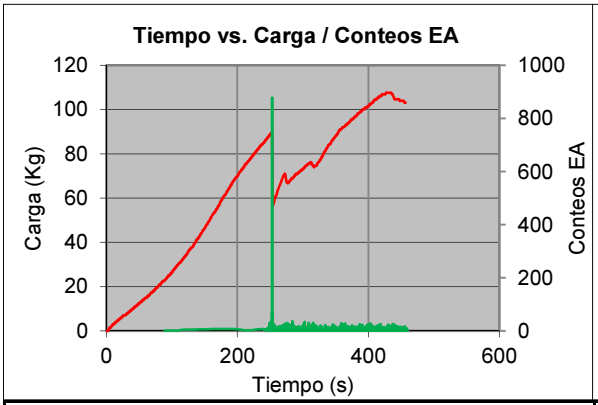


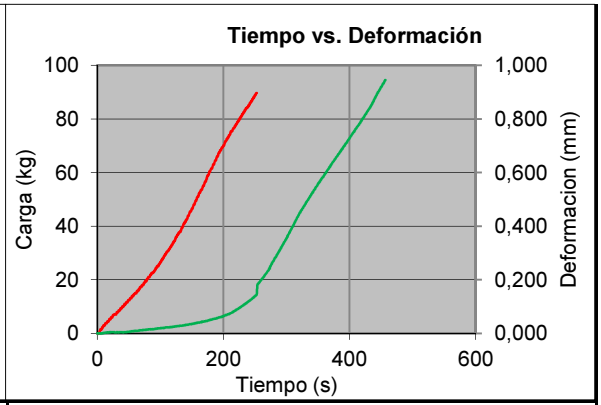
Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

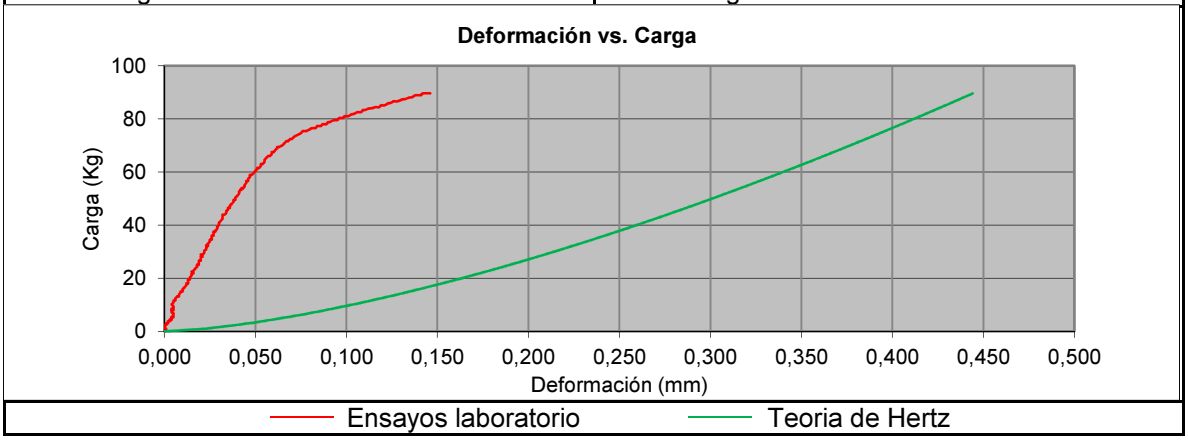
GRAFICAS AEwin	FOTOS

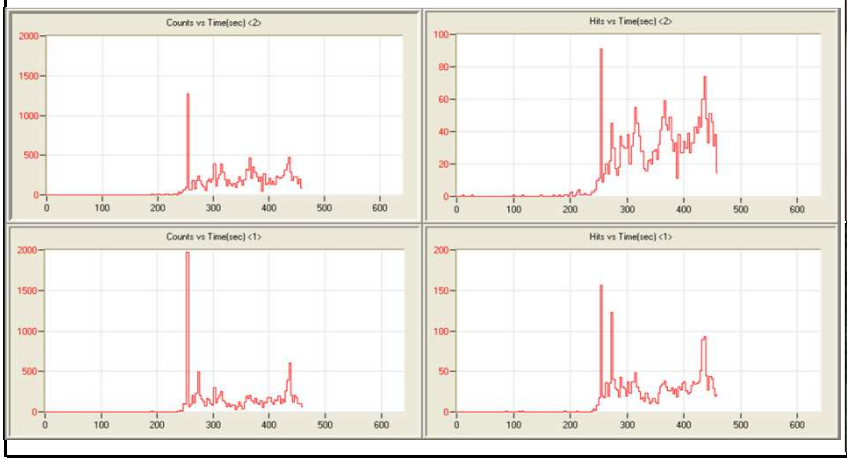


FECHA DEL ENSAYO:	14-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga monotónica, esferas saturadas
RESISTENCIA NOMINAL:	20 Mpa
DIAMTERO:	15 mm
IDENTIFICACION:	5. Esf-R2-15mm-H-2013-06-14
OBSERVACIONES:	Falla esfera inferior en 3 partes. Carga de falla = 89,6 Kg Tiempo de falla = 253 s

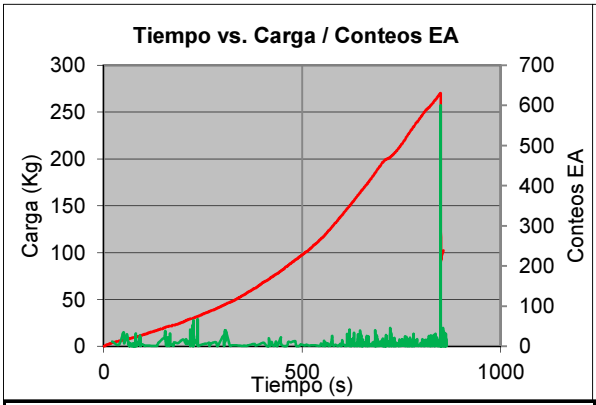


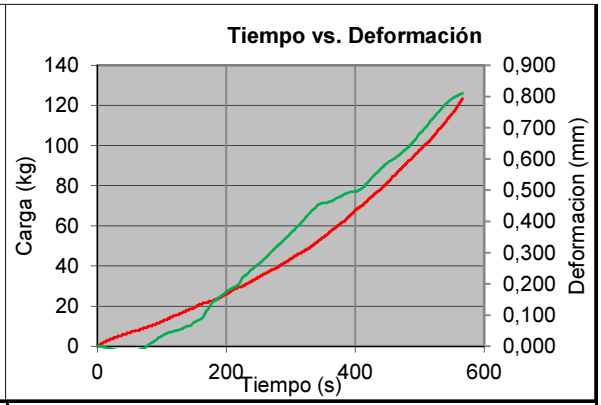


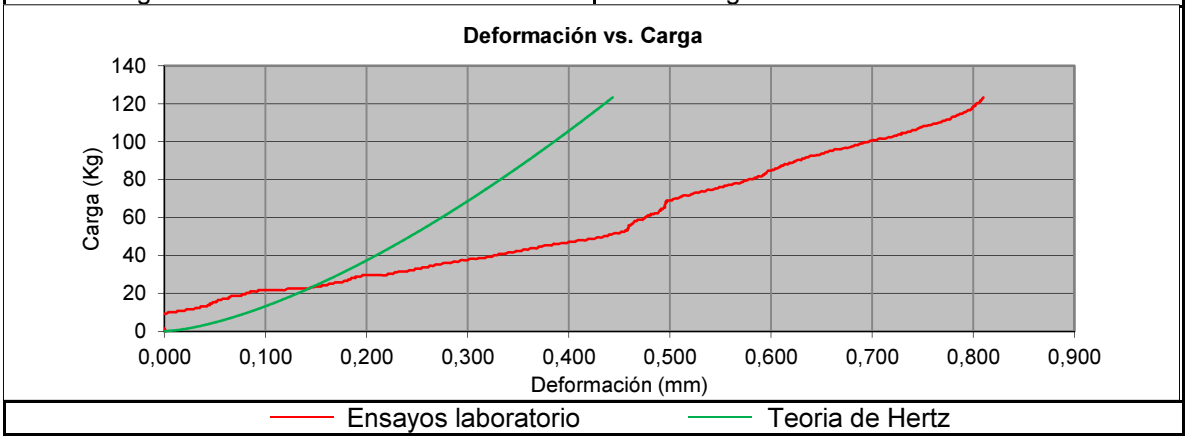


GRAFICAS AEwin	FOTOS
	

FECHA DEL ENSAYO:	15-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga dinámica, esferas secas al aire
RESISTENCIA NOMINAL:	28 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R3-25mm-S-2013-06-15
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 270,3 Kg Tiempo de falla = 849 s

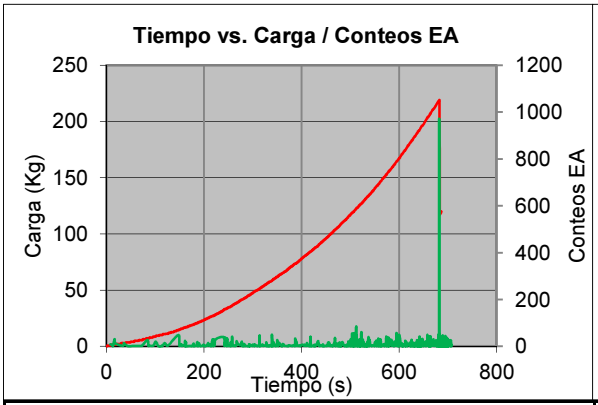


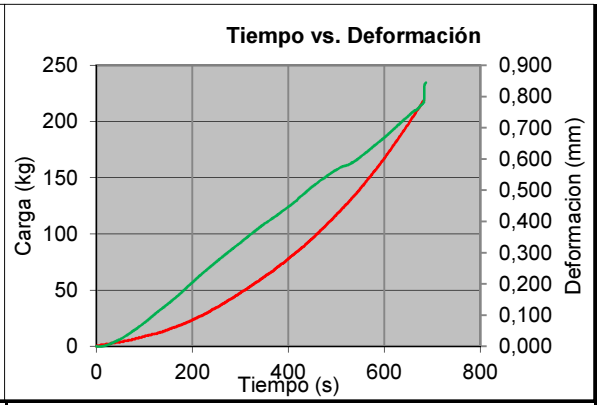




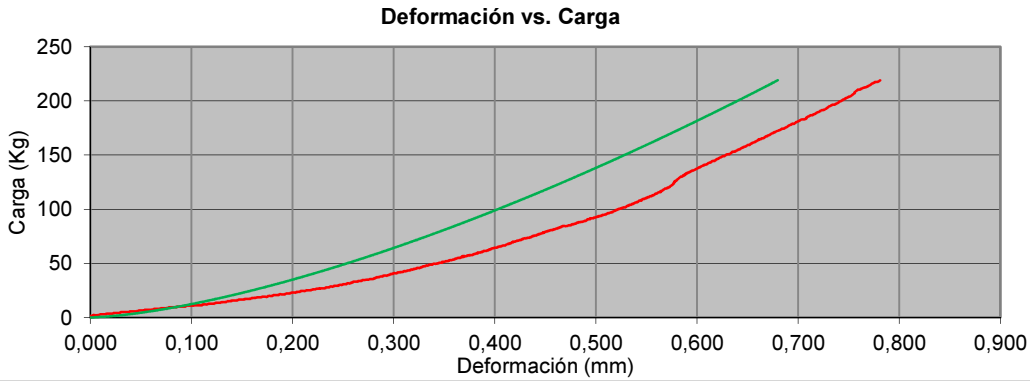
GRAFICAS AEwin	FOTOS

FECHA DEL ENSAYO:	17-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga dinámica
RESISTENCIA NOMINAL:	12 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R1-25mm-S-2013-06-17
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 3 partes. Carga de falla = 219,0 Kg Tiempo de falla = 683 s



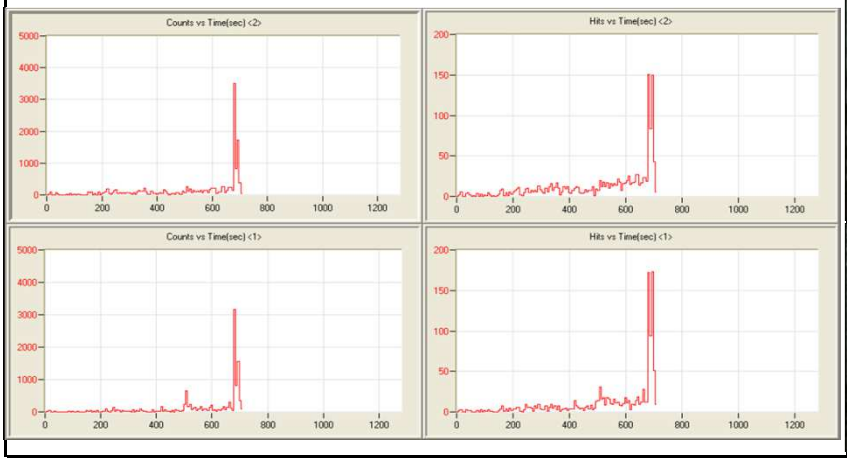


Carga — Conteos EA | Carga — Deformación

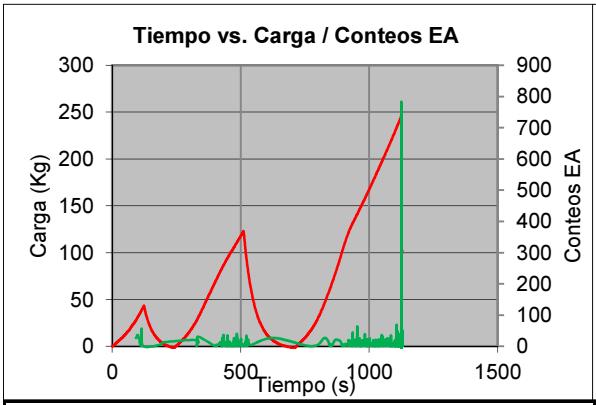


Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

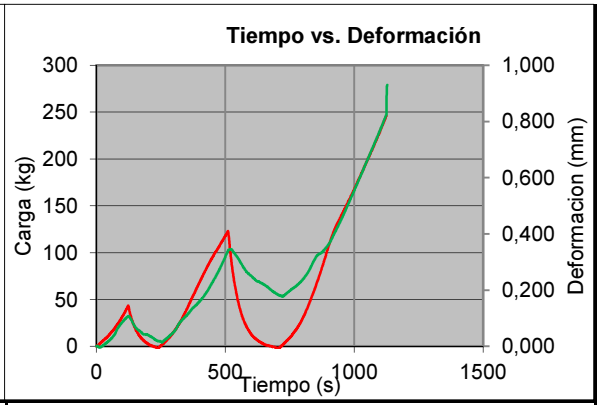
GRAFICAS AEwin	FOTOS



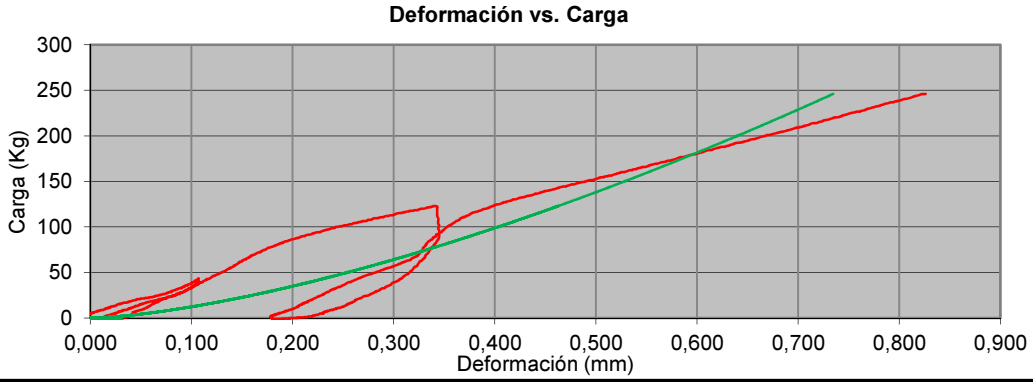
FECHA DEL ENSAYO:	17-jun-13
DESCRIPCIÓN:	Carga dinámica
RESISTENCIA NOMINAL:	12 Mpa
DIAMTERO:	25 mm
IDENTIFICACION:	1. Esf-R1-25mm-S-2013-06-17
OBSERVACIONES:	Falla esfera superior en 2 partes. Carga de falla = 246,0 Kg Tiempo de falla = 1126 s

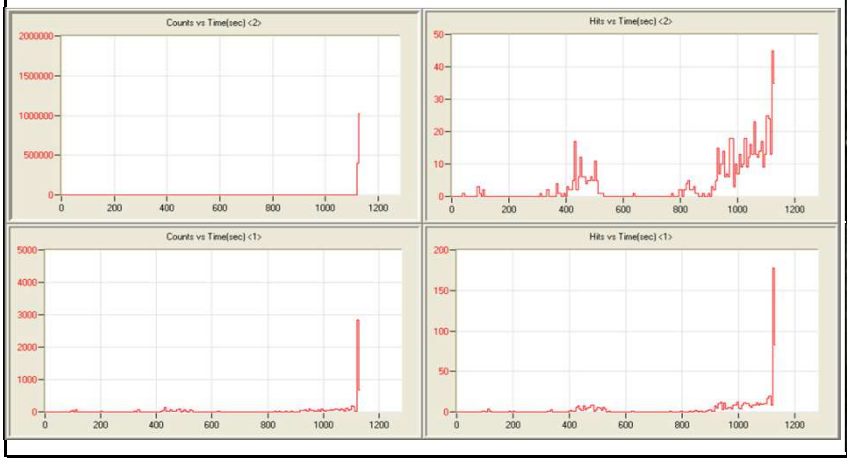


Carga — Conteos EA



Carga — Deformación



Ensayos laboratorio — Teoria de Hertz

GRAFICAS AEwin	FOTOS