

# **Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de balasto a partir de ensayos en laboratorio para suelos cohesivos**



# Abstract

The resolution of the modulus of subgrade reaction is a really important and recognized topic speaking about structural foundations analysis. With this simple parameter it is possible to describe the behavior a specific soil will have when a certain foundation establishes on it.

The common way for determining its value is by means of an essay what's know as "*Plate Load Test*", which, as well known when it's done carefully, its offers really interesting results, actually, this essay is often complicated and even risky and this could easily show wrong results and the parameters would be inaccurate.

For this reason, the previous research wants to establish the basis of an optional lab method for making a valuation that offers a reliable result of the value that the mentioned coefficient would show on the field.

For making the essay the materials were analyzed from two different locations, on which ones, we had to make load test for getting a comparison according with the lab results. In the end, as a result of the load test made in the lab, we realized that the modulus of subgrade reaction obtained from this essay is approached to be twice the coefficient that the material would show on the field.

Besides, this load test, that is proposed as an optional method for determining the modulus of subgrade reaction, at least for cohesive soils, also are exposed many comparisons of this coefficient with other essays like: CBR, Menard Pressuremeter, unconfined compression and added to this they were compared with empirical methods exposed by other authors.

# Resumen

La determinación del coeficiente de balasto o módulo de reacción del suelo es un tema de reconocida importancia sobre todo en el análisis estructural de cimentaciones. Con este sencillo parámetro es posible describir el comportamiento que un suelo específico tendrá al imponerse sobre él una determinada cimentación.

La forma común para determinar su valor es mediante un ensayo de campo que se conoce con el nombre de "*Ensayo de Placa de Carga*", el cual, si bien es cierto cuando se realiza con entera prudencia y calidad ofrece resultados de enorme interés, la realidad es que generalmente este ensayo es más bien complicado y hasta riesgoso de llevar a cabo y esto podría fácilmente significar resultados erróneos y por tanto los parámetros que de ellos se determinen serían poco confiables.

Por el motivo anterior la investigación realizada busca sentar las bases de un método alternativo de laboratorio para realizar una estimación que ofrezca un resultado fidedigno del valor que el mencionado coeficiente presentaría en el campo.

Para poder realizar el ensayo se analizó el material de dos sitios distintos, en los cuales se debió antes efectuar ensayos de carga para tener con qué comparar los resultados obtenidos en el laboratorio. Al final y, como resultado del ensayo de carga realizado en el laboratorio, se obtuvo que el coeficiente de balasto obtenido de este ensayo es aproximadamente el doble del coeficiente que el material presentaría en el campo.

Además del ensayo de carga que se propone como una manera alternativa para determinar el coeficiente de balasto, al menos para suelos cohesivos, también se expone una serie de comparaciones de este coeficiente con parámetros determinados de otros ensayos como: CBR, Presiómetro Menard, Compresión Inconfinada y, adicional a ello, se compararon los resultados obtenidos con algunos métodos empíricos que otros autores exponen.



# Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de balasto a partir de ensayos en laboratorio para suelos cohesivos



JONATHAN G. CORTÉS MENA

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN



# Contenido

<b>Prefacio</b> .....	<b>1</b>
<b>Resumen Ejecutivo</b> .....	<b>2</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
Objetivos .....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos.....	4
<b>Marco Teórico</b> .....	<b>5</b>
Coeficiente de balasto o módulo de reacción del suelo .....	5
Utilidad del coeficiente de balasto .....	5
Cimentación de Winkler .....	6
El trabajo de Terzaghi .....	6
Ensayo de placa de carga .....	7
Diferencias en la determinación del coeficiente de balasto para cimentaciones y superficies de rodamiento.....	8
<b>Planteamiento del problema</b> .....	<b>8</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
Determinación del valor numérico del coeficiente de balasto a partir del ensayo de carga.....	10
Consideraciones en el ensayo propuesto .....	11
<b>Metodología</b> .....	<b>13</b>
Ensayo de Placa de Carga .....	13
Gravedad específica .....	16
Expansión libre de los Materiales .....	17
Próctor Estándar .....	17
Ensayo CBR.....	18
Compresión Inconfinada.....	19
Presiómetro Menard .....	19
Preparación del material para el ensayo de carga uniaxial.....	20
Ensayo de carga uniaxial propuesto para la determinación del coeficiente de balasto.....	21
<b>Resultados</b> .....	<b>24</b>
Caracterización de los suelos.....	24
Gravedad específica de los materiales .....	26
Expansión libre de los materiales .....	27
Densidad en Campo .....	27
Humedad en campo .....	28
Ensayo de carga In Situ.....	29
Ensayo de carga vertical.....	29
Determinación por carga admisible ( $q_{adm} =$ $\phi q_{ult}$ ) .....	29

Determinación por la pendiente del rango pseudo-elástico.....	31
Determinación en el asentamiento de 0,127 cm	32
Determinación en el esfuerzo de 0,71 kg/cm <sup>2</sup> ..	33
Ensayo de carga horizontal.....	34
Ensayo de carga en el Laboratorio.....	37
Verificación de las características del material remoldeado.....	47
Ensayos adicionales .....	49
Ensayo Presiométrico .....	49
Compresión Inconfinada .....	51
Determinación de humedad y densidad óptima	51
Determinación del valor CBR.....	53
Otras comparaciones de KS30 con la teoría.....	57
<b>Análisis de Resultados.....</b>	<b>61</b>
Coeficiente de balasto para el tipo de suelo analizado.....	61
Ensayo de carga vertical In Situ, para el Sitio 01 .....	62
Ensayo de carga horizontal In Situ, para el Sitio 01 .....	63
Ensayo de carga horizontal In Situ, para el Sitio 02 .....	63
Ensayo de carga en laboratorio, para el material de Sitio 01 .....	64
Ensayo de carga en laboratorio, para el material de Sitio 02.....	66
Verificación de las características que el material presentó en la ejecución de los ensayos de carga realizados en el laboratorio .....	67
Guía de investigación para establecer un procedimiento de laboratorio.....	67
Ensayos adicionales .....	69
Presiómetro Ménard.....	69
Compresión Inconfinada .....	69
CBR .....	69
Determinación del coeficiente de balasto a partir del Cuadro 1 .....	70
Determinación de KS con la ecuación 6.....	71
<b>Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
Sitio 01: Higuito de Desamparados .....	72
Sitio 02: Puesto 07, P. H. Reventazón .....	73
Conclusiones Generales.....	74

# Prefacio

La presente investigación buscó determinar si es posible realizar la determinación del coeficiente de balasto, el cual es un parámetro de importancia en el análisis estructural de cimentaciones, a partir de ensayos de laboratorio. El interés de realizar esta investigación, estuvo en la dificultad que presenta el ensayo de placa de carga en el campo, del cual se obtiene el parámetro investigado en este proyecto.

Para realizar esta investigación se analizaron dos sitios, uno ubicado en Higuito de Desamparados y el otro en el Puesto 07 del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, esto con el fin de encontrar repetitividad en los métodos utilizados para determinar el coeficiente de balasto.

Además, se realizaron comparaciones con métodos expuestos en la teoría, que parten de resultados más sencillos de obtener en el laboratorio. Esto también, porque el ensayo de carga en campo solo permite evaluar el material presente bajo una profundidad de aproximadamente dos diámetros de la placa, por lo cual se hace necesario estimar algunas correlaciones entre el resultados de ensayos como CBR, resistencia a la compresión inconfiada y el del Presioméetro Ménard, por ejemplo, que permitirían evaluar más de un estrato presente en un terreno.

Por otra parte, en este trabajo se vio también la necesidad de evaluar el coeficiente de balasto mediante varias formas prácticas propuestas por otros autores; esto debido a que, aún cuando el tema ha sido tratado desde hace mucho tiempo, esto se ha realizado de forma muy teórica, sin ofrecer una manera práctica para determinar el coeficiente de balasto.

En este proyecto se buscó determinar el coeficiente de balasto a partir de un ensayo de carga que proporcionara un valor correlacionable con el obtenido en el campo, además de las

verificaciones realizadas a las propuestas teóricas para determinar su valor.

Por último quiero agradecer al Instituto Costarricense de Electricidad, especialmente al Área de Ingeniería Geotécnica, por haberme permitido realizar este proyecto en la Sub Área de Ingeniería Geotécnica.

Quiero agradecer al Ing. Marco Antonio Tapia Balladares por fungir como mi tutor y por todo el apoyo y la guía que dio durante la ejecución de este trabajo. También al Ing. Julio Delgado Sancho por la colaboración dada, siendo él mi guía y coordinador en la Institución durante el desarrollo de la práctica.





# Resumen Ejecutivo

El trabajo desarrollado en este proyecto se hizo con el fin de evaluar si es posible determinar el coeficiente de balasto de un suelo específico, partiendo del resultado obtenido de algún ensayo de laboratorio. Lo anterior está motivado en que para determinar este parámetro, se realizan por lo general ensayos de placa de carga, en los cuales, mediante la aplicación de una carga directamente al suelo con una placa de una determinada dimensión, se generan diagramas de Esfuerzo – Deformación, de los cuales se realiza la determinación de este parámetro.

Para realizar esta investigación se utilizó el material de dos sitios distintos, el primero ubicado en Higuito de Desamparados, lugar donde será instalada una torre de telefonía celular GSM; mientras que el segundo sitio se ubicó en el Puesto 07 del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, que será utilizado como una fuente de material fino (arcillas y limos), para la construcción de la presa que será desarrollada en el lugar.

La investigación se realizó ejecutando ensayos de carga en los dos sitios ya mencionados y, de esta manera, conocer el dato del coeficiente de balasto que los materiales presentaban y con esto, realizar la comparación con los resultados que posteriormente se obtuvieron en el laboratorio.

Luego de realizados los ensayos en el campo, se extrajo material de los sitios estudiados para realizar los ensayos que servirían para hacer la comparación que este trabajo buscaba. Además, se extrajeron muestras inalteradas en el campo con el fin de conocer la densidad y la humedad naturales que este material presentó.

En cuanto a los ensayos realizados en el laboratorio, el primero fue un ensayo de carga, en el cual se modelaron las condiciones de cada sitio. De este ensayo se buscó determinar un coeficiente de balasto, que fuese relacionable con el que se encontró en campo. Tras realizar tres repeticiones exitosas de este ensayo de carga

para el material del sitio de Higuito de Desamparados y, dos ensayos para el material del Puesto 07 del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, se encontró que en ambos sitios el coeficiente aumentó, siendo éste aproximadamente dos veces el encontrado en el campo. Por lo que en este trabajo se propone que en el ensayo modelado en el laboratorio, el valor obtenido de coeficiente de balasto posiblemente se deba afectar por un factor de 0,50 para obtener una estimación del que se presentaría en el campo.

En cuanto a los ensayos adicionales realizados para determinar el coeficiente de balasto de forma indirecta, en ambos sitios se intentó correlacionar el dato obtenido con el ensayo de carga con métodos teóricos propuestos que parten de ensayos como: el CBR, compresión confinada y el módulo de deformación del terreno. Los resultados obtenidos de estos métodos mostraron para el sitio de Higuito de Desamparados que, las relaciones propuestas en la teoría tanto con el CBR como con la resistencia a la compresión confinada, no mostraron resultados que se ajusten a lo que la teoría propone. En cuanto al sitio de Puesto 07, el resultado para estas dos maneras de estimar el valor del coeficiente de balasto tampoco arrojó resultados que se ajusten a la teoría, por lo cual se recomienda continuar esta investigación y, de esta forma, establecer una correlación que pueda utilizarse para determinar el coeficiente de balasto.

También en este proyecto se buscó determinar el coeficiente de balasto partiendo del módulo de elasticidad obtenido en el ensayo con el presiómetro Ménard. El resultado obtenido en el sitio de Higuito de Desamparados se aproximó considerablemente al encontrado en el ensayo de carga, mientras que en el sitio de Puesto 07 el resultado no mostró mayor similitud. La posible razón de esto se encuentra en que el ensayo presiométrico del sitio de Desamparados se efectuó al día siguiente de realizado el ensayo de

carga, mientras que para el Puesto 07 transcurrió un mes entre uno y otro ensayo.

De esta investigación se concluye que, el ensayo de carga uniaxial modelado en el laboratorio bajo las mismas condiciones que los materiales mostraron en el campo, aún cuando no proporciona directamente el valor del coeficiente de balasto obtenido de los ensayos de carga In Situ, si parece mostrar una relación que, para los dos sitios evaluados se estableció como la mitad del valor del coeficiente de balasto determinado en el laboratorio. Lo anterior evidencia una mejora en la resistencia del material, esto debido probablemente a el cuidadoso proceso de disgregación, humedecimiento y recompactación al que fue sujeto la muestra. Debido al resultado anteriormente mencionado, es que se recomienda continuar con esta investigación y determinar si el factor de ajuste 0,50, propuesto para estimar el coeficiente de balasto de campo a partir del ensayo de carga uniaxial en el laboratorio, es valido para otros tipos de suelo.

Por otra parte, también se concluye que de las formas indirectas comúnmente utilizadas, parece ser que el único método que proporciona un resultado similar al determinado del ensayo de carga en campo es el que se deriva de la correlación con el módulo de elasticidad del material, el cual se determinó indirectamente a partir del ensayo presiométrico con el presiómetro Menard. En cuanto a las correlaciones que en la teoría se exponen con valores como el CBR o la resistencia a la compresión inconfiada ( $q_u$ ), en este trabajo no se demostró que estas se cumplieran en ninguno de los materiales de los sitios evaluados. Considerando, que estimar el coeficiente de balasto mediante ensayos como CBR o resistencia a la compresión inconfiada, facilitaría su obtención y permitiría evaluar de una forma menos complicada estratos profundos, se sugiere continuar con la investigación de la relación entre coeficiente de balasto y los parámetros antes mencionados.

# Introducción

El presente trabajo trata la determinación de un importante parámetro en el análisis de la interacción que se da entre el suelo y la cimentación, el cual se conoce con el nombre de coeficiente de balasto o módulo de reacción del suelo. Básicamente este parámetro valora la forma en que un terreno reaccionará al ser impuesto sobre él, una determinada carga.

En la práctica, este parámetro se utiliza generalmente en la determinación del comportamiento que la cimentación tendrá con respecto a un determinado suelo (rígido o flexible) y, a partir de esto y de las necesidades que requiera la estructura, realizar el dimensionamiento del cimientto.

Con la investigación que aquí se presenta se buscó establecer la forma más adecuada para determinar el coeficiente de balasto a partir de la interpretación del gráfico Esfuerzo – Asentamiento obtenido del ensayo de carga *In Situ* debido a que, aún cuando el tema que en este trabajo se expone se ha tratado desde mucho tiempo atrás por investigadores como Terzaghi, por ejemplo, esto se ha hecho de forma muy teórica y no existe un consenso en la manera práctica de elegir el coeficiente que un determinado suelo presenta. Por otro lado realizar el ensayo de carga que se requiere para determinar este parámetro es bastante complicado y riesgoso, por lo cual la investigación realizada busca proponer o, al menos intenta, sentar las bases de un ensayo de carga controlado en el laboratorio que permita hacer una estimación del valor del coeficiente de balasto en suelos cohesivos homogéneos. Además, se tratarán de comprobar algunos métodos indirectos que la teoría propone para realizar la estimación del parámetro ya mencionado.

## Objetivos

### Objetivo General

- Aplicar los procedimientos de ensayos de campo establecidos para determinar el coeficiente de balasto en suelos y comparar los resultados con los de ensayos de laboratorio representativos, a partir del marco teórico existente y de datos experimentales, utilizando equipos que se encuentran en la Sub Área de Experimentación Geotécnica (SAEG) del Instituto Costarricense de Electricidad.

### Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades índice de los materiales seleccionados, mediante varios ensayos de caracterización como: granulometrías, límites de Atterberg, gravedad específica y expansión libre.
- Realizar el ensayo de Carga contra Asentamiento *In Situ* (ensayo de placa de carga) para determinar el desplazamiento vertical del terreno y consecuentemente el coeficiente de balasto, en sitios seleccionados.
- Realizar el ensayo de compresión unidimensional a muestras remoldeadas de los suelos analizados en campo, para determinar algunos parámetros consecuentes como la carga última del material y el coeficiente de balasto en laboratorio.
- Establecer una relación con la cual se logre estimar el valor del coeficiente de balasto en campo, a partir de los ensayos en Laboratorio.
- Establecer relaciones entre el valor del coeficiente de balasto y los parámetros obtenidos de otras pruebas como por ejemplo: el módulo de deformación (presiómetro Ménard), CBR y resistencia a la compresión confinada ( $q_u$ ).

# Marco Teórico

## Coeficiente de balasto o módulo de reacción del suelo

El coeficiente de balasto es una relación conceptual entre la presión que es ejercida sobre el suelo y la deformación sujeta a dicha presión, que en el caso de ensayos de compresión en suelos es en realidad un asentamiento. Este coeficiente es ampliamente utilizado en el análisis estructural de los miembros de las fundaciones de una estructura. Se usa para zapatas continuas, losas y varios tipos de pilotes. **(Bowles, 1997)**. Esta relación posee la siguiente ecuación base,

$$K_s = \frac{q}{\delta} \quad \dots\dots\dots (\text{ec.1})$$

donde:

- $K_s$  = Coeficiente de balasto.
- $q$  = Esfuerzo que se ejerce sobre el suelo.
- $\delta$  = Asentamiento producto del esfuerzo aplicado.

Para obtener estos valores lo ideal es realizar ensayos de placa de carga (en adelante solo se le denominará como ensayo de carga), en los cuales se obtienen pares ordenados ( $q$ ,  $\delta$ ) para así lograr conformar gráficos dispersión como los que se presentan en la Figura 1.

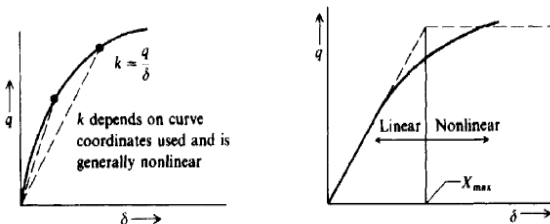


Figura 1. Determinación del coeficiente de balasto a partir de gráficas de Esfuerzo - Asentamiento. *(Bowles, 1997)*.

Es evidente notar en la figura anterior que el valor de  $K_s$  depende de si este es tomado como un módulo tangente o secante a la curva de los

gráficos y por lo tanto depende también de la ubicación en la curva del par ordenado ( $q$ ,  $\delta$ ) donde se evalúe, por lo cual el criterio con el que será determinado a partir del ensayo de carga es un tema que se retomará con detalle más adelante.

## Utilidad del coeficiente de balasto

En el análisis estructural de cimentaciones el uso de este parámetro es de importancia al momento de determinar si una cimentación dada presentará un comportamiento rígido o flexible cuando sea impuesta sobre un determinado suelo. Para realizar la distinción entre ambos comportamientos el Código de Cimentaciones de Costa Rica **(2009)**, propone la siguiente expresión, que en caso de cumplirse concluye que el cimiento tendrá un comportamiento rígido:

$$L < \frac{1}{4} \frac{\pi}{\sqrt{\frac{K_s B}{4E_c I}}} \quad \dots\dots\dots (\text{ec.2})$$

donde:

- $L$  = Dimensión máxima del Cimiento.
- $B$  = Ancho del cimiento.
- $E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto.
- $I$  = Momento de inercia de la sección transversal del cimiento.
- $K_s$  = Módulo de reacción vertical del suelo o coeficiente de Balasto.

Por otro lado, el coeficiente de balasto puede ser utilizado en el análisis estructural de fundaciones tanto rígidas como flexibles; pero como en el caso de cimentaciones rígidas existen métodos de tensiones lineales más simplificados, se podría decir que los métodos de análisis utilizando este coeficiente son aplicados casi exclusivamente para cimentaciones flexibles.

## Cimentación de Winkler

Para el análisis de cimentaciones flexibles, se pueden utilizar como alternativa los métodos numéricos, que aún cuando conlleva mucho trabajo, con el desarrollo tecnológico actual ofrecen resultados que contemplan a un mismo tiempo gran cantidad de variables, haciendo que el resultado final sea bastante confiable. (Delgado, 1993).

Por otra parte, el coeficiente de balasto ( $K_S$ ), también puede ser utilizado en el análisis estructural de cimentaciones flexibles. En este tipo de análisis por lo general se visualiza el terreno sobre el que se impondrá la estructura como un conjunto infinito de resortes, como se muestra en la Figura 2, los cuales tienen por constante de elasticidad el coeficiente de balasto  $K_S$ . El método está basado en la hipótesis de que la presión en un punto determinado del terreno está ligada a la deformación en el mismo punto por la relación expuesta en la ecuación 1, en la cual  $K_S$  tiene dimensiones de fuerza por unidad de volumen. (Das, 2006).

La razón por la cual a este parámetro suele llamársele coeficiente de balasto, está en que uno de sus primeros empleos fue en el análisis del reparto de cargas en vías de ferrocarril, donde al material granular sobre el cual se colocan los transversales de las vías se le denomina balasto. También a este análisis se le conoce con el nombre de cimentación de *Winkler*, quien fue uno de los precursores de este tipo de estudios.

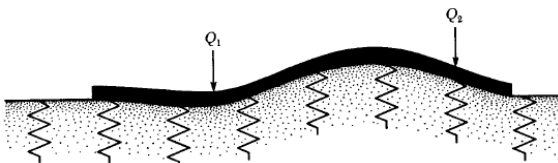


Figura 2. Cimentación flexible o cimentación de Winkler. (Das, 2006).

Pero, por tratarse de un método tan simplificado, existen varias objeciones, como por ejemplo (Requena, 2007):

- En el caso de cimentaciones superficiales, el modelo supone que cada punto del suelo se comporta independientemente de las cargas existentes en sus alrededores, lo cual no ocurre en la realidad, porque la distribución de las cargas varía debido a la deformación de la viga.

- La deformación del cimiento hace que los pilares desciendan con él, por tanto “la viga no puede ser concebida en absoluto como una pieza con carga igual a la reacción del terreno y apoyada en los pilares, sino apoyada en el terreno y cargada por los pilares.
- El valor del módulo de balasto no es función exclusiva del terreno, también depende de las características geométricas de la cimentación y de la estructura que ésta sostiene, por lo que se hace compleja la extrapolación de los resultados de los estudios geotécnicos a un modelo de cálculo fiable.

## El trabajo de Terzaghi

Karl Terzaghi publicó en 1955 un trabajo titulado “*Evaluation of coefficients of subgrade reaction* (Evaluación del coeficiente de balasto)”.

En este documento Terzaghi expuso que la teoría del coeficiente de balasto se basa en las siguientes hipótesis:

- La relación  $K_S$ , aún cuando se trata de una razón entre la presión de contacto ( $q$ ) y su correspondiente asentamiento ( $\delta$ ), esta relación es independiente de la presión ( $q$ ), es decir, para un material se debe determinar un solo valor  $K_S$  a partir del comportamiento que refleja el ensayo de carga y no varios valores para diferentes presiones, en un mismo suelo.
- El coeficiente de balasto vertical  $K_S$  tiene el mismo valor para cada punto de la superficie de contacto para la presión ( $q$ ) a la cual es sometida la fundación. Si la subrasante está formada por arcilla firme, el coeficiente de balasto horizontal también tiene el mismo valor  $K_h$ , para cada punto de la superficie de contacto.

En el estudio mencionado, Terzaghi manifestó que el valor numérico del coeficiente de balasto disminuye conforme aumenta el ancho ( $B$ ) de la cimentación. Además, estableció valores de este parámetro estimados a partir de ensayos de placa de carga, haciendo uso de placas cuadradas de 1 ft<sup>2</sup> (lo que en unidades del SI equivaldría a una placa de 30 cm x 30 cm aproximadamente) y por tal motivo presentó las siguientes relaciones para

extrapolar el valor de  $K_S$  obtenido en el ensayo de carga a una cimentación real:

**Para suelos arenosos:**

$$K = K_{S30} \left( \frac{B + 30}{2B} \right)^2 \quad \dots\dots (ec.3)$$

**Para suelos arcillosos:**

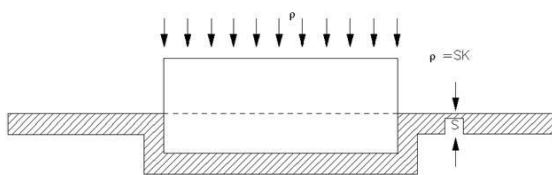
$$K = K_{S30} \left( \frac{30}{B} \right) \quad \dots\dots\dots (ec.4)$$

donde:

- $K$  = Coeficiente de balasto de la cimentación de ancho  $B$  ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ).
- $B$  = Ancho de la cimentación (cm).
- $K_{S30}$  = Coeficiente de balasto de la placa de 30 cm x 30 cm ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ).

### Ensayo de placa de carga

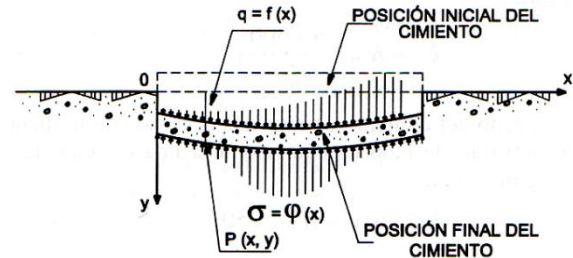
La obtención de los pares ordenados con que se define el gráfico de Esfuerzo - Asentamiento, se hace mediante ensayos de carga. Con este ensayo se busca además de determinar la capacidad de carga última ( $q_{ult}$ ) del material, obtener el coeficiente de balasto ( $K_S$ ). Para esto, el ensayo de carga debe ajustarse al modelo propuesto por Winkler, que si bien es cierto, se utiliza generalmente para análisis de cimentaciones flexibles, para la determinación del coeficiente de balasto se debe asegurar que en el ensayo la placa se mantenga rígida, provocando que esta se asiente de forma equilibrada en toda su superficie, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3. Asentamiento de la placa debido a una determinada presión según el modelo de Winkler.**  
(Jiménez, 1980)

Por otra parte, si no se consigue proporcionar la rigidez necesaria para garantizar que el asentamiento obtenido será prácticamente

el mismo en toda la superficie de la placa, evaluar el coeficiente de balasto tendrá, no solo el inconveniente de que en la placa se presentan diferentes asentamientos, si no también, que el reparto de esfuerzos bajo ella no será el mismo.



**Figura 4. Comportamiento teórico de un cimiento o placa flexible.** (Calavera, 2000)

Además, en el apartado anterior (“El trabajo de Terzaghi”) se indica que la obtención de los valores del coeficiente de balasto que él propuso, fueron estimados realizando ensayos de carga con placas cuadradas de 30 cm x 30 cm, pero por otro lado, este ensayo está normado por ASTM bajo la designación D-1194, en la cual se menciona que éste se realiza con placas circulares que deben ir en un rango de 305 mm a 762 mm de diámetro, con un espesor de 25 mm como mínimo; razón por la cual comúnmente estos ensayos se realizan con este tipo de placas en lugar de las cuadradas utilizadas por Terzaghi.

Por lo general, efectuar los ensayos de placa de carga es complicado y se hace más favorable realizarlos con placas pequeñas, puesto que disminuyen la carga necesaria para provocar un determinado esfuerzo en el terreno. Además, aún cuando se utilizan placas pequeñas, hacer que estas sean tan rígidas como para obtener un asentamiento constante en toda la placa, como el modelo de Winkler sugiere, es muy difícil; una de las formas más usuales de buscar obtener esta rigidez es colocando placas concéntricas de mayor a menor diámetro como se muestra en la Figura 5. Cabe mencionar que cuando se usa la conformación piramidal de tres placas de la Figura 5, la cual está normada como se mencionó por ASTM en la designación antes citada, las mediciones del asentamiento se hacen sobre la placa que entra en contacto directo con el terreno utilizando tres deformímetros ubicados en ángulos de 120° uno con respecto al otro, para obtener un promedio del asentamiento registrado en la placa. (Bowles, 1997).

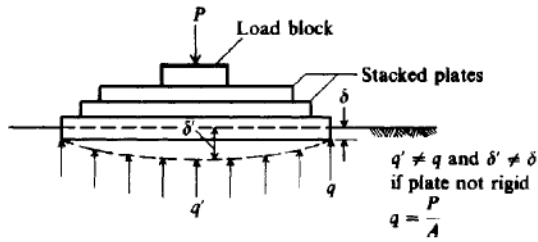


Figura 5. Conformación de placas necesaria para mantener la rigidez de la placa de carga. (Bowles, 1997).

Para realizar una prueba de placa de carga se excava una trinchera con una profundidad igual al desplante que tendrá el cemento y con un ancho mínimo de cuatro diámetros de la placa utilizada en el ensayo como se aprecia en la Figura 6, para así garantizar que la falla podrá manifestarse libremente en la superficie (como en los casos de fallas por cortante general y cortante local) y esta no quede confinada. (Das, 2006).

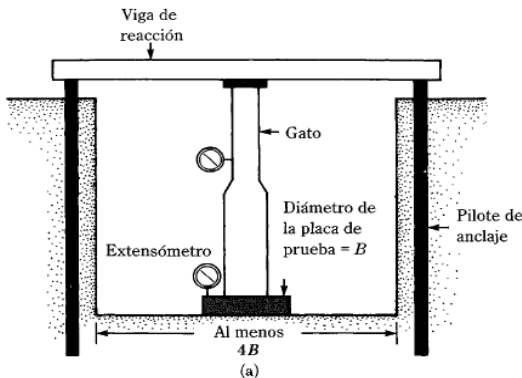


Figura 6. Esquemática de la trinchera que se debe conformar en un ensayo de placa de carga para cimentaciones superficiales. (Das, 2006)

## Diferencias en la determinación del coeficiente de balasto para cimentaciones y superficies de rodamiento

Dependiendo de la necesidad para la cual se debe evaluar el coeficiente de balasto, tanto el ensayo de carga como la interpretación de los resultados para su obtención pueden variar. Por ejemplo, la necesidad de construir una trinchera como la mencionada en el apartado anterior se hace solo obligatoria para los estudios de una cimentación superficial, puesto que en el caso de superficies de

rodamiento lo común es eliminar solamente la capa orgánica presente en el sitio y realizar el ensayo de forma muy superficial con el fin de evaluar su reacción ante las cargas y si es competente para formar parte de la estructura de una vía o si se hace necesario reemplazarla.

Por otro lado, la determinación del coeficiente de balasto para cimentaciones superficiales se hace mediante la ecuación 1, considerando  $q$  como la carga a la cual estará sometido el terreno por la fundación que se impondrá en él, (ONN, Cuba, 1998). Y en cuanto a superficies de rodamiento, la determinación del coeficiente de balasto se basa también con la ecuación 1, pero en este caso algunos autores como Crespo (2004), Leoni (2005), entre otros, indican que se deben tomar los valores del par ordenado en la curva Esfuerzo - Asentamiento donde se alcanza un asentamiento de 0,127 cm, es decir se determina en el par ordenado (0,127,  $q_{0,127}$ ).

## Planteamiento del problema

Bowles (1997), comentó que el uso del coeficiente de balasto, y por tanto la teoría de Winkler, no es aceptado por gran número de profesionales que prefieren el uso de parámetros como el módulo de deformación del material ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\mu$ ) en análisis de elementos finitos. A criterio del autor antes mencionado, los análisis basados en el uso del coeficiente de balasto son preferibles, puesto que aún no se cuenta con herramientas capaces de determinar de forma precisa  $E$  y  $\mu$  y, por otro lado, el uso del coeficiente de balasto presenta mayor simplicidad en su manejo y una enorme economía en el tiempo de cálculo. (Bowles, 1997).

Pero, aún cuando se tiene establecido que la determinación del valor del coeficiente de balasto se hace a partir de la curva Esfuerzo - Asentamiento obtenida del ensayo de carga, elegir un valor numérico de éste en la mayor parte de las ocasiones no se hace fácil. Lo anterior se debe principalmente a que en teoría este corresponde a la pendiente de la fase elástica que presentan los datos graficados del ensayo de carga, pero por lo general en suelos dicha fase se hace poco perceptible y determinar la magnitud de su pendiente es complicado, lo que acaba en dejar mucho de su determinación en el criterio del especialista que analice los datos obtenidos del ensayo de placa de



carga. Por tal motivo, en este trabajo se evaluarán varios criterios encontrados en la literatura para establecer el mencionado coeficiente.

Como se ha citado ya en repetidas ocasiones, la forma de obtener el valor del coeficiente de balasto para un suelo determinado es mediante un ensayo de carga, el cual en realidad es bastante complicado de realizar, sin mencionar lo económicamente costoso y riesgos que puede resultar dependiendo del sitio y el material que se esté evaluando. Este es el principal motivo por el cual se ha llevado a cabo esta investigación, en la que se busca proponer un método para la determinación de este parámetro mediante un ensayo que se pueda llevar a cabo en el laboratorio. El ensayo que se pretende realizar es también un ensayo de carga en el que se buscará obtener un valor de coeficiente de balasto relacionable con el que debe presentarse en el campo para un determinado material.

## Antecedentes

La forma de presentar el valor del coeficiente de balasto para un determinado suelo es colocando un subíndice que hace alusión a la dimensión de la placa con la que fue realizado el ensayo de carga; por ejemplo, si se realizó el ensayo con una placa de 30 cm o 76 cm de diámetro, en los informes el dato obtenido se presenta como  $K_{s30}$  y  $K_{s76}$ , respectivamente y, su valor para una cimentación de dimensiones reales se extrapola con el uso de las ecuaciones (3) ó (4) dependiendo del tipo de material que se trate. Lo anterior se menciona debido a que en la literatura por lo general se encuentran valores del coeficiente de balasto  $K_{30}$ , relacionados con algunas características más sencillas de evaluar (por ejemplo CBR o  $q_u$ ). En el siguiente cuadro se presentan algunos valores propuestos del coeficiente de balasto para distintos tipos de suelo.

Cuadro 1. Valores propuestos del Coeficiente de Balasto $K_{s30}$		
TIPO DE SUELO	Módulo de Deformación $E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de Balasto $K_{s30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )
Suelo fangoso	11,00 a 33,00	0,50 a 1,50
Arena sea o húmeda, suelta ( $N_{SPT}$ 3 a 9)	0,16H a 0,48H	1,20 a 3,60
Arena seca o húmeda, media ( $N_{SPT}$ 9 a 30)	0,48H a 1,60H	3,60 a 12,00
Arena seca o húmeda, densa ( $N_{SPT}$ 30 a 50)	1,60H a 3,20H	12,00 a 24,00
Grava fina con arena fina	1,07H a 1,33H	8,00 a 10,00
Grava media con arena fina	1,33H a 1,60H	10,00 a 12,00
Grava media con arena gruesa	1,60H a 2,00H	12,00 a 15,00
Grava gruesa con arena gruesa	2,00H a 2,66H	15,00 a 20,00
Grava gruesa firmemente estratificada	2,66H a 5,32H	20,00 a 40,00
Arcilla blanda ( $q_u$ 0,25 a 0,50 kg/cm <sup>2</sup> )	15 a 30	0,65 a 1,30
Arcilla media ( $q_u$ 0,50 a 2,00 kg/cm <sup>2</sup> )	30 a 90	1,30 a 4,00
Arcilla compacta ( $q_u$ 2,00 a 4,00 kg/cm <sup>2</sup> )	90 a 180	4,00 a 8,00
Arcilla dura ( $q_u$ 4,00 a 10,00 kg/cm <sup>2</sup> )	180 a 480	8,00 a 21,00

(Jiménez, 1980).

donde:

H = Nivel de Desplante.

Además, otra manera de estimar un valor para el coeficiente de balasto es mediante la aplicación de teorías elásticas que lo relacionan con  $E$  y  $\mu$ , o también con ecuaciones empíricas que lo relacionan con otros parámetros, como la presión admisible ( $q_a$ ) o la resistencia a la compresión

inconfiada ( $q_u$ ), por ejemplo. Algunas de estas relaciones son las siguientes, (Bowles, 1997):

### Fórmula de Vesic

$$K_s = \frac{E}{B(1 - \mu^2)} \dots\dots\dots (\text{ec.5})$$

### Fórmula de Bowles

$$K_s = 40(F.S.)q_a \text{ (KN/m}^3\text{)} \dots\dots\dots (\text{ec.6})$$

### Fórmula de Terzaghi

$$K_{s30} = 1,645 q_u \text{ (kg/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (\text{ec.7})$$

donde:

- $K_s$  = Coeficiente de Balasto.
- $E$  = Módulo de deformación del material.
- $B$  = Ancho de la base.
- $\mu$  = Módulo de Poisson.
- $F.S.$  = Factor de seguridad.
- $q_a$  = Carga admisible (kPa).
- $q_u$  = Resistencia a la compresión Inconfinada.

Por otro lado, también se pueden encontrar nomogramas y gráficos en los que relacionan el valor del coeficiente de balasto con el tipo de suelo y su valor de CBR, como los que se presentan en el Anexo 1 de este documento.

Entre las posibles limitaciones que pueden presentar los métodos para determinar el coeficiente de balasto presentados anteriormente, se encuentran los siguientes:

- La ecuación 5 depende de una buena estimación o aproximación del valor de  $E$ , el cual se puede estimar a partir de un ensayo Presiométrico.
- La ecuación 6, según su autor, parte del hecho de que se estima la falla del material al momento en que la placa del ensayo de carga penetra 25,4 mm (1 in.). Pero si la falla se da antes de alcanzar esta penetración, deberían hacerse variaciones en el factor de 40 que dependen de dicha penetración. Bowles en su libro "*Foundation Analysis and Design*" indica que el factor 40 empleado en la ecuación 6 se hace razonablemente conservador y deja la opción de utilizar valores más bajos.
- La ecuación 7 es válida para determinar valores del coeficiente de balasto que serían calculados partiendo de cargas menores a la mitad de la capacidad última del material, lo

cual, como se mostrará más adelante hace difícil la comparación entre el coeficiente de balasto obtenido mediante esta ecuación con el obtenido a partir del ensayo de carga.

## Determinación del valor numérico del coeficiente de balasto a partir del ensayo de carga

Para establecer un valor numérico para el coeficiente de balasto a partir de la curva obtenida en el ensayo de carga existen diversos criterios, los cuales se basan en la hipótesis de que los suelos ante cargas bajas presentan un comportamiento "elástico" y, por tanto, los esfuerzos aplicados a la masa de suelo que entren en ese rango serán directamente proporcionales a su respectiva deformación. Pero en repetidas ocasiones los valores obtenidos por criterios distintos en una misma curva de Esfuerzo - Asentamiento son poco precisos, por lo cual se presentan los siguientes criterios, elegidos en este proyecto porque son, según el autor, los que ofrecen una manera más puntual y concisa de obtener el valor del coeficiente de balasto.

### Esfuerzo que impondrá la cimentación al suelo

Para cimentaciones, éste podría considerarse como el método correcto de determinar el coeficiente de balasto. Lo anterior debido a que, conociendo la magnitud de la carga que la cimentación de una determinada estructura impondrá sobre el terreno, podría ésta ser relacionada con su respectivo valor de asentamiento obtenido de la curva de Esfuerzo - Asentamiento e introduciendo esos dos datos en la ecuación 1, se determina el valor del coeficiente de balasto para la situación en análisis.

### Pendiente de la curva de Esfuerzo - Asentamiento

Como se mencionó, la determinación del coeficiente de balasto se realiza partiendo de la hipótesis de que la curva de Esfuerzo - Asentamiento presentará una fase pseudo-elástica que se manifiesta con una tendencia lineal al inicio del gráfico. Esta es la razón por la que algunos

especialistas mencionan que la magnitud de la pendiente de la fase pseudo-elástica del gráfico sería el coeficiente de balasto del suelo en análisis.

Pero como en la mayor parte de las ocasiones una tendencia lineal perfecta en la curva no es lo que en realidad se presenta, se traza una línea paralela a los puntos que más se ajusten a la linealidad que se pretende encontrar y utilizar la magnitud de la pendiente de esta línea como el valor del coeficiente de balasto. (ICC-UCV, 2006). En la Figura 7, se muestra la corrección realizada a dos curvas determinadas a partir de ensayos de carga, en ambos casos la curva obtenida del ensayo se muestra como una línea continua y, la corrección a esta, de donde se obtiene el coeficiente de balasto, se presenta como una línea discontinua. Cabe aclarar que la línea de ajuste debe interceptar el origen del gráfico, sin importar si esta al ser trazada queda sobre la curva real o bajo ella.

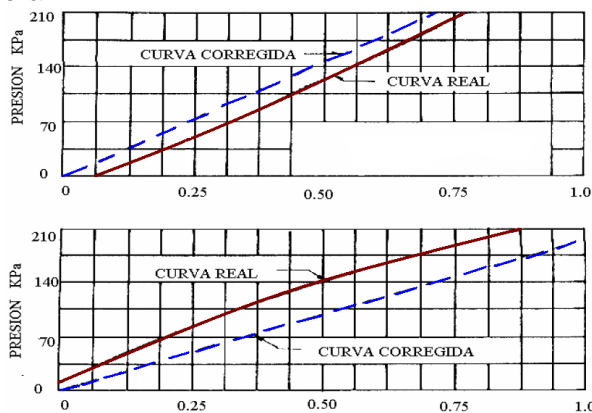


Figura 7. Estimación de la tendencia lineal del la curva Esfuerzo - Asentamiento. (ICC-UCV, 2006).

### Valor establecido de Esfuerzo o Asentamiento

En la determinación del módulo de reacción para subrasantes, es común encontrar que éste se defina como un módulo secante a la curva de Esfuerzo - Asentamiento. Es decir, se establece su valor como la pendiente de la recta que une el origen del gráfico y un punto determinado, que en ocasiones se trata del par ordenado compuesto por el esfuerzo impuesto en el terreno para ocasionar un asentamiento de 0,127 cm y este asentamiento. (Crespo, 2004).

Además, otro criterio para establecer el coeficiente de balasto a partir de un valor fijo, está en determinarlo de la relación entre una

carga de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$  y su respectivo asentamiento. (ICC-UCV, 2006).

En este criterio se indica que si el valor del coeficiente de balasto es menor a  $14,50 \text{ kg/cm}^3$  (o lo que es igual  $5,70 \text{ kg/cm}^3$  con una placa de 76 cm), el valor obtenido directamente con la ecuación 1, se fija como el coeficiente de balasto del material; pero si al contrario es mayor o igual a  $14,50 \text{ kg/cm}^3$ , se deberá elaborar la curva de Esfuerzo - Asentamiento y determinar el coeficiente de balasto a partir de la zona del gráfico que presente un comportamiento lineal, que se espera se encuentre entre los esfuerzos de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$  y  $2,14 \text{ kg/cm}^2$ . (ICC-UCV, 2006).

Para este criterio, al igual que el anterior, aún cuando varios autores los mencionan, no explican con claridad de dónde se determinaron. Probablemente, la razón por la cual se estima el valor del coeficiente de balasto en el par ordenado que contiene la carga de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$  o, en el asentamiento de 0,127 cm, está en que por lo general estos puntos se sitúan al inicio de los gráficos de esfuerzo deformación, donde aún el material se encuentra en su fase pseudo-elástica y además, con equipos para ensayo de carga no muy sofisticados es posible medirlos.

### Consideraciones en el ensayo propuesto

Como se explicará más adelante en este informe, el ensayo que se propone para poder determinar el coeficiente de balasto de un material parte de la reproducción de un espécimen de de aproximadamente  $0,106 \text{ m}^3$ , para llevar a cabo sobre él un ensayo de carga uniaxial y, de esta forma, elaborar el diagrama de Esfuerzo - Asentamiento y determinar de ahí el coeficiente mencionado.

En el campo lo que ocurre es básicamente la aplicación de un esfuerzo sobre una masa infinita de suelo que, sin embargo, solo se verá afectada a una determinada profundidad y distancia desde el centro de la placa.

Para el ensayo realizado en el laboratorio, fue necesario determinar la dimensión que la placa que se utilizó debía tener, para que el bulbo de presión generado por la aplicación del esfuerzo, quedaran confinados dentro del molde sin tocar las apedes de este.



# Metodología

En este apartado se describirán los ensayos realizados tanto en los dos sitios elegidos como al material extraído de ellos para encontrar la relación que tiene el coeficiente de balasto determinado en el campo con el mismo parámetro, pero determinado en el laboratorio con el ensayo propuesto en este proyecto.

## Ensayo de Placa de Carga (ASTM, D-1194)

Para la determinación del valor de coeficiente de balasto se realizaron ensayos de carga en cada uno de los sitios seleccionados, utilizando una conformación similar a la mostrada en la Figura 5, empleando placas de 15 cm y 20 cm para proporcionar rigidez al conjunto y una de 30 cm, usada para aplicar la presión directamente al suelo. El motivo por el cual fue elegida la conformación mencionada estuvo en que se buscaba contar con una forma de respaldar los resultados obtenidos en el ensayo y en la literatura existente sobre el tema, que presenta mayoritariamente valores del coeficiente de balasto determinados a partir de placas similares a la de 30 cm.



Figura 9. Placas utilizadas en los ensayos de placa de carga en campo.

El primer sitio donde se realizó este ensayo fue Higuito de Desamparados (en adelante *Sitio 01*), lugar donde se colocará una Torre Celular de la tecnología GSM. En ese sitio se excavó una trinchera con ayuda de un *Backhoe* a la profundidad donde se prevé que estará el nivel de desplante de la Torre. La trinchera se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Trinchera conformada por el *Back Hoe* para realizar el ensayo.

Dentro de la mencionada trinchera se planeo realizar tanto un ensayo horizontal como uno vertical utilizando la ya antes mencionada placa de 30 cm de la Figura 9.

La ejecución del ensayo horizontal fue exitosa, ya que se apoyó el equipo en las paredes de la trinchera colocando una placa de mayor dimensión (45 cm) en la cara en que no fueron medidas las deformaciones, esto por motivo de que al ser menor el área donde se midieron las deformaciones, el esfuerzo aplicado era mayor al aplicado en la otra cara, garantizando que la falla se daría primero en la pared donde se realizó el ensayo, como se aprecia en la Figura 11. De este ensayo se obtuvo un dato relacionable con  $K_S$ , que para este caso es el valor del coeficiente de balasto horizontal  $K_h$ , el cual se relaciona con el coeficiente de balasto vertical mediante la

siguiente correlación propuesta por (Terzaghi, 1955):

$$K_s = 1,5 K_h (kg/cm^3) \dots\dots\dots (ec.8)$$



Figura 11. Equipo del ensayo de placa horizontal colocado dentro de la trinchera, Sitio 01-Higuito de Desamparados.

Por otro lado el ensayo vertical no fue posible concluirlo. El problema se generó debido a que se utilizó el mismo *backhoe* que conformó la trinchera donde se realizó el ensayo como reacción a los esfuerzos aplicados por el gato hidráulico, pero éste no fue suficiente y el gato hidráulico levantó el *backhoe* antes de que el suelo fallará, por lo que se debió buscar otra alternativa para realizar el ensayo de carga vertical.

La mencionada alternativa consistió en conformar en una de las paredes de la trinchera un “*nicho*”, que se localizó en la parte más baja de la pared escogida. La idea de conformar el mencionado nicho estuvo en utilizar la propia masa de suelo que quedó sobre la parte superior de este como la reacción necesaria al esfuerzo provocado por el gato hidráulico, para llevar a cabo el ensayo de carga. Esta solución solo funcionaría aplicando cargas más altas en la base del nicho de las que se generaron en la parte superior. Para lograr esto se colocó una placa cuadrada de 30 cm x 30 cm en la parte superior y una placa de 12,5 cm de diámetro en la parte inferior como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Equipo del ensayo de placa colocado en el nicho, Sitio 01-Higuito de Desamparados.

La Figura 13 muestra el nicho conformado en la pared de la trinchera para realizar el ensayo de carga vertical.



Figura 13. Equipo del ensayo de placa colocado en el nicho, Sitio 01-Higuito de Desamparados.

En tanto para el segundo sitio, que estuvo ubicado en el Puesto 07 del P.H. Reventazón (en adelante *Sitio 02*), el cual será utilizado para el préstamo de material fino para la presa que se construirá en el proyecto, no fue necesaria la excavación de una trinchera por motivo de que se realizó el ensayo excavando un nicho similar al conformado en el Sitio 01, pero esta vez aprovechando un talud vertical conformado previamente a la visita realizada al lugar, como se aprecia en la Figura 14.



Figura 14. Equipo del ensayo de carga vertical colocado en el nicho, Sitio 02-Puesto 07 P.H. Reventazón.

Por otra parte también se vio la necesidad de realizar ensayos de carga horizontal en este sitio (ver Figura 15). Lo anterior motivado por las condiciones del terreno, el cual se mostro menos compactado que el Sitio 01. El ensayo de carga vertical no aporto los suficientes datos para conformar el gráfico de Esfuerzo – Asentamiento, necesario para realizar la determinación del coeficiente de balasto buscado.



Figura 15. Equipo del ensayo de carga horizontal colocado en el nicho, Sitio 02-Puesto 07 P.H. Reventazón.

## Recuperación de Muestras Inalteradas

Para determinar algunas características naturales del terreno, como su densidad natural ( $\gamma_{Nat}$ ), contenido de humedad (%w) y además para realizar ensayos de compresión inconfiada, se extrajeron muestras inalteradas del suelo de cada sitio en estudio, hincando tubos *shelby* como se muestra en la Figura 16 y en la Figura 17.



Figura 16. Recuperación de muestras inalteradas, Sitio 01-Higuito de Desamparados.



Figura 17. Recuperación de muestras inalteradas, Sitio 02-Puesto 07 P.H. Reventazón.

## Extracción del material para realizar los ensayos en laboratorio

Para realizar los ensayos que se citaran más adelante fue necesario extraer una cantidad considerable de material de cada sitio, como se muestra en la Figura 18. Por ejemplo, en el Sitio 01, ya terminado el ensayo de placa de carga y extraídas las muestras inalteradas, se tomó el material del piso de la trinchera y se empacó para ser llevado al laboratorio.



Figura 18. Extracción del material para realizar los ensayos en laboratorio, Sitio 01-Higuito de Desamparados

## Clasificación de los materiales (ASTM, D-2487)

En el laboratorio se entregó una bolsa que contenía aproximadamente 2 kg de material con la finalidad de realizar el ensayo de clasificación SUCS y determinar el contenido de humedad de las muestras. La razón por la cual se entregó una muestra relativamente pequeña fue porque en cada sitio fue evidente, al empacar el material para realizar los demás ensayos, que hacer un análisis granulométrico no era necesario, ya que en ambos lugares el material se presentaba completamente fino y para su clasificación solo se requeriría realizar el lavado en la malla N° 200 y la determinación de los límites de Atterberg.

En el ensayo de clasificación lo primero fue determinar el contenido de humedad, para lo cual se pesa una muestra homogenizada del material presentado en el laboratorio de al menos 300g, luego después de 24 horas al horno a una temperatura de no menos de 110 °C se pesó de

nuevo y se determinó el contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\%w = \frac{W_T - W_S}{W_S} \times 100 \quad \dots\dots (ec.9)$$

donde:

$W_T$  = Peso total de la muestra.

$W_S$  = Peso seco de la muestra.

$\%w$  = Porcentaje de humedad de la muestra.

Utilizando al menos 100g del mismo material secado al horno, se realiza el lavado en la malla N° 200 hasta que el agua que pase a través de ella no se aprecie turbia. Este material es secado nuevamente por 24 horas a la misma temperatura, para luego tamizarlo en las malla 4 y la malla 200 y así determinar los porcentajes retenidos en estas mallas y concluir los porcentajes de partículas gruesas que contiene la muestra para realizar la clasificación final del material.

Por último, en cuanto a la clasificación de los materiales, se realizaron los ensayos para determinar los límites de Atterberg, que son necesarios para concluir el límite plástico, el límite líquido y con estos dos datos el índice de plasticidad y con ello determinar qué tipo de material fino es el que se está evaluando y presentar su clasificación completa.

## Gravedad específica (ASTM, D-854)

Tomando una muestra de 60g pasando la malla N° 10 del material de cada sitio, que hayan sido secadas al horno durante 24 horas a 110 °C, se colocan saturadas en un picnómetro durante 24 horas las muestras. Luego de transcurrido ese tiempo se sumergen los picnómetros en aceite caliente hasta que el agua dentro de estos hierva, como se observa en la Figura 19. Cuando el agua dentro del picnómetro hierve se deja durante 20 minutos más; por último se retira y se repone el agua perdida por evaporación en cada picnómetro hasta su nivel de aforo. Se toma su peso y de esta manera, con el uso de la siguiente ecuación, se determina la gravedad específica ( $G_s$ ) de cada material.



$$G_S = \frac{G_{sa} \times W_s}{W_s + W_{pic} - W_T} \dots\dots (\text{ec.10})$$

donde:

- $G_S$  = Gravedad específica del material.
- $G_{sa}$  = Gravedad específica del agua.
- $W_s$  = Peso seco de la muestra.
- $W_T$  = Peso total de la muestra.
- $W_{pic}$  = Peso del picnómetro



Figura 19. Muestras del material de cada sitio hervidas dentro de los picnómetros para la determinación de la Gravedad específica. Derecha: Material del Sitio 01; izquierda: Material de Sitio 02.

## Expansión libre de los Materiales (Das, 2006)

Entre las propiedades que se evaluaron para realizar una caracterización de los materiales analizados en este trabajo, estuvo el porcentaje de expansión libre del material, el cual se determina mediante un sencillo ensayo, donde se toma una pequeña cantidad del material a analizar para secarlo al horno durante 24 horas a una temperatura de 110 °C. Luego de secada la muestra de material se tritura en un mortero con el fin de disgregar y obtener muestra de todas las partículas finas presentes en él. Por último se toman 10 g de este material y se vierten muy lentamente en una probeta que contenga 50 ml de agua destilada. El material se deja durante una hora con el fin de que éste se asiente y se toma la lectura de la cantidad de material hinchado dentro de la probeta. Si esta lectura sobrepasa los 15 ml (que es igual a decir que el material se hinchó en más de un 50 %) se

considera el material como expansivo. Ver Figura 20.

$$\% \text{Expansión} = \frac{V_f - 10}{10} \times 100 \dots\dots (\text{ec.11})$$

donde:

- $V_f$  = Volumen final leído dentro de la probeta.



Figura 20. Muestras del material de cada sitio para determinar la capacidad de hinchamiento de los materiales. Derecha: Material del Sitio 02; izquierda: Material de Sitio 01.

## Próctor Estándar (ASTM, D-698)

La razón por la que fue necesario realizar este ensayo estuvo en determinar el contenido de humedad óptimo ( $\%w_{opt}$ ) de los materiales de cada sitio, para así reproducir bajo dicha humedad los especímenes que se utilizarán para llevar a cabo el ensayo CBR que se mencionará en el siguiente párrafo. En cuanto al ensayo Próctor, se escogió realizar el tipo Estándar en lugar del Modificado por motivo de que con el primero se obtiene un dato más conservador de la densidad máxima a la que puede llegar el material, debido al hecho de que la energía de compactación es menor, la cual no requiere de equipos muy sofisticados para lograr conseguirla en el campo. Para conformar el gráfico Densidad - % Humedad se empaquetaron cinco muestras de 5 kg del material extraído de cada sitio, a las cuales se le agregó distintas cantidades de agua para obtener los puntos del gráfico anteriormente mencionado. Este procedimiento se ilustra en la Figura 21 y en la Figura 22.



Figura 21. Preparación del material del ensayo Próctor Estándar.



Figura 22. Compactación del material en el ensayo Próctor Estándar.

## Ensayo CBR (ASTM, D-1883)

Con este ensayo se buscó obtener el valor CBR (*California Bearing Ratio*) del material de cada sitio para presentar la posible relación que existe entre el coeficiente de balasto de los dos materiales evaluados en este proyecto y el mencionado CBR. Este parámetro se determina mediante un ensayo donde los especímenes son reproducidos con un contenido de humedad cercano al óptimo y luego saturados por varios días, con el fin de llevarlos a las peores condiciones en las cuales el material podría encontrarse, para de este modo, obtener un dato conservador. Ver Figura 23. Lo anterior provoca que buscar una relación entre el CBR y el coeficiente de balasto no tenga ningún sentido, debido a que se estaría evaluando el suelo en

dos condiciones distintas: 1) Con un determinado contenido de humedad (coeficiente de balasto); 2) Y el suelo totalmente saturado (CBR). Por este motivo, además del ensayo CBR convencional que se realizó bajo la norma ASTM D-1883, se efectuó otro ensayo para el material del Sitio 01, en el cual se prepararon los especímenes con el contenido de humedad de campo y sin pasarlos por el proceso de saturación, para de esta forma tener un valor de CBR relacionable con el del coeficiente de balasto del material de cada sitio, como se muestran en la Figura 24.



Figura 23. Saturación de los especímenes reproducidos para el ensayo CBR.



Figura 24. Especimen elaborado con el contenido de humedad de campo para determinar la posible relación entre el CBR y el valor del Coeficiente de Balasto.

En cuanto a la comparación que se hará entre el coeficiente de balasto y el CBR, ésta será para un coeficiente estimado a partir de una placa de 76 cm, por lo cual a partir del resultado obtenido de los ensayos de carga se calculará el

valor  $K_{76}$ , valor que será comparado con lo que muestra el Anexo 1 y la siguiente ecuación, propuesta por la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile:

$$K_{76} = 4,51 \cdot \log(CBR) \dots\dots\dots (\text{ec.12})$$

## Compresión Inconfinada (ASTM, D-2166)

Utilizando las muestras inalteradas extraídas en cada sitio con el uso de tubos *shelby* se efectuaron los ensayos de compresión inconfinada para que, al igual que en el caso del valor CBR, determinar la relación que existe entre el coeficiente de balasto y la resistencia a la compresión inconfinada. Por otra parte, indirectamente otros datos obtenidos al medir y pesar las muestras utilizadas en este ensayo, fueron la densidad húmeda o natural del material y su contenido de humedad, datos que fue necesario conocer para la realización del ensayo que en este proyecto será propuesto como un método para determinar el valor del coeficiente de balasto en el laboratorio.



Figura 25. Ensayo de compresión inconfinada para una muestra inalterada obtenida del Sitio 02 - Puesto 07 P.H. Reventazón.

## Presiómetro Menard (ASTM, D - 4719)

Otro parámetro con el cual se buscó relacionar el coeficiente de balasto obtenido a partir del ensayo de carga fue el módulo de deformación del suelo ( $E$ ), pero como se mencionó en el

apartado de “*Planteamiento del Problema*”, no existe una manera racional de determinar este parámetro directamente. Lo anterior es la justificación de por qué se vio la necesidad de realizar un ensayo utilizando el presiómetro Menard, del cual se obtiene un módulo presiométrico por medio del que, mediante la siguiente relación, es posible determinar el módulo de deformación del material.

$$E = \frac{E_0}{\alpha} \dots\dots\dots (\text{ec.13})$$

donde:

- $E$  = Módulo de deformación del material.
- $E_0$  = Módulo presiométrico, obtenido en el ensayo utilizando el presiómetro Menard.
- $\alpha$  = Factor que depende del tipo de suelo.

El valor de  $E_0$  es el que se obtiene del ensayo, el cual se calcula haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$E_0 = (1 + \mu) \cdot 2 \cdot (V_0 + V_m) \cdot \left( \frac{\Delta p}{\Delta v} \right) \dots\dots\dots (\text{ec.14})$$

donde:

- $\mu$  = Módulo de Poisson.
- $V_0$  = Volumen inicial ( $\text{cm}^3$ ).
- $V_m$  = volumen adicional inyectado ( $\text{cm}^3$ ).
- $\Delta p$  = Cambio de presión entre  $p_1$  y  $p_0$ .
- $\Delta v$  = Cambio de volumen entre  $V_1$  y  $V_0$ .



Figura 26. Ensayo con el presiómetro Menard para la determinación del módulo presiométrico y consecuentemente el módulo de elasticidad.

## Preparación del material para el ensayo de carga uniaxial

Para realizar el ensayo de carga uniaxial que se propondrá en este proyecto, como método para determinar el coeficiente de balasto de un suelo, se debió manipular el material extraído del campo para devolver a este las características de densidad y humedad que presentaba naturalmente. Para ello, lo primero fue secar el material a la intemperie con el fin de deshacer los grumos que se presentaba y de esta forma hacerlo más manejable. Luego de deshechos los grumos se tamizó en la malla de  $\frac{3}{8}$ " toda la muestra obtenida en el campo como se aprecia en la Figura 27. La elección de la malla de  $\frac{3}{8}$ ", fue arbitraria y solo se baso en el echo de que, al ser materiales finos, los estudiados en este proyecto, prácticamente no contenían material retenido en esta malla y, con tamaño de partículas menor a  $\frac{3}{8}$ " se obtiene manejabilidad del material, sobre todo para el proceso de agregar agua para alcanzar la humedad que los materiales presentaban en campo.



Figura 27. Material secado al aire libre y tamizado en la malla  $\frac{3}{8}$ ".

Una vez que toda la muestra pasó por la malla  $\frac{3}{8}$ " se empacó en bolsas de 20 kg para el caso del material de Higuito de Desamparados y de 15 kg para el material de Puesto 07 de P.H. Reventazón. Para el sitio de Higuito de Desamparados se empacaron 44 bolsas separadas en 4 lotes de 11 bolsas cada uno, para así realizar 4 repeticiones del ensayo de carga uniaxial y con esto buscar aumentar la confiabilidad en el resultado de este ensayo. En cuanto al otro sitio, de él se empacaron 33 bolsas

de material, cada una contenía 15 kg de peso. Las cuales se distribuyeron en 3 lotes de 11 bolsas, como muestra la Figura 28.



Figura 28. a) Material empacado del Sitio 01-Higuito de Desamparados. b) Material empacado del Sitio 02-Puesto 07-P.H. Reventazón.

Es importante mencionar que para cada lote del material, de ambos sitios, se tomó una muestra para determinar el contenido de humedad del lote, esto debido a que es necesario conocer este dato para determinar la cantidad de agua que se debe agregar para alcanzar el contenido de humedad requerido para realizar el ensayo, que en realidad es el contenido de humedad que el material presentaba en el campo. Para determinar la cantidad de agua a agregar se realizó el siguiente procedimiento:

- Se determinó el peso seco del material con la siguiente ecuación:

$$W_s = \frac{W_T}{1 + w} \quad \dots\dots\dots \text{(ec.15)}$$

donde

$W_s$  = Peso seco del material (g).

$W_T$  = Peso total del material (g).

$w$  = contenido de humedad del material.

- Luego se calculó con la siguiente ecuación la cantidad de agua por agregar.

$$W_w = W_s \cdot w_{agr} \quad \dots\dots\dots \text{(ec.16)}$$

donde

$W_w$  = Peso del agua a agregar (g).

$W_s$  = Peso seco del material (g).

$W_{agr}$  = contenido de humedad a agregar.

Una vez determinada la cantidad de agua que fue necesario agregar para alcanzar la humedad deseada, se procedió a agregarla. La forma fue realizando el trabajo indicado en las ecuaciones 15 y 16 para calcular la cantidad necesaria de agua por agregar para cada bolsa

de material y adicionándolo a cada bolsa una a una como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.** Adición de agua a las muestras de material para alcanzar el contenido de humedad requerido para la prueba.

## Ensayo de carga uniaxial propuesto para la determinación del coeficiente de balasto

Para realizar este ensayo se utilizó el odómetro que pertenece y se encuentra en la Sub Área de Experimentación Geotécnica (SAEG) del Instituto Costarricense de Electricidad. El detalle de este se puede observar en el Anexo 2 de este trabajo.

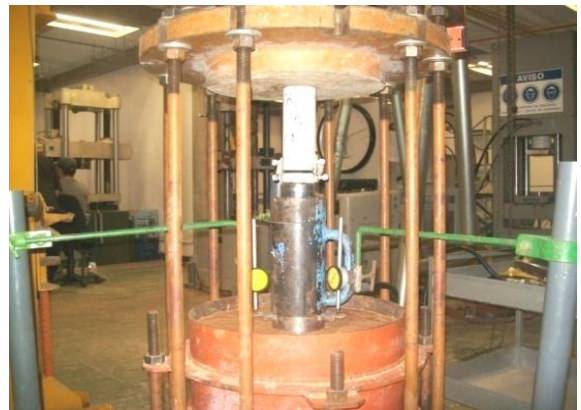
Como la intención fue realizar este ensayo a una muestra retenida dentro del odómetro que tuviese las mismas características que en el campo, se debió calcular la cantidad de material que se pondría dentro de este para que se ajustara a la densidad de campo determinada, puesto que el contenido de humedad fue alcanzado conforme se explicó en el punto anterior.

El método empleado fue sencillo: se calculó el volumen interno del odómetro y, conociendo el dato de densidad de campo, se encontró la cantidad en kilogramos de material a colocar dentro del molde, como se muestra en la Figura 30. Esta cantidad fue dividida en 5 partes iguales con la intención de facilitar su compactación.



**Figura 30.** Llenado y compactación del odómetro para realizar el ensayo de compresión uniaxial.

Cuando el odómetro fue llenado a una altura de 50 cm, se colocó la tapa de reacción y la placa con que se realizó el ensayo de carga, la cual tenía un diámetro de 12,5 cm, con lo que se cumplió con el requerimiento de la norma ASTM D-1194, donde indica que en un ensayo de placa en campo la trinchera debe tener un ancho de al menos cuatro diámetros de la placa para no crear condiciones de confinamiento, las cuales tampoco se quiere que se presenten en este ensayo. Además se colocó la gata hidráulica con que se proporcionaría la presión en el ensayo y la rótula que garantiza que la carga será siempre perpendicular a la superficie. Por último se colocaron tres deformímetros separados 120° uno del otro; estos deformímetros se sujetaron a estructuras separadas del odómetro. Ver Figura 31



**Figura 31.** Ensayo de carga uniaxial para determinar el coeficiente de balasto en el laboratorio.

Por último, cuando se finalizó el ensayo, se extrajeron del odómetro dos muestras inalteradas del material remoldeado, como las que se muestran en la Figura 32, esto con el fin de comprobar si las características (humedad y densidad) que se le habían dado al espécimen aún se conservaban y, además, si se cumplía la relación de la ecuación 7, entre parámetros determinados en las muestras remoldeadas en el laboratorio. Cabe mencionar que estas muestras fueron tomadas a una profundidad mayor a dos diámetros de placa, suponiendo que en esa zona el esfuerzo aplicado en superficie no afectaba la masa remoldeada, según lo propuesto por L. Jürgenson.



Figura 32. Extracción de las muestras inalteradas del material remoldeado en el odómetro.

## Ensayos de consolidación

Realizar los ensayos de carga en el laboratorio para el material del Sitio 02, presentó el inconveniente de tener un alto contenido de humedad; esto debido al momento en que el ensayo de carga *In Situ* fue realizado. Lo anterior provocó que para conformar el gráfico de Esfuerzo – Deformación de este ensayo, solo se pudieran generar tres pares ordenados antes de la falla del material. Por otra parte, al evaluar el comportamiento del material del Sitio 01, el ensayo de carga horizontal *In Situ*, aportó seis pares ordenados para generar el gráfico, mientras que en el ensayo de carga vertical en el laboratorio, el número de pares ordenados obtenido bajó a cuatro. Por las razones anteriores, se consideró que realizar los ensayos de carga vertical en el laboratorio, remoldeando con el mismo contenido de humedad los especímenes del Sitio 02, no ofrecería los datos

necesarios para conformar el gráfico requerido, del cual se determina el coeficiente de balasto.

Evaluando lo anterior, se determinó una alternativa para realizar el ensayo de carga en el laboratorio. Esta alternativa se basa en la corrección por humedad que propone G. Sowers (1972) en su libro “Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, en el cual se indica que lo ideal es realizar los ensayos de carga cuando el suelo esté completamente saturado, pero como no siempre que se realizan los ensayos de carga el suelo presenta esta condición, una alternativa para estimar el valor del coeficiente de balasto saturado está en realizar un par de ensayos de consolidación en donde una de las muestras se encuentra completamente saturada, mientras que la otra presenta el mismo contenido de humedad que en campo. Ambas muestras son cargadas solamente a un esfuerzo de 0,70 kg/cm<sup>2</sup> y se realizan lecturas de asentamiento de las muestras hasta llegar a un asentamiento final, el cual se registra para obtener la razón entre ambos valores. Dicha razón se multiplica por el valor obtenido de coeficiente de balasto en el ensayo de carga, para obtener el dato en condición saturada.

$$K_{saturado} = \frac{\delta_{campo}}{\delta_{saturado}} \times K_{campo} \quad \dots\dots (ec. 17)$$

En el caso concreto del Sitio 02, este sí presentaba un elevado contenido de humedad, que hace posible considerar el suelo en estado saturado, motivo por el cual el ensayo de laboratorio debió realizarse a una humedad menor, como ya se ha venido mencionando. El contenido de humedad elegido para realizar los ensayos de laboratorio fue el óptimo determinado a partir el ensayo Próctor Estándar. Ver Figura 33.

Ahora, para calcular la densidad que el suelo presentaría en campo si tuviese el contenido de humedad óptimo, se determinó primero la densidad seca del material ( $\gamma_d$ ), utilizando para ello la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_T}{1 + w} \quad \dots\dots\dots (ec.18)$$

donde:

- $\gamma_T$  = Densidad natural del material (kg/m<sup>3</sup>).
- $\gamma_d$  = Densidad seca del material (kg/m<sup>3</sup>).
- w = contenido de humedad de campo.

Y a partir del dato anterior determinar la densidad que presentaría el suelo en estudio, conteniendo una humedad similar a la óptima del ensayo Próctor Estándar.



Figura 33. Ensayo de consolidación, muestra con contenido de humedad óptimo.

# Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en esta investigación, tanto en los ensayos realizados *In Situ* como los que fueron efectuados en el laboratorio. Cabe aclarar que bajo el sub título que menciona cada ensayo efectuado, se expondrá la información de los dos sitios evaluados.

## Caracterización de los suelos

### Clasificación de los suelos

Como fue mencionado antes en el apartado de metodología, a simple vista se notó tanto en el Sitio 01 como en el Sitio 02, que no había presencia significativa de material grueso. La cantidad de material que se aportó para realizar estos ensayos fue de aproximadamente 2 kg. De esa cantidad se tomó el material necesario para determinar el contenido de humedad y los porcentajes de partículas retenidos en las mallas N° 40 y N° 200.

Para el Sitio 01 se desprenden los siguientes resultados:

<b>Cuadro 2. Porcentaje de humedad natural para el material de Higuito de Desamparados</b>	
$W_T$ (g)	216,3
$W_S$ (g)	178,9
$W$ (g)	37,4
%w	20,91

Microsoft Excel 2007®

Por otro lado, es necesario conocer el porcentaje de material retenido en la malla N° 200, debido a que aún cuando a simple vista se determinó que el material en estudio es fino, este contiene cantidades bajas de arenas y se debe mencionar el porcentaje presente en la muestra para realizar el ensayo de clasificación.

<b>Cuadro 3. Análisis Granulométrico: Higuito de Desamparados</b>				
Tamiz N°	Peso Retenido	% Retenido	% Ret. Acumulado	% PAG.
40	0	0	0	100
200	10	10	10	90

Microsoft Excel 2007®

Con los datos anteriores se determinó que el material en estudio y procedente de Higuito de Desamparados, presenta un contenido de humedad de 20,91% y que al quedar menos del 15% del material queda retenido en la malla N° 200 (10% como se muestra en el Cuadro 3). En cuanto a los límites de Atterberg, el límite líquido se obtuvo de la siguiente figura.

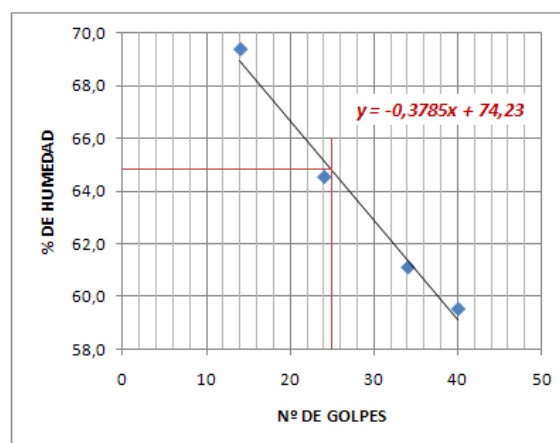


Figura 34. Determinación del límite líquido del material a partir del diagrama de % Humedad - Nº de Golpes. Sitio 01 – Higuito de Desamparados. Microsoft Excel 2007®

Como se puede apreciar los datos presentan una tendencia lineal que se describe con la siguiente ecuación:

$$\%H = -0,3785xN^{\circ}gol + 74,23 \quad \text{.....(ec.19)}$$



A simple vista en la Figura 34, se podría estimar que el valor del Límite Líquido se encuentra en aproximadamente 65%; haciendo uso de la ecuación 17 el valor del Límite Líquido equivale a 64,77%, por lo cual su valor final se fija en 65%.

Para el Límite Plástico del material, éste se determinó utilizando el promedio de humedad de dos muestras de aproximadamente 8 g.

<b>Cuadro 4. Determinación del Límite Plástico: Higuito de Desamparados</b>		
Determinación N°	1	2
$W_T$	9,48	8,06
$W_S$	7,35	6,25
%w	28,98	28,96

Microsoft Excel 2007®

Del cuadro anterior se desprende que el Límite plástico del material está en 29%.

De los anteriores resultado se determina que el material encontrado en el Sitio 01 (Higuito de Desamparados), clasifica como Arcilla Densa (CH), que muestra un color naranja.

Para el Sitio 02 los resultados se presentan a continuación:

<b>Cuadro 5. Porcentaje de humedad natural para el material de Puesto 07 P. H. Reventazón</b>	
$W_T$ (g)	276
$W_S$ (g)	173,5
W (g)	102,5
%w	59,08

Microsoft Excel 2007®

Además, en el análisis granulométrico se obtuvo:

<b>Cuadro 6. Análisis Granulométrico: Puesto 07, P. H. Reventazón</b>				
Tamiz N°	Peso Retenido	% Retenido	% Ret. Acumulado	% PAG.
40	0	0	0	100
200	5,8	5,8	5,8	94

Microsoft Excel 2007®

Para este sitio, se nota mediante el dato obtenido de porcentaje de humedad, el elevado contenido de agua que el material presentaba, factor que como se indicará más adelante influirá en la ejecución de los ensayos de carga vertical realizados en el laboratorio. Es importante destacar que, al igual que en el Sitio 01, este material también retiene en la malla N° 200 menos del 15%.

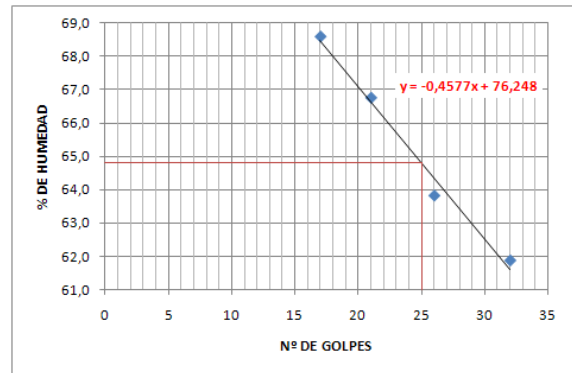


Figura 35. Determinación del límite líquido del material a partir del diagrama de % Humedad - N° de Golpes. Sitio 02 - Puesto 07 P.H. Reventazón. Microsoft Excel 2007®

Los datos obtenidos en el ensayo del Límite Líquido presentan una tendencia lineal, que se puede describir con la siguiente ecuación:

$$\%H = -0,4577xN^{\circ}gol + 74,25 \dots (ec.20)$$

Esta ecuación, determina el valor del límite líquido en 64,81%. Por lo tanto este se fija en 65%.

Por último, el Límite Plástico se determinó de la misma manera que para el Sitio 01, obteniendo lo que se expone a continuación:

<b>Cuadro 7. Determinación del Límite Plástico: Puesto 07, P. H. Reventazón</b>		
Determinación N°	1	2
$W_T$	7,78	9,16
$W_S$	5,14	6,01
%w	51,36	52,41

Microsoft Excel 2007®

Del cuadro anterior se desprende que el Límite Plástico del material se puede fijar en 52%. Por último, evaluando los parámetros obtenidos

para este suelo, se establece que el material procedente del Puesto 07 del P. H. Reventazón clasifica como un Limo Elástico (MH) y presenta un color rojizo.

## Gravedad específica de los materiales

En cuanto a la gravedad específica de los materiales, para el suelo extraído del Sitio 01, los datos del equipo y los resultados del ensayo se muestran en el Cuadro 8:

<b>Cuadro 8. Gravedad Específica para material de Higuito de Desamparados</b>	
$W_s$ (g)	60,0
$V_{\text{picnómetro}}$ (ml)	500
T (°C)	25,0
C. P.	659,9
$G_{sa}$	0,998845
$W_{\text{pic}} + W_T$	698,3
$G_s$	<b>2,77</b>

Microsoft Excel 2007®

Como se puede observar el valor determinado como gravedad específica es de 2,77. Según la norma ASTM D-854 este valor es aceptable puesto que se encuentra entre 2,3 y 2,9, por lo que se establece como valor de gravedad específica para la Arcilla Densa color naranja (CH) que se encuentra en Higuito de Desamparados.

Del Sitio 02 los resultados obtenidos fueron:

<b>Cuadro 9. Gravedad Específica para material de Puesto 07 P. H. Reventazón</b>	
$W_s$ (g)	60,0
$V_{\text{picnómetro}}$ (ml)	250
T (°C)	25,0
C. P.	337,2
$G_{sa}$	0,998845
$W_{\text{pic}} + W_T$	376,5
$G_s$	<b>2,90</b>

Microsoft Excel 2007®

Para este caso se puede notar que el material presenta una alta gravedad específica, la cual está en el límite aceptado por la norma.

Por tal motivo, se decidió analizar la razón por la cual se presenta este elevado valor.

La razón de lo mencionado anteriormente estuvo en la presencia de una notable cantidad de metales en el suelo en estudio, que provocan un mayor peso por unidad de volumen del material. Para comprobar dicha conclusión se colocó un imán sobre una muestra del material de este sitio secada al horno. Lo anterior se ilustra desde la Figura 36 a la Figura 38.



Figura 36. Muestra del material del Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón, secado al horno e imán limpio antes de la comprobación de presencia de metales en la muestra.



Figura 37. Colocación del imán sobre la muestra del Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón, para comprobar la presencia de material metálico.



**Figura 38. Material atraído al imán debido a presencia de metales en la muestra del Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón.**

## Expansión libre de los materiales

Como se muestra en la Figura 20, el suelo del Sitio 01 (izquierda) mostró una expansión libre mayor a la que experimentó el del Sitio 02. El resultado de este ensayo se presenta en el Cuadro 10 y el Cuadro 11.

<b>Cuadro 10. Expansión libre del material de Higuito de Desamparados</b>	
Ws (ml)	10,0
V <sub>agua</sub> (ml)	50,0
W <sub>F</sub> (ml)	16,0
%Expansión Libre	60,0

Microsoft Excel 2007®

<b>Cuadro 11. Expansión libre del material de Puesto 07, P. H. Reventazón</b>	
Ws (ml)	10,0
V <sub>agua</sub> (ml)	50,0
W <sub>i</sub> (ml)	13,0
%Expansión Libre	30,0

Microsoft Excel 2007®

Según lo expuesto en el apartado de “Metodología”, el material del Sitio 01 presenta características de arcilla expansiva, factor que puede provocar inconsistencias o resultados inesperados en ensayos que se realizan en condición de saturación, como podría ser el caso del ensayo CBR (si este se hiciese en condición

saturada), motivo adicional al que se mostrará más adelante de por qué para este material se eligió realizar el ensayo CBR sin pasar por el proceso de saturación.

Por otra parte, el material del Sitio 02 no mostró mayor hinchamiento al ser saturado (30 %), por lo cual para este suelo no se hicieron mayores consideraciones.

## Densidad en Campo

Para realizar la determinación de la densidad en campo o natural de los materiales analizados en este trabajo, se utilizaron las muestras inalteradas recuperadas en tubos *shelby*, que fueron también recuperadas con el fin de realizar ensayos de compresión inconfiada. Para el Sitio 01 fueron recuperadas tres muestras, mientras que para el Sitio 02 solamente dos.

<b>Cuadro 12. Densidad en campo del material de Higuito de Desamparados</b>	
Muestra	$\gamma^{NAT}$ (kg/cm <sup>3</sup> )
1	1973,80
2	1945,27
3	1905,38
Promedio	1941,49

Microsoft Excel 2007®

<b>Cuadro 13. Densidad en campo del material de Puesto 07 P. H. Reventazón</b>	
Muestra	$\gamma^{NAT}$ (kg/cm <sup>3</sup> )
1	1639,08
2	1650,50
Promedio	1644,79

Microsoft Excel 2007®

Los resultados de densidad natural de los materiales, al igual que la humedad natural, que se mostrará más adelante, son necesarios para realizar el ensayo de carga vertical en laboratorio.

## Humedad en campo

Anteriormente, a las muestras utilizadas para clasificación de los materiales se les determinó su contenido de humedad. Para respaldar el mencionado dato, también fue comprobada la humedad que presentaban las muestras inalteradas que se utilizaron tanto para determinar la densidad en campo como la densidad del material.

**Cuadro 14. Humedad en campo del material de Higuito de Desamparados**

Muestra	$W_{NAT}$ (%)
1	20,91
2	22,33
3	20,04
Promedio	21,09
Ensayo Clasificación	20,91
%w Establecido	21,00

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 15. Humedad en campo del material de Puesto 07, P. H. Reventazón**

Muestra	$W_{NAT}$ (%)
1	55,78
2	55,51
Promedio	55,64
Ensayo Clasificación	59,08
%w Establecido	57,36

Microsoft Excel 2007®

Por último, se presenta el siguiente cuadro resumen de las propiedades índice de los materiales evaluados en este proyecto.

**Cuadro 16. Resumen de propiedades índice de los materiales evaluados en la investigación.**

Parámetro geotécnico	Sitio 01: Higuito de Desamparados	Sitio 02: Puesto 07, P. H. Reventazón
Límite Líquido (%)	65	65
Límite plástico (%)	29	52
Clasificación SUCS	CH	MH
Gravedad específica ( $G_s$ )	2,77	2,90
Humedad natural (%)	21	59
Densidad Natural $kg/m^3$	1941	1645
Expansión Libre (%)	60	30
Densidad seca máxima (Próctor) $kg/m^3$ *	1550	1180
Humedad óptima *	23	44
Resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ) $kg/cm^2$ *	3,40	0,48
Coefficiente de balasto ( $K_{S30}$ ) $kg/cm^3$ *	18,24	6,60

(\*) La forma en que fue determinado el parámetro se muestra más adelante en este informe.

Microsoft Excel 2007®

# Ensayo de carga In Situ

## Ensayo de carga vertical

Como se mencionó antes, para ambos sitios no fue posible realizar el ensayo de placa vertical utilizando una placa de 30 cm de diámetro, por lo cual se debió implementar la alternativa mencionada en el apartado de "Metodología".

Para el Sitio 01 se realizó el ensayo vertical con una placa de 12,5 cm de diámetro y además un ensayo de carga horizontal, el cual si fue realizado con una placa de 30 cm de diámetro. Del ensayo de carga vertical con placa de 12,5 cm de diámetro se obtuvo el gráfico de Esfuerzo – Asentamiento que se muestra en la Figura 39.

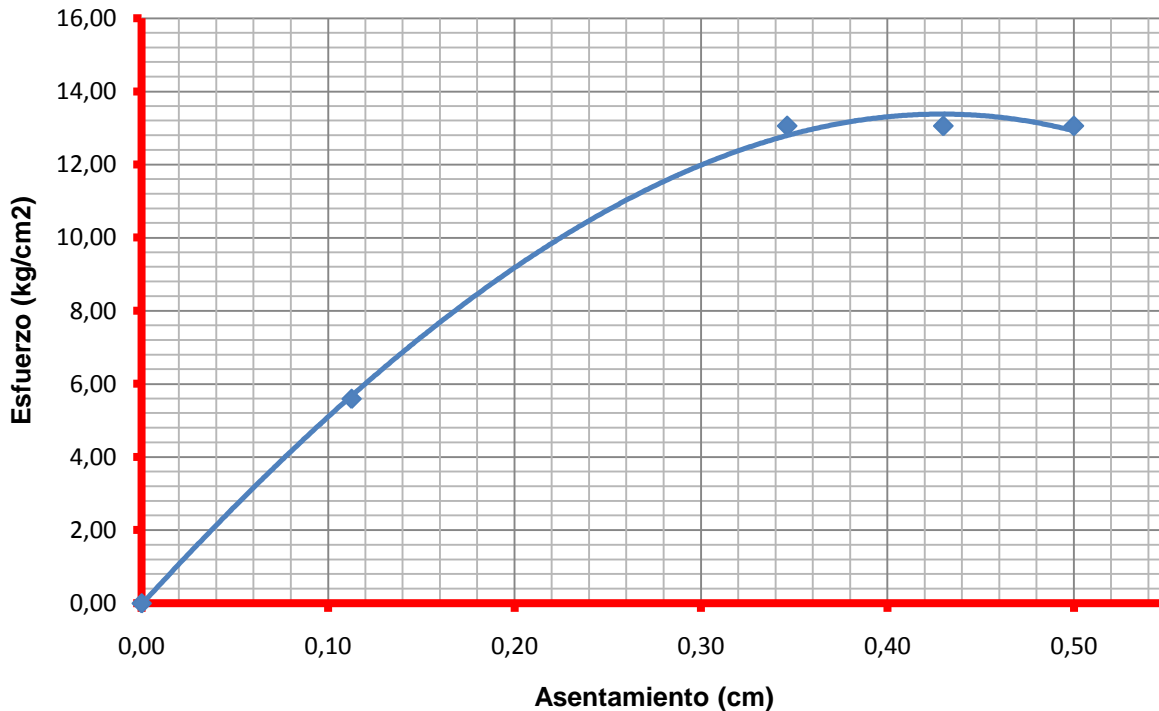


Figura 39. Gráfico de Esfuerzo – Asentamiento obtenido a partir del ensayo de carga In Situ (Sitio 01 – Higuito de Desamparados) utilizando una placa de 12,5 cm de diámetro. Microsoft Excel 2007®

El gráfico anterior fue analizado para obtener el coeficiente de balasto para el Sitio 01. Para esto se utilizaron los cuatro métodos presentados en el apartado de Antecedentes. Por otra parte, como se ha mencionado con anterioridad, es importante determinar el mencionado coeficiente pero, calculado para el área de una placa de 30 cm de diámetro, lo cual fue estimado con el uso de la ecuación 4.

La forma en que se determinó el coeficiente de balasto por cada uno de los métodos antes citados se expone a continuación. Es importante aclarar que se utilizará el gráfico de la Figura 39 para ilustrar la forma de calcular y determinar el valor buscado, la cual es repetitiva tanto para los

ensayos de carga *In Situ* como en el laboratorio, por lo cual este proceso solo se mostrará para el ensayo vertical con placa de 12,5 cm de diámetro y para los demás ensayos realizados solamente se mostrarán los gráficos y resultados obtenidos.

## Determinación por carga admisible ( $q_{adm} = \varphi q_{ult}$ )

Para recordar, este método se señaló en los "Antecedentes" como el más adecuado para el análisis de cimentaciones superficiales, puesto

que calcula la reacción que el suelo tendrá al imponerse sobre este la carga que la cimentación transfiere al terreno. Como este trabajo no contempla el diseño de una estructura en especial, sino más bien busca marcar una pauta en la forma práctica de estimar el valor del coeficiente de balasto, para implementar el método se utilizará la carga admisible que este suelo podrá soportar, determinada tal y como se

indica en el método de diseño por resistencia, expuesto en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. Este método de diseño reduce la capacidad de soporte última del suelo, utilizando para ello un factor de reducción, que va de 0,50 a 0,83. Para este proyecto se escogió 0,50, por el simple hecho de ser el que proporciona un valor de capacidad de carga admisible más conservador.

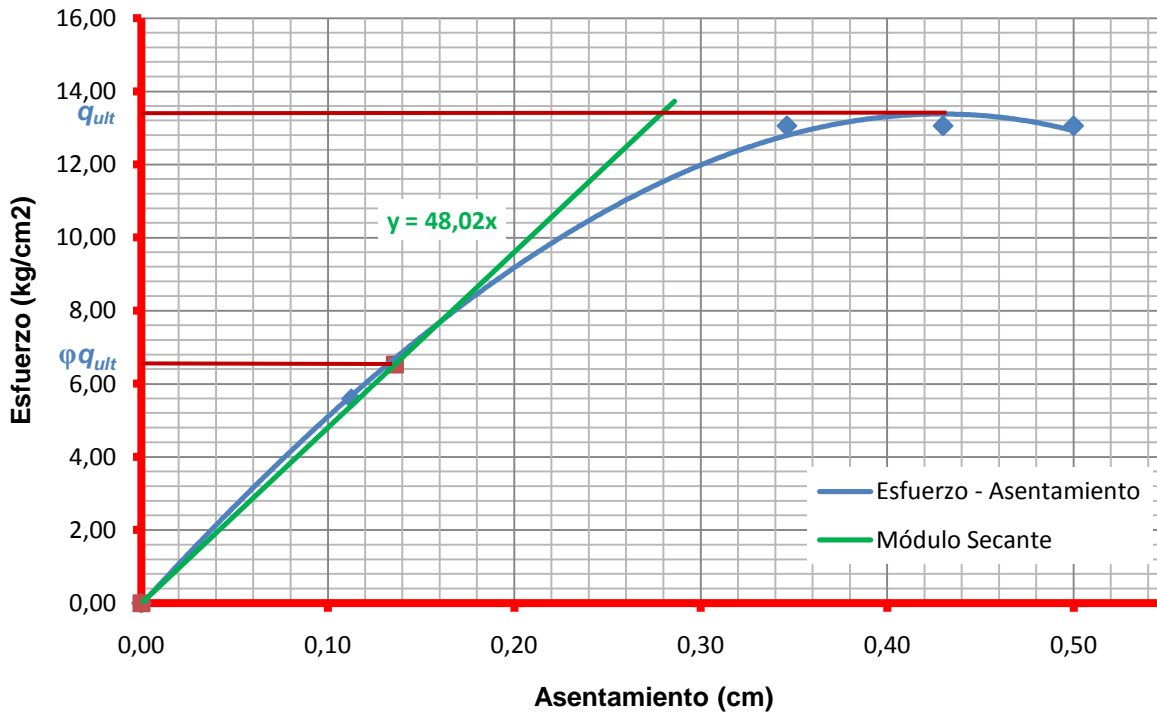


Figura 40. Determinación del  $K_{12,5}$  mediante el primer método propuesto. Microsoft Excel 2007®

De la Figura 40 se extrae la siguiente información, donde se presenta el valor estimado como coeficiente de balasto  $K_{12,5}$  y el  $K_{30}$ . Este último determinado a partir de la ecuación 4.

Cuadro 17. Determinación del coeficiente de balasto $K_{12,5}$ por el Primer Método	
$q_{ult}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	13,05
$\phi$	0,50
$\phi q_{ult}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	6,53
$\bar{\delta}$ (cm)	0,136
$K_{12,5}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	48,02
$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	20,01

Microsoft Excel 2007®

Del análisis anterior se establece que, el coeficiente de balasto determinado en el ensayo, que se realizó con una placa de 12,5 cm de diámetro y empleando este método de análisis del gráfico Esfuerzo – Asentamiento, es de 48,02 kg/cm<sup>3</sup>. Es importante citar que para este análisis no fue posible que una curva polinomial generada en el programa Microsoft Excel 2007®, se ajustará al gráfico de la Figura 39. Si lo anterior se hubiese logrado, el valor de asentamiento ( $\delta$ ) para el esfuerzo  $\varphi_{q_{ult}} = 6,53 \text{ kg/cm}^2$ , se podría haber determinado a partir de la ecuación que describe la mencionada curva de ajuste, como fue realizado en otros gráficos de Esfuerzo – Deformación que se presentan en este mismo proyecto.

## Determinación por la pendiente del rango pseudo-elástico

Este método como ya se mencionó, se basa en la hipótesis de que los suelos al inicio del ensayo de carga presentan un comportamiento elástico, donde los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones que se presentan.

Para realizar la estimación del valor de coeficiente de balasto por este método se graficaron los puntos del ensayo de carga que se presentan antes de la carga última ( $q_{ult}$ ) como se muestra en la siguiente figura. El cálculo de la pendiente se realizó con la aplicación de Microsoft Excel 2007® que aporta la línea recta de mejor ajuste de los puntos y que muestran la pendiente de la mencionada recta. Para realizar una estimación más exacta, además se generó otra línea de ajuste entre el primer y el último punto del la sección del gráfico antes citada. El promedio entre las dos pendientes fue el valor estimado como coeficiente de balasto del suelo en análisis.

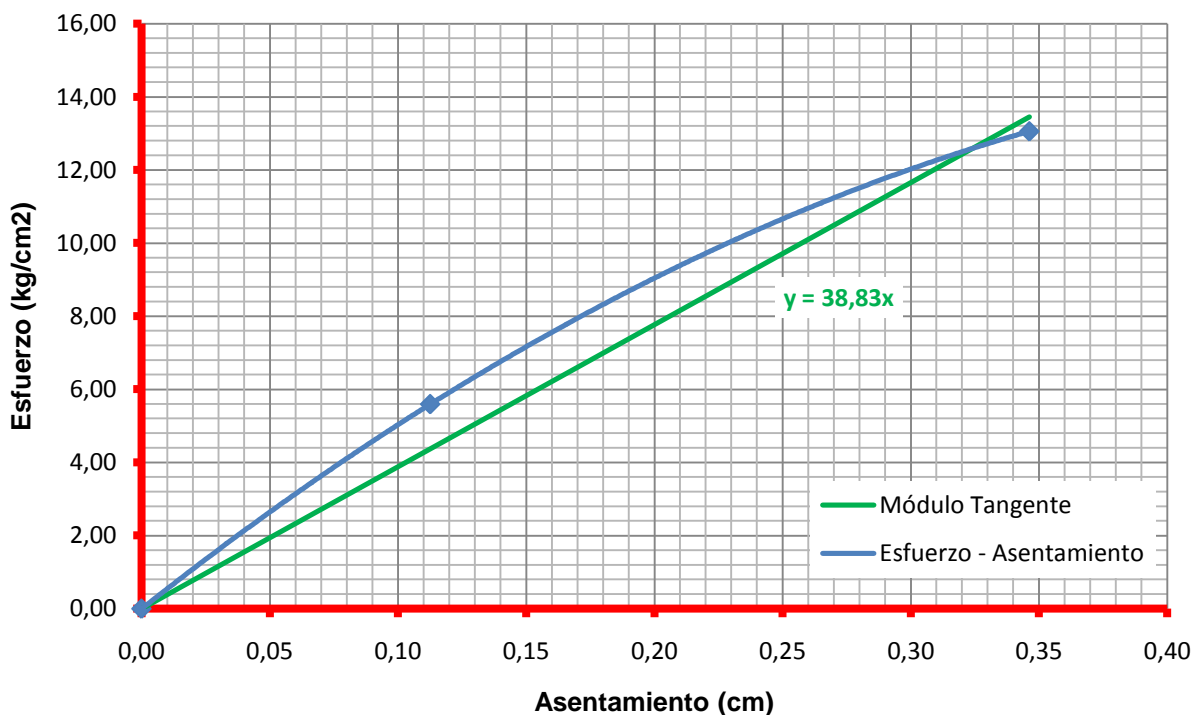


Figura 41. Estimación del valor del coeficiente de balasto a partir del segundo método para una placa de 12,5 cm de diámetro. Microsoft Excel 2007®

Cuadro 18. Determinación del coeficiente de balasto $K_{12,5}$ por el Segundo Método	
m línea de mejor ajuste	38,83
$K_{12,5}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	38,83
$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	16,18

Microsoft Excel 2007®

De lo anterior se establece que el coeficiente de balasto  $K_{12,5}$  equivale a 38,83 kg/cm<sup>3</sup> y que a partir de este valor se determina que  $K_{30}$  es igual 16,18 kg/cm<sup>3</sup>.

### Determinación en el asentamiento de 0,127 cm

Para hacer la determinación del valor de coeficiente de balasto por este método, también es aplicable determinar la ecuación polinomial de mejor ajuste al gráfico. Pero en el caso particular del ensayo que se está analizando, ninguna ecuación logró ajustarse, por lo cual la determinación se realizó directamente del gráfico, como en el caso del primer método.

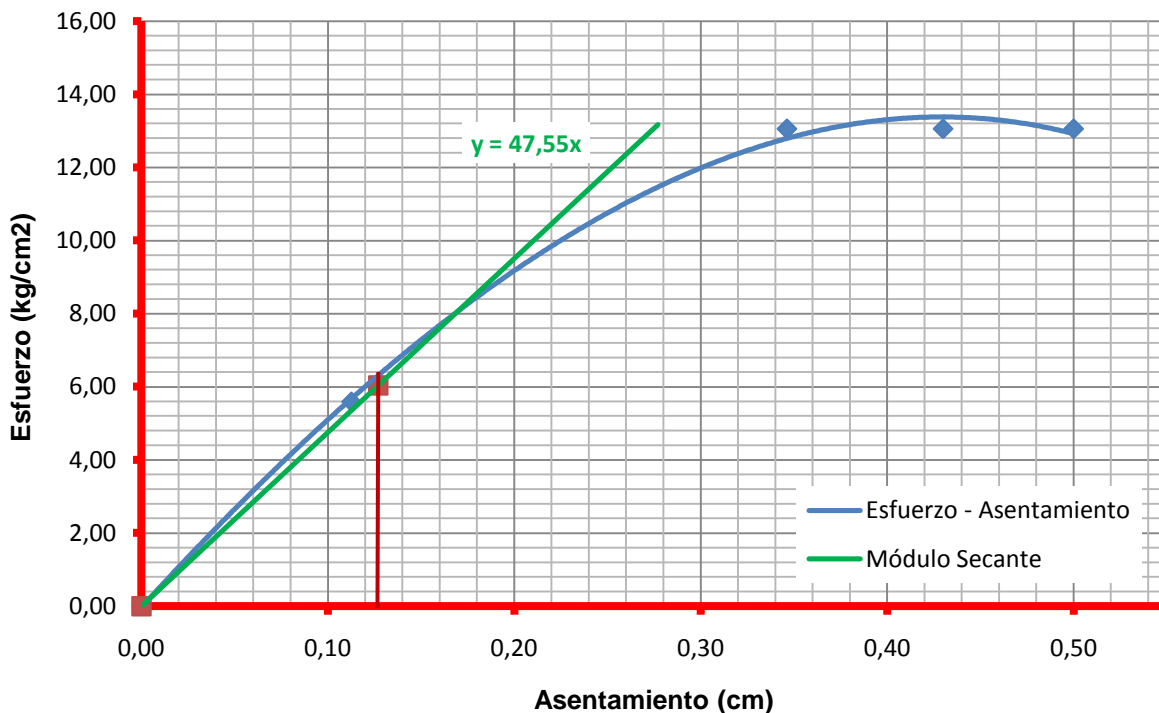


Figura 42. Determinación del  $K_{12,5}$  mediante el tercer método propuesto. Microsoft Excel 2007®



<b>Cuadro 19. Determinación del coeficiente de balasto <math>K_{12,5}</math> por el Tercer Método</b>	
$\delta$ (cm)	0,127
$q$ (kg/cm <sup>2</sup> )	6,04
$K_{12,5}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	47,55
$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	19,81

Microsoft Excel 2007®

### Determinación en el esfuerzo de 0,71 kg/cm<sup>2</sup>

Para realizar la estimación del valor del coeficiente de balasto  $K_{12,5}$  o cualquier otro ( $K_{30}$ ,  $K_{76}$ , por ejemplo) que sea necesario, por este método, es indispensable buscar una curva de ajuste a la zona inicial del gráfico, para luego calcular el valor del asentamiento ( $\delta$ ) para un

esfuerzo de 0,71 kg/cm<sup>2</sup> a partir de la ecuación de la curva de ajuste. Esto debido a que el equipo utilizado en los ensayos de carga, al menos en esta investigación, no era capaz de proporcionar valores tan bajos del esfuerzo aplicado y se hace imposible percibir la ubicación del par ordenado del gráfico que contiene esta presión.

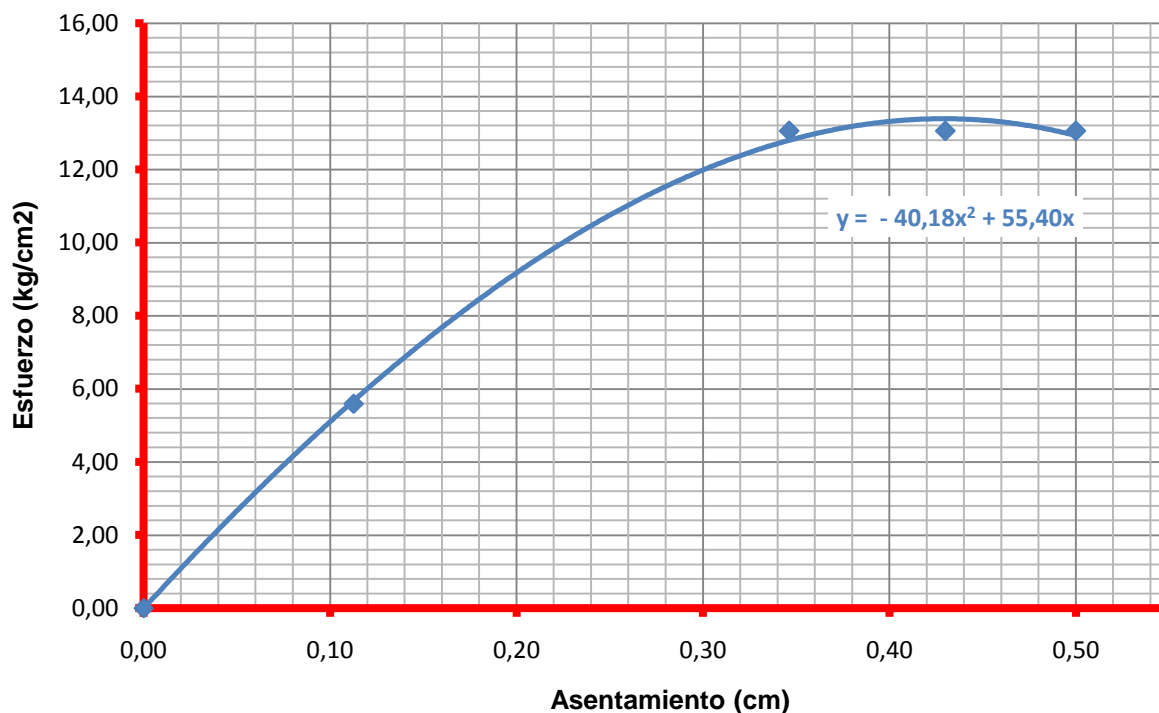


Figura 43. Determinación del  $K_{12,5}$  mediante el cuarto método propuesto. Microsoft Excel 2007®

Como se nota en el gráfico anterior, la curva de ajuste tiende a ser similar al gráfico solamente en el principio, precisamente entre el intervalo de esfuerzos que va de 0 kg/cm<sup>2</sup> a 5,59 kg/cm<sup>2</sup>,

donde se encuentra comprendido el valor de 0,71 kg/cm<sup>2</sup> para el cual se estimará el valor  $K_{12,5}$ .

<b>Cuadro 20. Determinación del coeficiente de balasto <math>K_{12,5}</math> por el Cuarto Método</b>	
q (kg/cm <sup>2</sup> )	0,71
$\bar{\delta}$ (cm)	0,013
$K_{12,5}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	54,88
$K_{12,5 \text{ MAX}}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	34,80
$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	22,87
$K_{30 \text{ MAX}}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	14,50

Microsoft Excel 2007®

Del cuadro anterior se aprecia que el valor estimado ( $K_{S12,5} = 34,8 \text{ kg/cm}^3$ ) es mayor al máximo permitido por este método (14,50 kg/cm<sup>3</sup>) y, por lo sugerido en el apartado de “Antecedentes”, este no puede ser establecido como el coeficiente de balasto, por lo que se debe utilizar el segundo método (*Determinación por la pendiente del rango pseudo-elástico*) y proponer el valor obtenido de él, como el coeficiente de balasto del suelo en análisis.

Para finalizar, con los resultados del ensayo de carga vertical *In Situ* utilizando una placa de 12,5 cm de diámetro, se presenta el siguiente cuadro, donde se expone el resumen de los valores obtenidos y el promedio de estos (descartando en el promedio el resultado del cuarto método de estimación). El promedio obtenido será el valor del coeficiente de balasto que presenta el material.

Para los demás ensayos realizados solo se presentará el cuadro resumen, similar al Cuadro 21.

## Ensayo de carga horizontal

En cuanto al ensayo de placa horizontal, el gráfico de Esfuerzo – Deformación que se presenta en la Figura 44 es precisamente el resultado obtenido de este; que al igual que en el ensayo de carga vertical realizado con la placa de 12,5 cm de diámetro se correlacionó el valor obtenido con el  $K_{30}$ , utilizando en este caso para ello la ecuación 8.

<b>Cuadro 21. Determinación del Coeficiente de Balasto para el Sitio 01 - Higuito de Desamparados</b>		
<b>Criterio</b>	<b><math>K_{12,5}</math> (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>K_{30}</math> (kg/cm<sup>3</sup>)</b>
$\varphi q_{ult}$	48,02	20,01
Pendiente puntos lineales	38,83	16,18
Asentamiento de 0,127cm	47,55	19,81
*Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	54,88	22,87
Promedio	44,27	<b>18,67</b>

Microsoft Excel 2007®

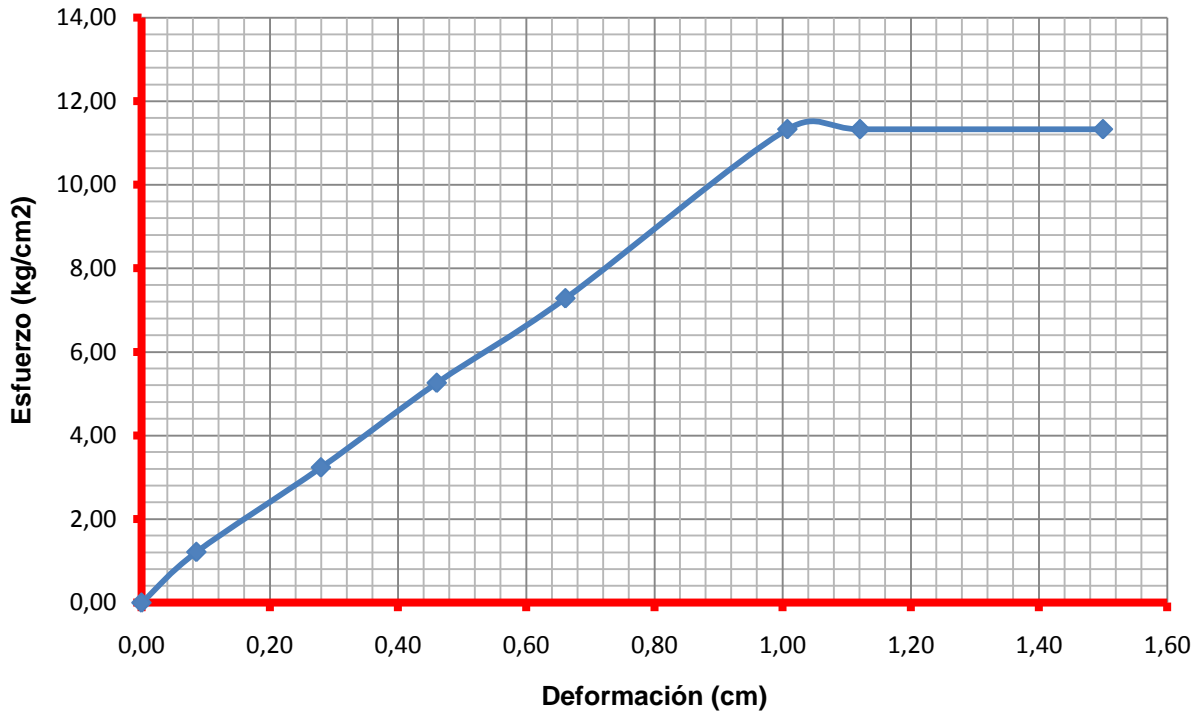


Figura 44. Gráfico de Esfuerzo – Deformación obtenido a partir del ensayo de carga horizontal *In Situ* (Sitio 01 – Higuito de Desamparados) utilizando una placa de 30 cm de diámetro. *Microsoft Excel 2007®*

De este ensayo se desprenden los resultados que se muestran en el Cuadro 22, con su valor equivalente de  $K_{S30}$ :

<b>Cuadro 22. Determinación del Coeficiente de Balasto para el Sitio 01 - Higuito de Desamparados</b>		
<b>Criterio</b>	$K_{h30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$K_{S30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )
$\varphi_{ult}$	11,37	17,05
Pendiente puntos lineales	11,23	16,85
Asentamiento de 0,127cm	13,03	19,55
*Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	15,82	23,74
Promedio	11,88	<b>17,81</b>

*Microsoft Excel 2007®*

De los resultados que se presentan tanto en el Cuadro 21 como en el Cuadro 22, se establece que el coeficiente de balasto  $K_{S30}$ , que presenta el suelo de Higuito de Desamparados es de 18,24 kg/cm<sup>3</sup>. Este valor que se determinó del promedio del resultado obtenido del ensayo de

carga vertical (placa de 12,5 cm de diámetro) y del ensayo de carga horizontal (placa de 30 cm de diámetro). El valor  $K_{S30} = 18,24 \text{ kg/cm}^3$ , en este informe se establece como el valor real del coeficiente de balasto para el Sitio 01. Los ensayos de carga vertical efectuados en el laboratorio se realizaron con el fin de determinar, a partir de ellos, el valor antes mencionado de  $K_{S30}$ .

Ahora en cuanto al Sitio 02, como se indicó antes, solo fue posible realizar el ensayo de carga horizontal. En este caso el resultado de  $K_{h30}$  fue relacionado mediante la ecuación 8 con el valor  $K_{S30}$ . Si bien es cierto para este sitio asegurar que el coeficiente de balasto obtenido con un solo ensayo de carga es el verdadero del suelo en análisis no es tan confiable, como si se determinara de varias repeticiones del ensayo o, de más de un ensayo, como fue el caso del Sitio 01, por motivo de la lejanía del sitio en análisis y la disposición de tiempo, se utilizó el dato obtenido del ensayo horizontal realizado en el Sitio 02 como el real y fue utilizado para realizar la comparación con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Volviendo a los resultados obtenidos en el Sitio 02, se obtuvo el diagrama Esfuerzo – Deformación de la Figura 45, del cual se

estimaron los valores de coeficiente de balasto presentados en el Cuadro 23:

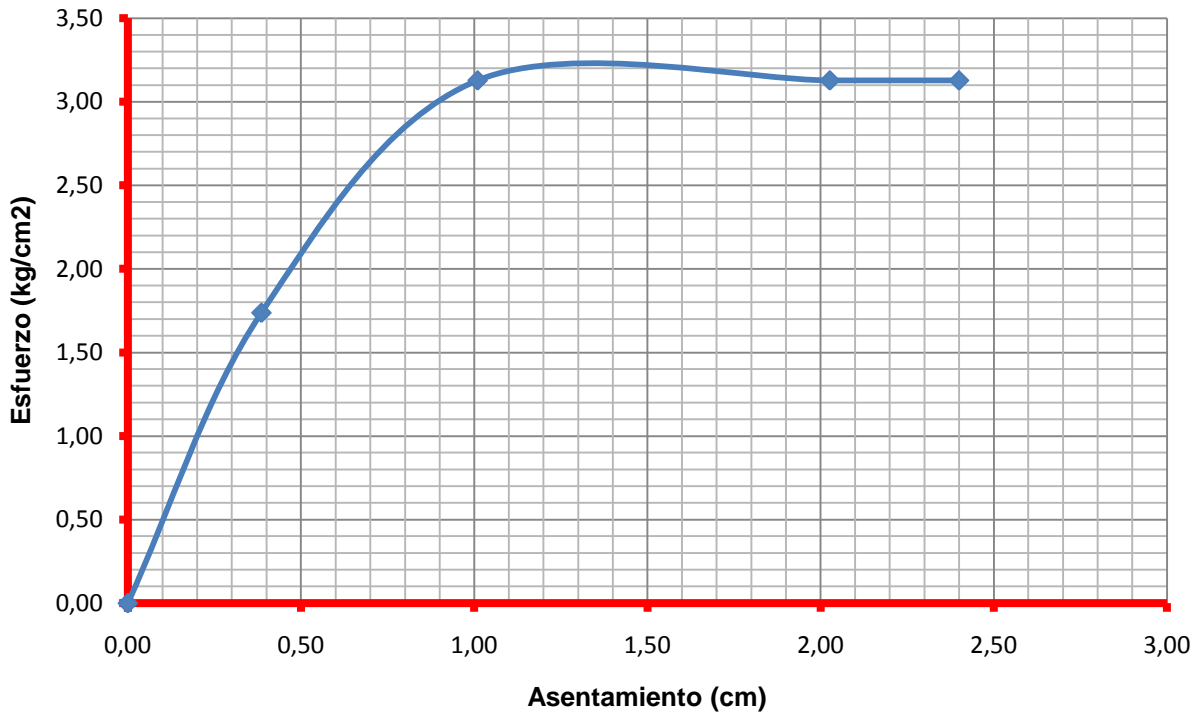


Figura 45. Gráfico de Esfuerzo – Asentamiento obtenido a partir del ensayo de carga horizontal In Situ (Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón utilizando una placa de 30 cm de diámetro. *Microsoft Excel 2007®*)

Cuadro 23. Determinación del Coeficiente de Balasto para el Sitio 02 – Puesto 07 P. H. Reventazón		
Criterio	$K_{h30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$K_{S30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )
$\varphi_{ult}$	4,63	6,94
Pendiente puntos lineales	3,28	4,92
Asentamiento de 0,127cm	5,19	7,78
*Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	4,50	6,75
Promedio	4,40	6,60

*Microsoft Excel 2007®*

Para el Sitio 02 se establece que el valor del coeficiente de balasto ( $K_{S30}$ ) es de 6,60 kg/cm<sup>3</sup>.

## Ensayo de carga en el Laboratorio

Dentro del objetivo principal de este proyecto estuvo realizar un ensayo de carga vertical a escala reducida en el laboratorio. El modelo que se conformó debió presentar las mismas características que el material poseía en el campo (humedad y densidad), para que la comparación entre los resultados de campo y laboratorio fuese válida.

Para el Sitio 01 se realizaron cuatro ensayos de carga en el laboratorio, pero por problemas en el equipo, específicamente en dos deformímetros empleados que no funcionaron desde el inicio, se debió descartar uno de estos ensayos, por lo que en este trabajo se muestra el resultado de tres de ellos. Por otra parte, el fin de realizar más de un ensayo fue el de verificar la repetitividad del método para la obtención del coeficiente de balasto.

Las características con las cuales se conformó el modelo y del molde utilizado para llevar a cabo el mencionado ensayo (el mismo utilizado en el ensayo para determinar el módulo oedométrico), se presentan en el Cuadro 24:

<b>Cuadro 24. Modelo de Laboratorio para el ensayo de carga, Higuito de Desamparados</b>	
$\gamma_{\text{NAT}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1941,49
%w	21,00
$V_{\text{molde}}$ (m <sup>3</sup> )	$9,817 \times 10^{-2}$
<b>Llenado del molde</b>	
N° Capas	5
$t_{\text{capa}}$ (cm)	10,00
$W_{\text{por capa}}$ (kg)	38,12
$W_{\text{Total}}$ (kg)	190,60

Microsoft Excel 2007®

De los ensayos, realizados se obtuvieron los gráficos de Esfuerzo – Deformación que se muestran en la Figura 46.

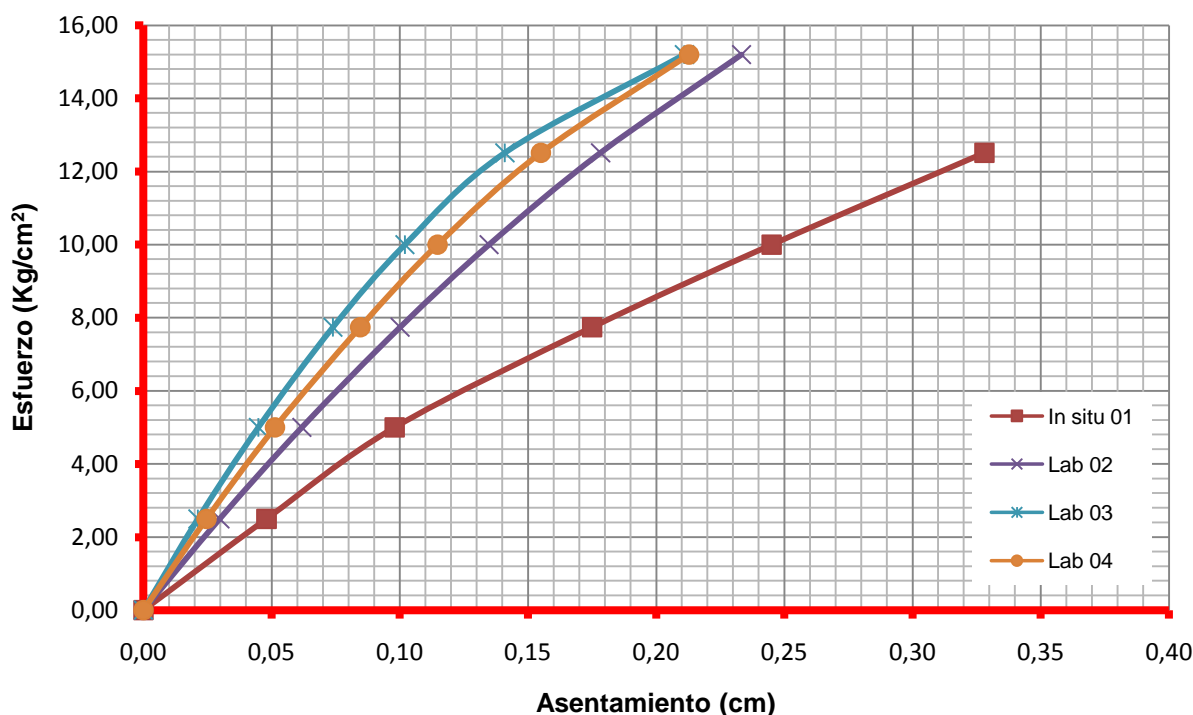


Figura 46. Comparación entre gráficos de Esfuerzo – Asentamiento obtenidos a partir de los ensayos de carga en Laboratorio y el obtenido In Situ (Sitio 01 – Higuito de Desamparados utilizando una placa de 12,5 cm de diámetro). Microsoft Excel 2007®

La Figura 46 hace evidente que no existe una relación directa entre lo encontrado en el campo y lo que se obtuvo de los ensayos de laboratorio, esto aún cuando los especímenes remoldeados en el laboratorio presentaban la misma densidad y humedad de campo.

Al remoldearse los especímenes elaborados en el laboratorio a la misma densidad y humedad del campo, se buscaba obtener un coeficiente de balasto similar al de laboratorio pero, como evidencia la Figura 46, las deformaciones presentadas en el campo son mayores a las que se obtuvieron en el laboratorio (esto será tratado en el “Análisis de Resultados”), provocando un incremento en el valor del coeficiente de balasto. Por otra parte, los gráficos obtenidos en los ensayos de laboratorio, sí mostraron una tendencia similar, lo cual hace pensar que, aún si la determinación del coeficiente de balasto a partir de un ensayo de laboratorio no es directa, el dato obtenido se puede corregir para llegar al valor real (u obtenido del ensayo de campo). Como los ensayos de laboratorio presentan una

mayor pendiente, queda claro que el coeficiente de balasto será mayor, por lo que para equipararlo se debe utilizar un factor de reducción, que en este informe se denominará  $\phi_K$ , como se muestra a continuación:

$$K_{campo} = \phi_K K_{Lab}$$

donde:

$K_{campo}$  = Coeficiente de balasto determinado en el campo ( $kg/cm^3$ ).

$K_{Lab}$  = Coeficiente de balasto determinado en el laboratorio ( $kg/cm^3$ ).

$\phi_K$  = Factor de ajuste entre campo y laboratorio.

En la anterior igualdad se puede considerar que los esfuerzos aplicados, tanto en el campo como en el laboratorio, pueden ser controlados, para que de esta forma la única variable entre campo y laboratorio sean los asentamientos registrados.

$$\frac{q}{y_{Campo}} = \phi_K \frac{q}{y_{Lab}}$$

el laboratorio y el registrado en campo para una misma carga.

$$\frac{y_L}{y_C} = \phi_K \dots\dots\dots (ec. 21)$$

donde:

- $q$  = Carga que se ejerce sobre el material (kg/cm<sup>2</sup>).
- $y_{campo}$  = Asentamiento presentado en el campo (cm).
- $y_{Lab}$  = Asentamiento presentado en el laboratorio (cm).
- $\phi_K$  = Factor de ajuste entre campo y laboratorio.

En el Cuadro 25 se muestra la determinación del factor  $\phi_K$  para cada esfuerzo aplicado en los ensayos de carga, tanto de campo como de laboratorio, además de la determinación de un factor  $\phi_K$  promedio de todos los ensayos realizados, que se propone como el factor de ajuste para la determinación del coeficiente de balasto del material de Higuito de Desamparados, a partir del ensayo de carga vertical en laboratorio.

Lo que reduce la determinación del valor  $\phi_K$  a la relación entre el asentamiento registrado en

Cuadro 25. Determinación del Factor de corrección para relacionar los resultados de campo y laboratorio								
Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup>	Asentamiento (cm)				$\phi_K$			
	In situ	Lab 01	Lab 02	Lab 03	Lab 02	Lab 03	Lab 04	Promedio
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,05	0,03	0,02	0,03	0,62	0,44	0,51	0,53
5,00	0,10	0,06	0,05	0,05	0,63	0,46	0,52	0,54
7,74	0,18	0,10	0,07	0,09	0,57	0,42	0,48	0,49
10,00	0,25	0,14	0,10	0,12	0,55	0,42	0,47	0,48
12,51	0,33	0,18	0,14	0,16	0,54	0,43	0,47	0,48
*15,2	-	0,23	0,21	0,21			<b>Prom</b>	<b>0,50</b>

Microsoft Excel 2007®

La utilización de este factor para determinar el coeficiente de balasto de campo a partir del ensayo de laboratorio, puede ser de dos formas: 1) afectando con él el coeficiente de balasto obtenido en los ensayos de laboratorio; 2) graficando los resultados de los ensayos de laboratorio, pero corrigiendo los asentamientos obtenidos; dicha corrección se hace multiplicando cada asentamiento registrado por el inverso de  $\phi_K$ .

Con la primera forma de corrección mencionada para determinar el coeficiente de balasto, se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 26.

<b>Cuadro 26. Corrección del coeficiente de balasto obtenido en el laboratorio para el material de Higuito de Desamparados</b>										
Criterio	kg/cm <sup>3</sup>							% desviación		
	Obtenido del Laboratorio			Corregido			K <sub>12,5</sub>	Lab 02	Lab 03	Lab 04
	Lab 01	Lab 02	Lab 03	Lab 01	Lab 02	Lab 03				
$\phi_{q_{ult}}$	77,52	105,23	92,36	39,00	52,94	46,47	48,02	18,78	10,26	3,23
Pendiente puntos lineales	66,40	73,22	73,00	33,41	36,84	36,73	37,25	10,32	1,11	1,41
Asentamiento de 0,127cm	74,87	92,15	85,22	37,67	46,36	42,87	47,55	20,77	2,49	9,82
Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	85,74	121,11	104,55	43,14	60,93	52,60	54,88	21,39	11,03	4,15

Microsoft Excel 2007®

Antes de fijar cualquier resultado es importante mencionar que el valor del coeficiente de balasto  $K_{12,5}$  determinado mediante el cuarto criterio, es mayor a 34,80 kg/cm<sup>3</sup> (o mayor a  $K_{S30}$  14,50 kg/cm<sup>3</sup>), lo cual, basado en lo expuesto en el apartado "Antecedentes", no puede ser considerado como el valor del coeficiente de balasto del material, pasando para su evaluación al segundo criterio (pendiente de la recta). Del Cuadro 26 es posible notar que el porcentaje de error es muy variado, para los diferentes métodos de determinación en cada ensayo realizado, siendo el segundo criterio el que presenta los

resultados más precisos en comparación con el ensayo realizado In Situ.

En cuanto a la forma de determinar el coeficiente de balasto en laboratorio realizando una corrección de los asentamientos presentados en el laboratorio para equipararlos con los registrados en campo, los resultados del Cuadro 26 son precisamente los mencionados asentamientos corregidos, con los cuales fue conformado el gráfico de Esfuerzo – Asentamiento de la Figura 47.

<b>Cuadro 27. Asentamientos en el ensayo de laboratorio corregidos para el material de Higuito de Desamparados</b>							
Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{\delta}_{corr}$ (cm)				%Error		
	In Situ	Lab 02	Lab 03	Lab 04	Lab 02	Lab 03	Lab 04
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,048	0,06	0,04	0,05	23,40	11,80	1,87
5,00	0,098	0,12	0,09	0,10	25,34	9,14	4,05
7,74	0,175	0,20	0,15	0,17	13,69	16,07	3,91
10,00	0,245	0,27	0,20	0,23	9,36	17,25	6,95
12,51	0,328	0,35	0,28	0,31	8,05	14,56	6,07
15,20	-	0,46	0,42	0,42	-	-	-

Microsoft Excel 2007®



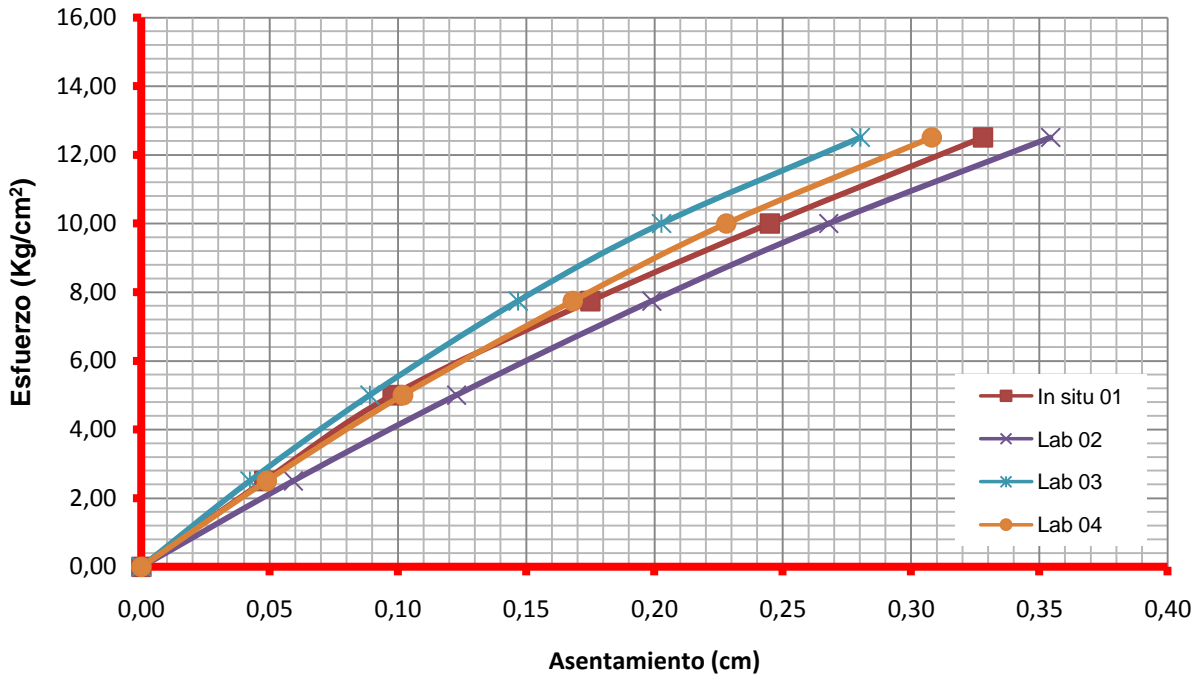


Figura 47. Comparación entre gráficos de Esfuerzo – Asentamiento obtenidos a partir de los ensayos de carga en Laboratorio y corregido y el obtenido In Situ (Sitio 01 – Higuito de Desamparados utilizando una placa de 12,5 cm de diámetro). Microsoft Excel 2007®

Por último se comprobó que el factor  $\Phi_K = 0,50$  proporcionara un valor de  $K_{30}$  similar al obtenido

a partir de los ensayos de carga *In Situ*, que para el Sitio 01 se fijo en  $18,13 \text{ kg/cm}^3$ .

Cuadro 28. Selección del método para determinar el Coeficiente de Balasto $K_{12,50}$ a partir del ensayo en laboratorio para el material de Higuito de Desamparados								
Criterio	Corrigiendo el K obtenido del Lab				Corrigiendo la curva obtenida en Lab			
	Lab 01	Lab 02	Lab 03	Promedio	Lab 01	Lab 02	Lab 03	Promedio
$\phi_{qult}$	39,00	52,94	46,47	46,14	39,03	52,88	46,40	46,10
Pendiente puntos lineales	33,41	36,84	36,73	35,66	32,84	44,69	40,64	39,39
Asentamiento de 0,127cm	37,67	46,36	42,87	42,30	40,59	53,89	47,88	47,45
Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	43,14	60,93	52,60	52,22	43,15	60,86	52,46	52,16
Promedio	36,69	45,38	42,02	41,37	37,49	50,48	44,97	44,31
	promedio		41,37		promedio		44,31	
	varianza		19,19		varianza		42,57	
	Des. Estándar		4,38		Des. Estándar		6,52	

Microsoft Excel 2007®

Del Cuadro 28 se establece que el valor del coeficiente de balasto  $K_{12,5}$  corregido por el factor  $\Phi_K$  es de  $41,37 \pm 4,38 \text{ kg/cm}^3$ . En el siguiente cuadro se presenta el resultado final del ensayo

de laboratorio y su comparación con lo obtenido en campo.

**Cuadro 29. Resultados finales y comparación con el valor del coeficiente de balasto para el material de Higuito de Desamparados**

	Campo	Corrigiendo el K obtenido del Laboratorio	%de desviación	Corrigiendo la curva obtenida en Laboratorio	% de desviación
$K_{30}$	18,24 kg/cm <sup>3</sup>	17,24 kg/cm <sup>3</sup>	4,94	18,46 kg/cm <sup>3</sup>	1,84
$K_{12,5}$	44,80 kg/cm <sup>3</sup>	41,37 kg/cm <sup>3</sup>		44,31 kg/cm <sup>3</sup>	
$K_{30h}$	12,09 kg/cm <sup>3</sup>	11,49 kg/cm <sup>3</sup>		12,31 kg/cm <sup>3</sup>	

Microsoft Excel 2007®

Con respecto al Sitio 02, solamente fue posible realizar dos ensayos de carga en el laboratorio. Esto debido a que, al igual que para el material del Sitio 01, el primer ensayo no tuvo éxito, por el hecho de que al realizarse se emplearon incrementos de carga amplios y el material falló de forma rápida dando pocos pares ordenados para la conformación del diagrama de Esfuerzo – Asentamiento. Por otro lado, la dificultad para recuperar más cantidad de este material debido a la lejanía del sitio, no permitió realizar más repeticiones de la prueba.

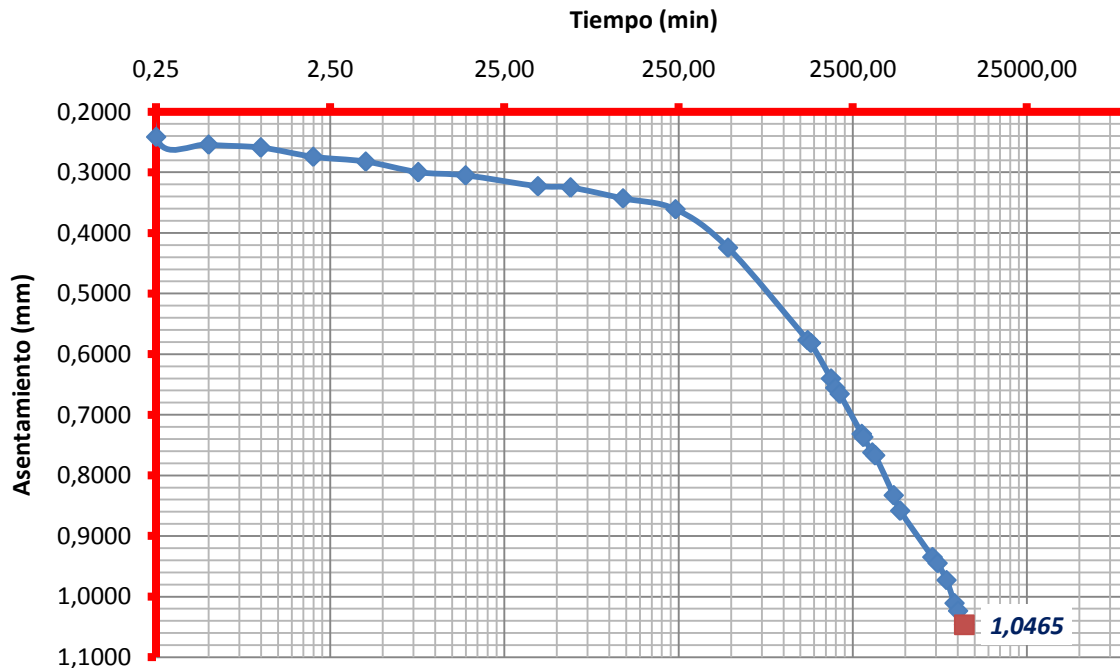


Figura 48. Gráfico Asentamiento – Tiempo de la muestra con el contenido de humedad de campo del material del Sitio 02, Puesto 07-P. H. Reventazón. Microsoft Excel 2007®

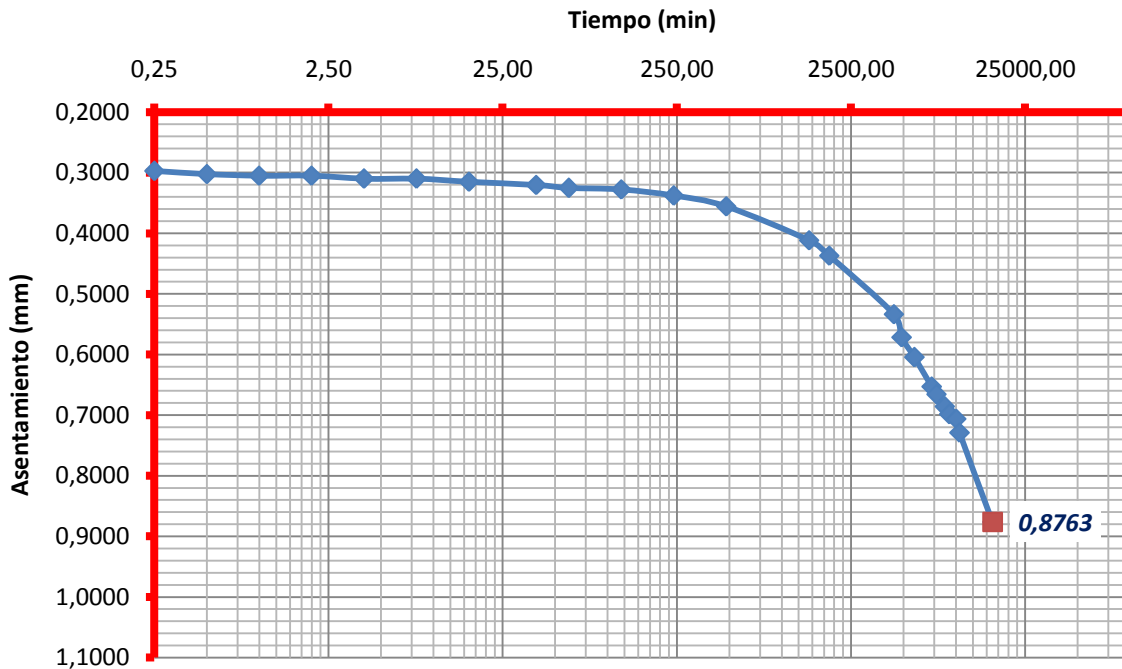


Figura 49. Gráfico Asentamiento – Tiempo de la muestra con el contenido de humedad óptimo del material del Sitio 02, Puesto 07-P. H. Reventazón. Microsoft Excel 2007®

Las características que presentó el material en los ensayos de carga en el laboratorio son las siguientes:

<b>Cuadro 30. Modelo de laboratorio para el ensayo de carga, Puesto 07 P. H. Reventazón</b>	
$V_{NAT}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1502,78
%W	43,77
$V_{molde}$ (m <sup>3</sup> )	$9,817 \times 10^{-2}$
<b>Llenado del molde</b>	
N° Capas	5
$t_{capa}$ (cm)	10
$W_{por\ capa}$ (kg)	29,51
$W_{Total}$ (kg)	147,55

Microsoft Excel 2007®

De los ensayos de carga realizados en el laboratorio, se obtuvieron los gráficos de Esfuerzo – Asentamiento que se muestran en la Figura 50. En dicha figura aparece un gráfico, denominado “*In Situ vertical*”, el cual es una

estimación de la tendencia que tendría el gráfico de Esfuerzo – Asentamiento, si se realizara un ensayo de carga vertical con una placa de 12,5 cm de diámetro. Este gráfico se debió estimar para poder realizar la comparación entre los resultados de campo y laboratorio. Para generar el gráfico “*In Situ vertical*”, se determinó el coeficiente de balasto vertical con placa de 30 cm de diámetro, partiendo del resultado del ensayo de carga horizontal y la ecuación 8, después se determinó el  $K_{S12,5}$  con la ecuación 4; y partiendo del hecho, de que los esfuerzos aplicados en el laboratorio se pueden controlar y, pueden también ser aplicados en campo, con la ecuación 1 se pueden determinar las deformaciones producto de los esfuerzos aplicados, en el material que presenta un determinado coeficiente de balasto  $K_{S12,5}$ :

$$y = \frac{q}{K_{S12,5}}$$

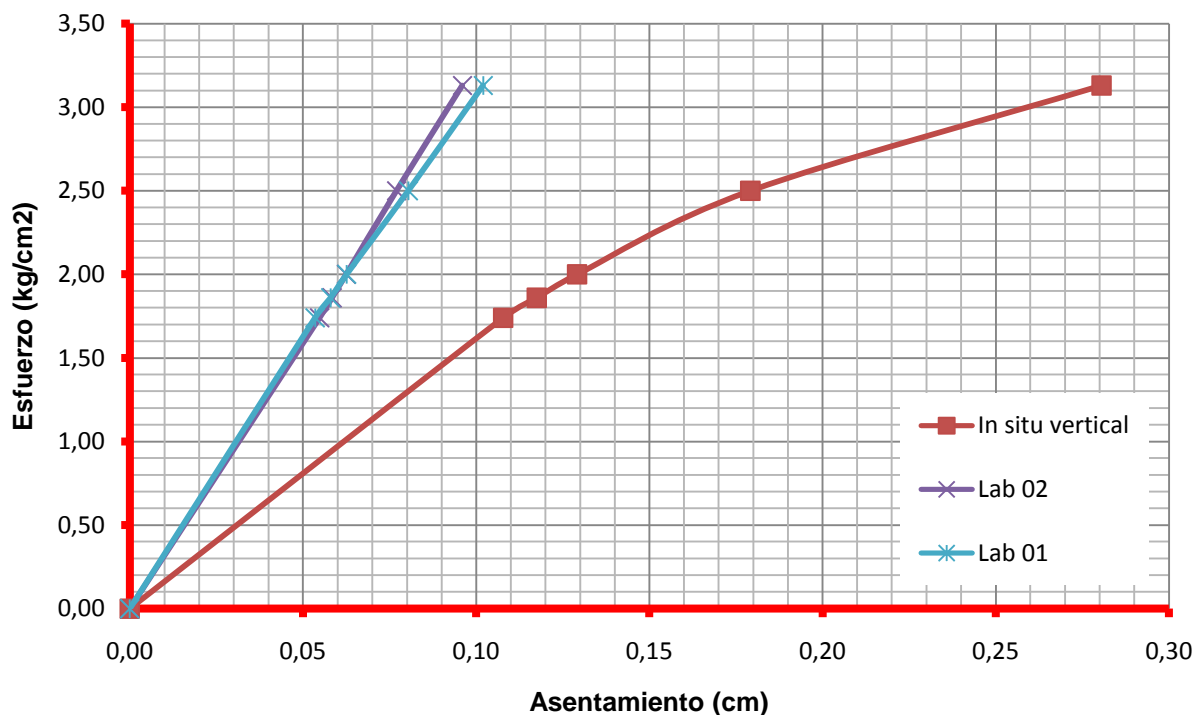


Figura 50. Comparación entre gráficos de Esfuerzo – Asentamiento obtenidos a partir de los ensayos de carga en Laboratorio y el obtenido In Situ (Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón). Microsoft Excel 2007®

De igual forma que en el Sitio 01, para este sitio fue necesario encontrar un factor de relación entre los resultados obtenidos en el laboratorio y los encontrados en campo. Para determinar este factor de relación fue utilizada la misma razón que en el caso del Sitio 01. Pero como en este caso el ensayo de laboratorio se realizó a distinta humedad que la presente en campo y, en el campo se consideró el suelo como saturado, la relación utilizada para obtener  $\Phi_K$  toma la

siguiente forma al incorporar en ella la ecuación 21.

$$\frac{y_L}{y_C} = \Phi_K$$

El resultado obtenido como factor de corrección  $\Phi_K$  se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 31. Determinación del Factor corrección para relacionar los resultados de campo y laboratorio							
Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup>	Asentamiento (cm)			F	$\phi$		
	In situ	Lab 01	Lab 02		Lab 01	Lab 02	Promedio
0,00	0,00	0,000	0,000	0,84	0,00	0,00	0,00
1,74	0,108	0,054	0,0548		0,59	0,61	0,60
1,86	0,118	0,058	0,0584		0,59	0,59	0,59
2,00	0,129	0,060	0,0625		0,58	0,58	0,58
2,50	0,179	0,080	0,077		0,54	0,51	0,52
3,13	0,281	0,102	0,096		0,43	0,41	0,42
3,73	-	0,122	0,1152		-	-	-
5,59	-	0,199	0,218				
					<b>Promedio</b>		<b>0,54</b>

Microsoft Excel 2007®

Determinado el valor del factor de corrección  $\Phi_K$ , se procedió a realizar el ajuste de los resultados de laboratorio, también como en el Sitio 01, tanto al coeficiente de balasto determinado en el

laboratorio como a los asentamientos que se obtuvieron en las curvas de Esfuerzo – Asentamiento.

<b>Cuadro 32. Corrección del coeficiente de balasto obtenido en el laboratorio para el material del Puesto 07, P. H. Reventazón</b>							
Criterio	kg/cm <sup>3</sup>					% Desviación	
	Obtenido del Laboratorio		Corregido		$K_{12,5}$		
	Lab 01	Lab 02	Lab 01	Lab 02		Lab 02	Lab 03
$\varphi_{ult}$	30,88	32,60	16,75	17,68	16,66	0,53	6,13
Pendiente puntos lineales	27,98	25,69	15,18	13,94	11,00	38,04	26,72
Asentamiento de 0,127cm	30,56	32,05	16,58	17,39	18,67	11,17	6,85
Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	36,26	29,71	19,67	16,12	16,20	21,39	0,54

Microsoft Excel 2007®

<b>Cuadro 33. Asentamientos corregidos en el ensayo de laboratorio para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón</b>					
Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{\delta}_{corr}$ (cm)			% Desviación	
	In Situ	Lab 01	Lab 02	Lab 01	Lab 02
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
1,74	0,108	0,10	0,10	8,51	6,28
1,86	0,118	0,11	0,11	9,02	8,39
2,00	0,129	0,12	0,12	10,67	10,81
2,50	0,179	0,15	0,14	17,29	20,79
3,13	0,281	0,19	0,18	32,99	36,93
3,73	-	0,22	0,21	-	-
5,59	-	0,37	0,40	-	-

Microsoft Excel 2007®

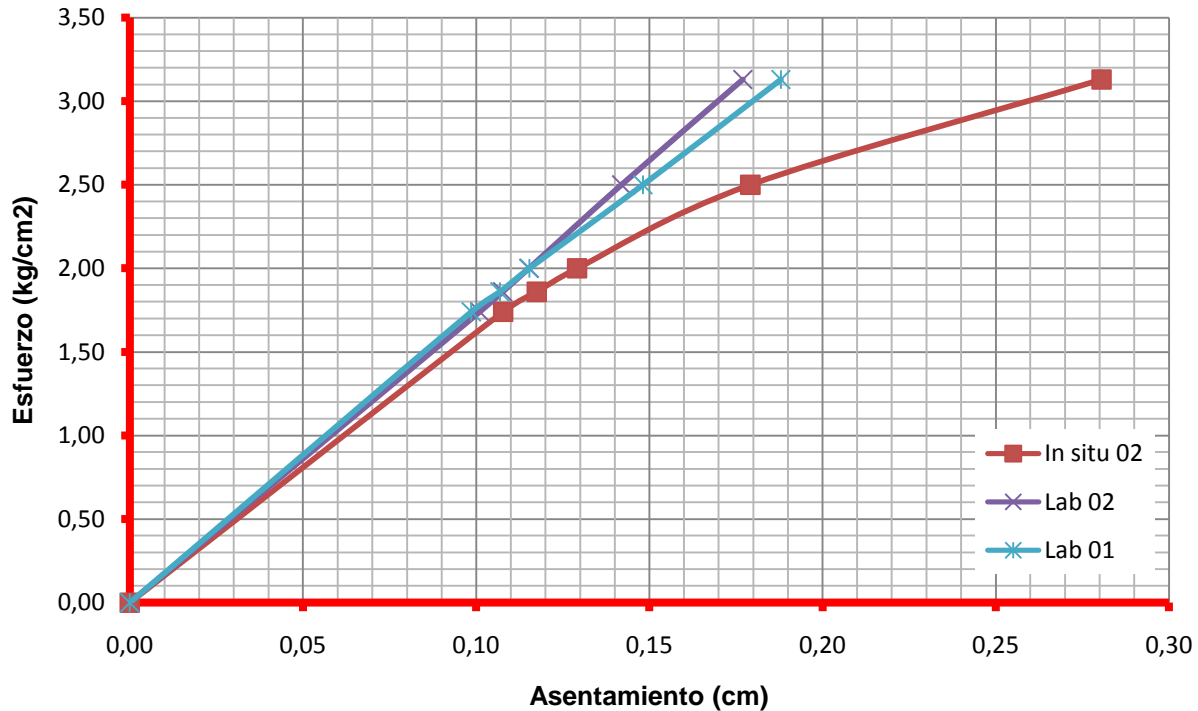


Figura 51. Comparación entre gráficos de Esfuerzo – Asentamiento obtenidos a partir de los ensayos de carga en Laboratorio y corregido y el obtenido In Situ (Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón). Microsoft Excel 2007®

Para finalizar con este sitio, también se realizó la determinación del valor de  $K_{30}$  a partir de los valores de coeficiente de balasto obtenidos en el laboratorio y se comparó el resultado con el

obtenido de la estimación hecha del mismo valor a partir del ensayo de carga *In Situ* y la ecuación 8.

<b>Cuadro 34. Selección del método para determinar el Coeficiente de Balasto <math>K_{12,5}</math> a partir del ensayo en laboratorio para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón</b>						
Criterio	Corrigiendo el $K$ obtenido del Laboratorio			Corrigiendo la curva obtenida en Laboratorio		
	Lab 01	Lab 02	Promedio	Lab 01	Lab 02	Promedio
$\Phi_{ult}$	16,75	17,68	17,22	16,92	17,65	17,28
Pendiente puntos lineales	15,18	13,94	14,56	15,19	15,84	15,51
Asentamiento de 0,127cm	16,58	17,39	16,98	17,24	17,48	17,36
Carga de 0,71 kg/cm <sup>2</sup>	19,67	16,12	17,89	17,97	16,32	17,15
Promedio	17,05	16,28	16,66	16,83	16,82	16,83
	promedio		16,66	promedio		16,83

Microsoft Excel 2007®

Por último se presenta el resultado final de los ensayos de laboratorio y su variación con

respecto a los resultados de campo, expresada como un error.

**Cuadro 35. Resultados finales y comparación con el valor del coeficiente de balasto para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón**

	Campo	Corrigiendo el $K$ obtenido del Laboratorio	% Desv	Corrigiendo la curva obtenida en Laboratorio	% Desv
$K_{S30}$	6,60 kg/cm <sup>3</sup>	6,94 kg/cm <sup>3</sup>	6,59	7,01 kg/cm <sup>3</sup>	7,63
$K_{S12,5}$	15,84 kg/cm <sup>3</sup>	16,66 kg/cm <sup>3</sup>		16,83 kg/cm <sup>3</sup>	
$K_{h30}$	4,40 kg/cm <sup>3</sup>	4,63 kg/cm <sup>3</sup>		4,67 kg/cm <sup>3</sup>	

Microsoft Excel 2007®

### Verificación de las características del material remoldeado

Para asegurar que el resultado del ensayo de carga vertical ejecutado en el laboratorio, pueda ser verdaderamente comparado con el ensayo de campo, es importante realizar una verificación de las características que el material dentro del molde presentó en la ejecución del ensayo.

Tales características son: contenido de humedad (%w), densidad húmeda ( $\gamma$ ). Esta verificación, como se apuntó en el apartado "Metodología", se realizó a partir de muestras inalteradas recuperadas del material presente dentro del molde.

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 35 y el Cuadro 36.

**Cuadro 36. Verificación de densidad de las muestras remoldeadas en el laboratorio del material de Higuito de Desamparados.**

	Muestra 01	Muestra 02	Promedio	$\gamma$ campo	% Desv
	kg/m <sup>3</sup>				
Ensayo 01	2040,40	1940,84	1990,62	1941,49	2,53
Ensayo 02	2031,25	2078,24	2054,74		5,83
Ensayo 03	1994,48	2005,75	2000,12		3,02

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 37. Verificación de humedad de las muestras remoldeadas en el laboratorio del material de Higuito de Desamparados.**

	Muestra 01	Muestra 02	Promedio	%w Real	% Desv
	%				
Ensayo 01	19,90	20,05	19,98	21	4,87
Ensayo 02	20,28	20,69	20,48		2,46
Ensayo 03	21,18	19,53	20,35		3,08

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 38. Comparación entre el coeficiente de balasto obtenido del ensayo de carga y el estimado a partir de la resistencia a la compresión inconfiada del material remoldeado en laboratorio, para el material de Higuito de Desamparados.**

	$q_{u1}$	$q_{u2}$	Promedio	$q_{u \text{ real}}$	$K_{12,5 \text{ calc}}$	$K_{12,5}$	% Desv
	kg/cm <sup>2</sup>				kg/cm <sup>3</sup>		
Ensayo 01	8,35	4,86	6,61	3,40	10,87	72,93	85,10
Ensayo 02	7,59	7,39	7,49		12,33	90,20	83,10
Ensayo 03	7,49	6,59	7,04		11,58	83,52	84,12
						Promedio	84,11

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 39. Verificación de densidad de las muestras remoldeadas en el laboratorio del material de Puesto 07, P. H. Reventazón.**

	Muestra 01	Muestra 02	Promedio	$\gamma_{\text{Real}}$	% Desv
	kg/m <sup>3</sup>				
Ensayo 01	1604,75	1657,13	1630,94	1502,78	8,53
Ensayo 02	1604,39	1604,39	1604,39		6,76

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 40. Verificación de humedad de las muestras remoldeadas en el laboratorio del material de Puesto 07, P. H. Reventazón.**

	Muestra 01	Muestra 02	Promedio	%W <sub>Real</sub>	% Error
	%				
Ensayo 01	43,90	49,87	46,89	43,77	7,12
Ensayo 02	50,00	50,00	50,00		14,23

Microsoft Excel 2007®

**Cuadro 41. Comparación entre el coeficiente de balasto obtenido del ensayo de carga y el estimado a partir de la resistencia a la compresión inconfiada del material remoldeado en laboratorio, para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón.**

	$q_{u1}$	$q_{u2}$	Promedio	$q_{u \text{ real}}$	$K_{S12,5 \text{ calc}}$	$K_{S12,5}$	% Desv
	kg/cm <sup>2</sup>				kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	
Ensayo 01	1,17	1,17	1,17	0,48	1,92	31,42	93,88
Ensayo 02	1,02	1,02	1,02		1,68	30,01	94,40
						Promedio	94,14

Microsoft Excel 2007®



# Ensayos adicionales

## Ensayo Presiométrico

Al realizar este ensayo para el Sitio 01 se obtuvo la curva Ménard, de donde se determinan los valores necesarios para estimar el módulo presiométrico del material ( $E_0$ ). Las curvas

obtenidas en la ejecución de los ensayos se debieron corregir tanto por presión como por volumen. Las correcciones y el cálculo del módulo presiométrico se hicieron utilizando la hoja de cálculo que se presenta en el Anexo 3, la cual es utilizada en el ICE para interpretar y estimar algunos parámetros a partir del ensayo presiométrico. La curva corregida obtenida en el ensayo realizado en el Sitio 01 se muestra en la Figura 52.

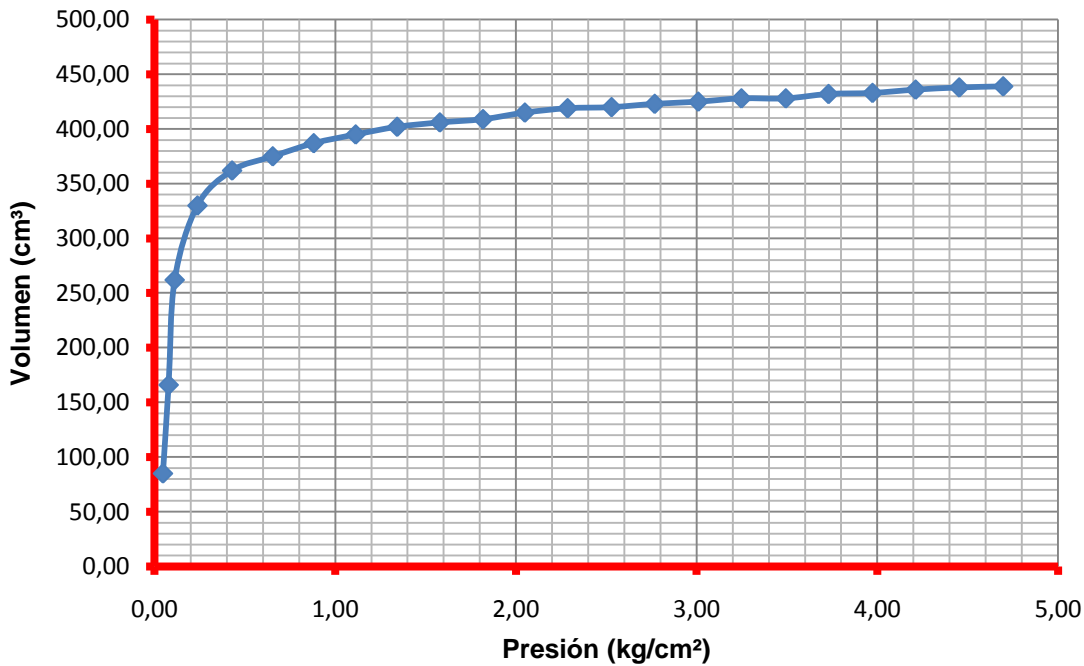


Figura 52. Curva presiométrica para el material del Sitio 01 – Higuito de Desamparados.  
Microsoft Excel 2007®

Partiendo del módulo presiométrico obtenido de la hoja de cálculo del Anexo 3 y empleando la ecuación 13, se obtiene el módulo de deformación del material que se relaciona con el coeficiente de balasto mediante la ecuación 5. Los resultados logrados se muestran a continuación.

Para el Sitio 02 se presenta la curva Ménard corregida en la Figura 53. Los resultados obtenidos para la determinación del valor del módulo presiométrico utilizado para encontrar el coeficiente de balasto del material, se indican en el Cuadro 43. Para hacer esta determinación se siguió la misma metodología del Sitio 01.

<b>Cuadro 42. Determinación del Coeficiente de Balasto para el material Higuito de Desamparados.</b>				
$E_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\alpha$	$E$ kg/cm <sup>2</sup>	B cm	$K_{S30}$ kg/cm <sup>3</sup>
228,09	1/2	456,18	30	17,06

Microsoft Excel 2007®

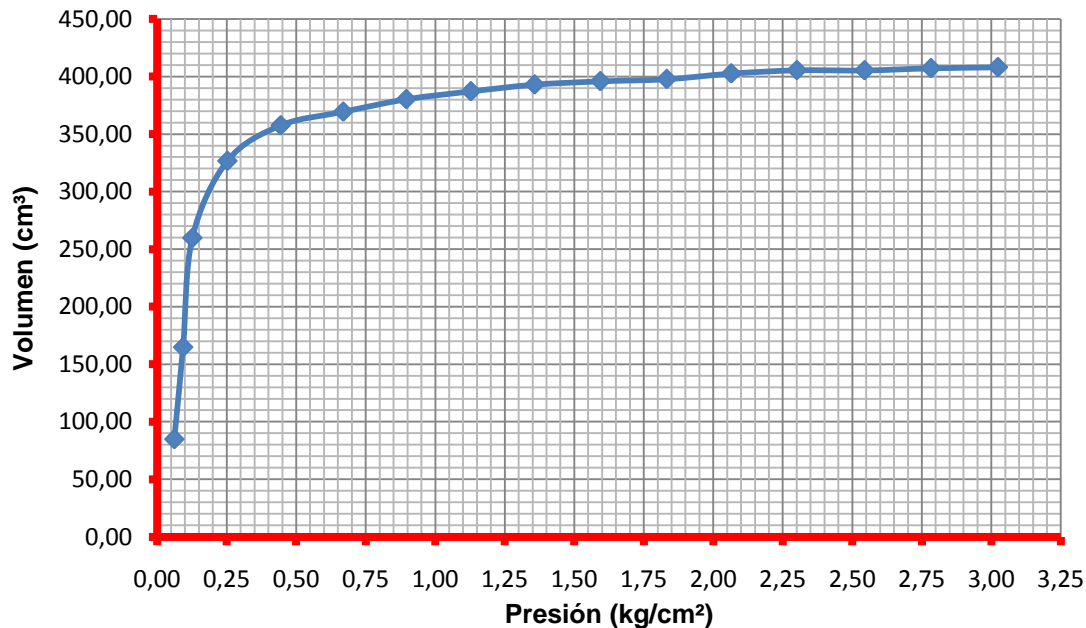


Figura 53. Curva presiométrica para el material del Sitio 01 – Puesto 07, P. H. Reventazón.

Microsoft Excel 2007®

<b>Cuadro 43. Determinación del Coeficiente de Balasto para el material Puesto 07, P. H. Reventazón.</b>				
$E_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\alpha$	$E$ kg/cm <sup>2</sup>	B cm	$K_{S30}$ kg/cm <sup>3</sup>
24,23	1/2	48,45	30	1,81

Microsoft Excel 2007®

El valor de  $K_{S30}$  utilizando la ecuación 5 es igual a  $1,81 \text{ kg/cm}^3$ , que comparándolo con el valor determinado de  $K_{30}$  en el ensayo de carga (el cual equivale a 6,51) presenta una diferencia de 72,63 %. La amplia diferencia que el resultado muestra será un tema tratado en el “Análisis de Resultados”.

## Compresión Inconfinada

La ecuación 7 de este trabajo establece una relación directa entre el valor del coeficiente de balasto y la resistencia a la compresión inconfinada que el material presenta. Según Terzaghi esta relación funciona para presiones menores que la mitad de la carga última que el material soporta. Para el caso del material de Higuito de Desamparados, se determinó que el valor de carga última se encontraba en  $13,05 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que mediante la ecuación 7 solo es posible estimar el valor del coeficiente de balasto para presiones menores que  $6,50 \text{ kg/cm}^2$ . De las cuatro muestras recuperadas se practicó el ensayo de compresión inconfinada solamente a tres de ellas, esto debido a que una no fue posible extraerla del *shelby* sin destruirla. El resultado obtenido se muestra a en el Cuadro 44.

<b>Cuadro 44. Comparación entre <math>K_{S30}</math> y <math>q_u</math> para el material de Higuito de Desamparados</b>						
$q_{u1}$	$q_{u2}$	$q_{u3}$	$\bar{q}$	$K_{30}$	$K_{30real}$	%Error
$\text{kg/cm}^2$				$\text{kg/cm}^3$	$\text{kg/cm}^3$	
2,78	3,37	4,04	3,40	5,44	18,13	69,99

Microsoft Excel 2007®

Con respecto al Sitio 02, se realizaron dos ensayos de compresión inconfinada, puesto que

fue el número de muestras recuperado en el campo. Ver Cuadro 45.

<b>Cuadro 45. Comparación entre <math>K_{S30}</math> y <math>q_u</math> para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón</b>					
$q_{u1}$	$q_{u2}$	$\bar{q}$	$K_{30}$	$K_{30real}$	%Error
$\text{kg/cm}^2$			$\text{kg/cm}^3$	$\text{kg/cm}^3$	
0,45	0,52	0,48	0,77	6,51	88,12

Microsoft Excel 2007®

## Determinación de humedad y densidad óptima

Para ambos materiales fue necesario realizar el ensayo de compactación Próctor Estándar, esto para determinar el contenido de humedad óptimo del material, dato que fue necesario conocer para conformar los especímenes que se utilizan en el ensayo CBR, del cual se hablará más adelante. En la Figura 54 se muestra el gráfico de Densidad seca – Humedad para el material de Higuito de desamparados. Adicional al gráfico mencionado anteriormente, se muestra en la misma Figura 54 la curva de saturación total, con el fin de verificar si la compactación que el material presenta en campo se encuentra bajo esta curva. Para determinar la curva de saturación total fue necesario conocer el valor de gravedad específica de cada material, dato que se proporcionó anteriormente. Además para calcular la densidad seca máxima correspondiente a cada contenido de humedad se utilizó la siguiente ecuación:

$$\gamma_z = \frac{\gamma_T}{w + \frac{1}{G_s}} \dots\dots\dots (\text{ec.22})$$

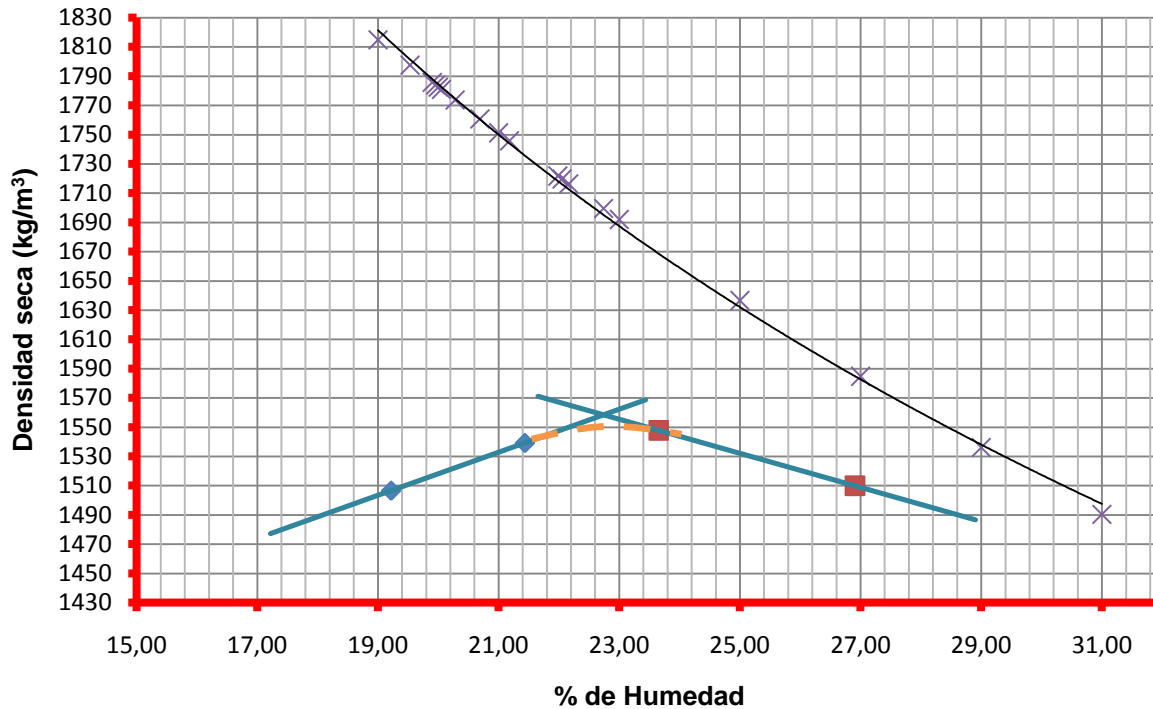


Figura 54. Resultado del ensayo Próctor Estándar y curva de Saturación máxima para el material de Higuito de Desamparados. Microsoft Excel 2007®

De la Figura anterior es posible determinar que el contenido de humedad óptimo del material es de 22,80 % y la densidad seca óptima ( $\gamma_d$ ) de 1550,00 kg/m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que el contenido de humedad en campo es ligeramente más bajo que el contenido óptimo ( $\%W_{\text{campo}} = 21,00 \%$ ), pero muestra una densidad mayor, puesto que en el campo la densidad seca del material se estimó en 1604,56 kg/m<sup>3</sup> lo cual es aceptable debido a que, como es posible observar en la curva de saturación total, para el contenido de humedad de campo el material puede presentar aún una mayor densidad ( $\gamma_d = 1750,00 \text{ kg/m}^3$ ).

Por su parte la Figura 55 presenta el resultado del ensayo Próctor Estándar y la curva de saturación total para el material del Sitio 02.

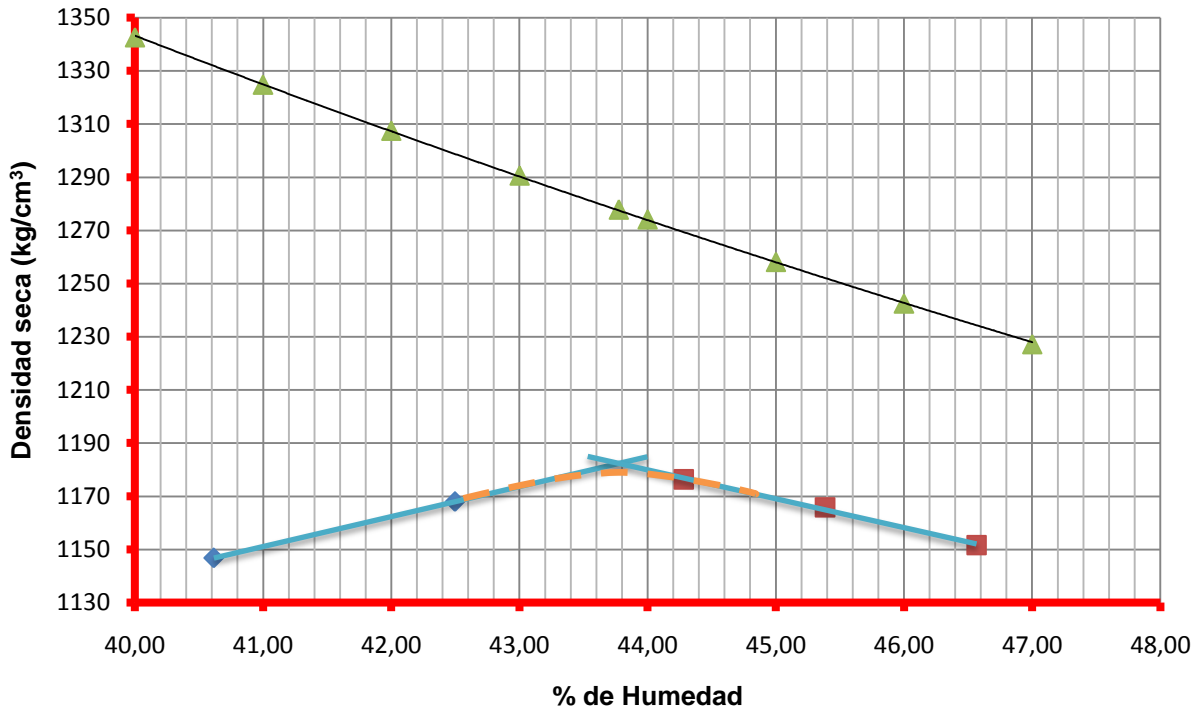


Figura 55. Resultado del ensayo Próctor Estándar y curva de Saturación máxima para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón. Microsoft Excel 2007®

Como es posible notar en la Figura 55 la humedad óptima del material es 43,80 % y su densidad seca 1180 kg/m<sup>3</sup>. Por otra parte es importante recordar que el ensayo de carga en laboratorio se realizó a la humedad óptima estimada en el ensayo Próctor Estándar. Para el contenido de humedad mencionado anteriormente la densidad seca máxima que el material presentaría es de 1280,00 kg/m<sup>3</sup> y la densidad seca con la cual se conformó el modelo de laboratorio es de 1045,23 kg/m<sup>3</sup>, evidentemente más baja que la máxima teórica.

## Determinación del valor CBR

Para el caso del Sitio 01 el ensayo CBR se realizó en estado no saturado de las muestras. Esta decisión se basó en que el contenido de humedad natural estuvo muy cercano al óptimo, por lo cual no fue necesario llevar a cabo el proceso de inmersión de las muestras para que estas se saturen. La Figura 56 muestra los gráficos Esfuerzo – Penetración de cada una de las muestras (10, 25 y 56 golpes) de donde se tomaron los valores de esfuerzo que produjeron las penetraciones de 2,5 mm para determinar el valor CBR en la forma en que se indicó en el apartado de metodología. El gráfico que relaciona Porcentaje de Compactación – CBR se presenta en la Figura 57.

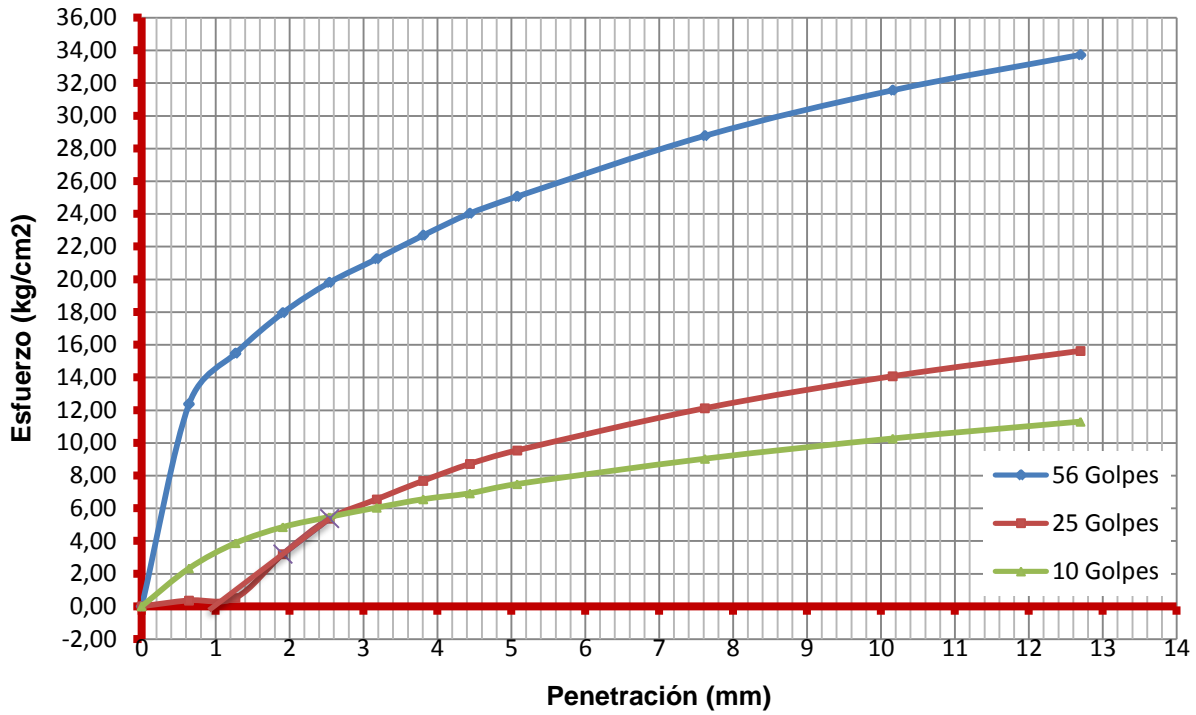


Figura 56. Curvas Esfuerzo – Penetración del ensayo CBR para el material de Higuito de Desamparados.  
Microsoft Excel 2007®

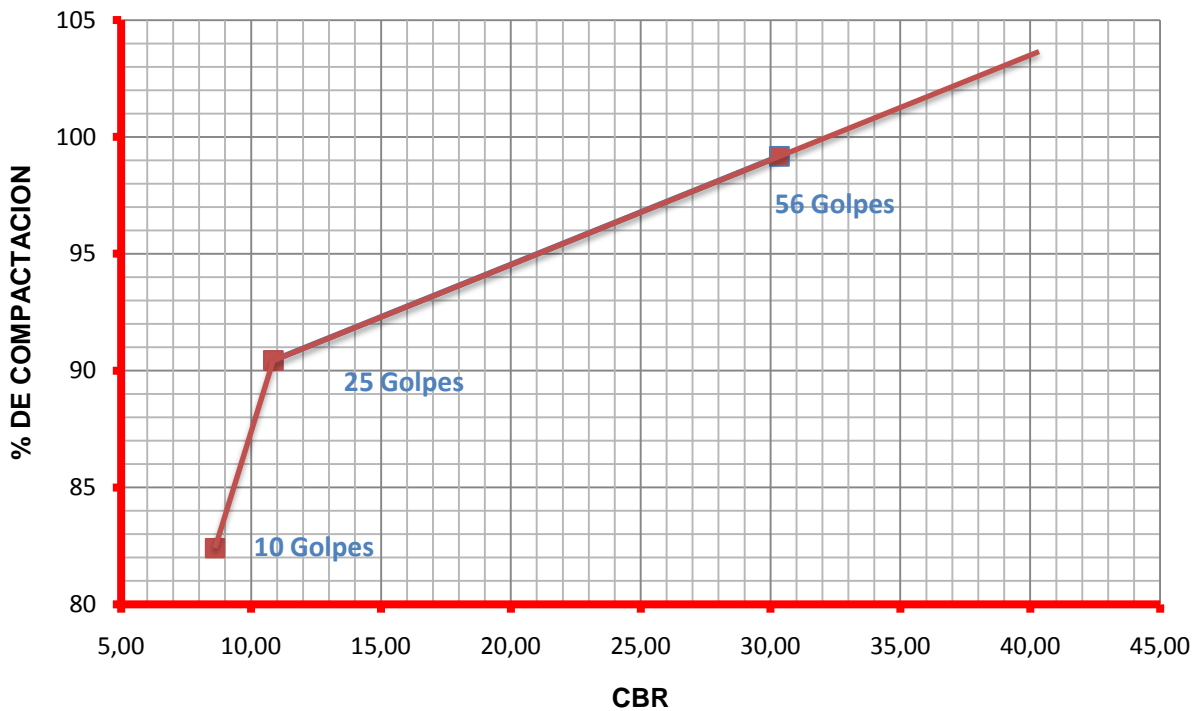


Figura 57. Diagrama de estimación del valor de CBR para el material de Higuito de Desamparados.  
Microsoft Excel 2007®

Como la densidad en campo es mayor a la densidad máxima determinada en el ensayo Próctor Estándar, el porcentaje de compactación es mayor al 100%, por lo cual se debió extrapolar la curva para determinar el valor de CBR.

Ahora bien, en cuanto a la comparación entre el coeficiente de balasto obtenido estimando una relación entre ese valor y el CBR determinado en los ensayos, se utilizó tanto el nomograma mostrado en el Anexo 1 como la curva logarítmica del mismo Anexo, aún cuando los valores que de ambos métodos se extraen

son muy similares. Además, se comparó el resultado obtenido en esta investigación con la ecuación 12. Los resultados se muestran en el Cuadro 46, los cuales, para los tres métodos de estimación del coeficiente de balasto a partir del valor de CBR, ofrecen el valor  $K_{76}$ , es decir, un valor estimado con una placa de 76 cm de diámetro, que dicho sea de paso se estimó a partir de los resultados de los ensayos de campo y la ecuación 4.

<b>Cuadro 46. Estimación de la relación entre CBR y coeficiente de balasto para el material de Higuito de Desamparados.</b>							
<b>Características del Material</b>							
$\gamma_{NAT}$ :	1941,49 kg/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dopt}$ :	1550,00 kg/m <sup>3</sup>	CBR:		40,06	
$\gamma_{dNat}$ :	1604,53 kg/m <sup>3</sup>	%compactación:	103,52				
<b>Relaciones Teóricas CBR - <math>K_{76}</math></b>							
Real		Anexo 1.1: Nomograma		Anexo 1.2: Curva Logarítmica		Conforme ICC PUCV	
$K_{S30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$K_{S76}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$K_{S76}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	% Desv	$K_{S76}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	% Desv	$K_{S76}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	% Desv
19,81	7,82	11,77	50,51	11,56	47,82	7,23	7,54

Microsoft Excel 2007®

En el caso específico del Sitio 02, en el ensayo CBR se realizó la fase de inmersión de las muestras hasta lograr su saturación final. Esto debido a que, al contrario del Sitio 01, la humedad en campo fue mayor a la óptima obtenida en el ensayo Próctor Estándar. Los esfuerzos para provocar las penetraciones de 2,5 mm se muestran en la Figura 58. Por otra parte en la Figura 59 se muestra el diagrama para la obtención del valor de CBR.

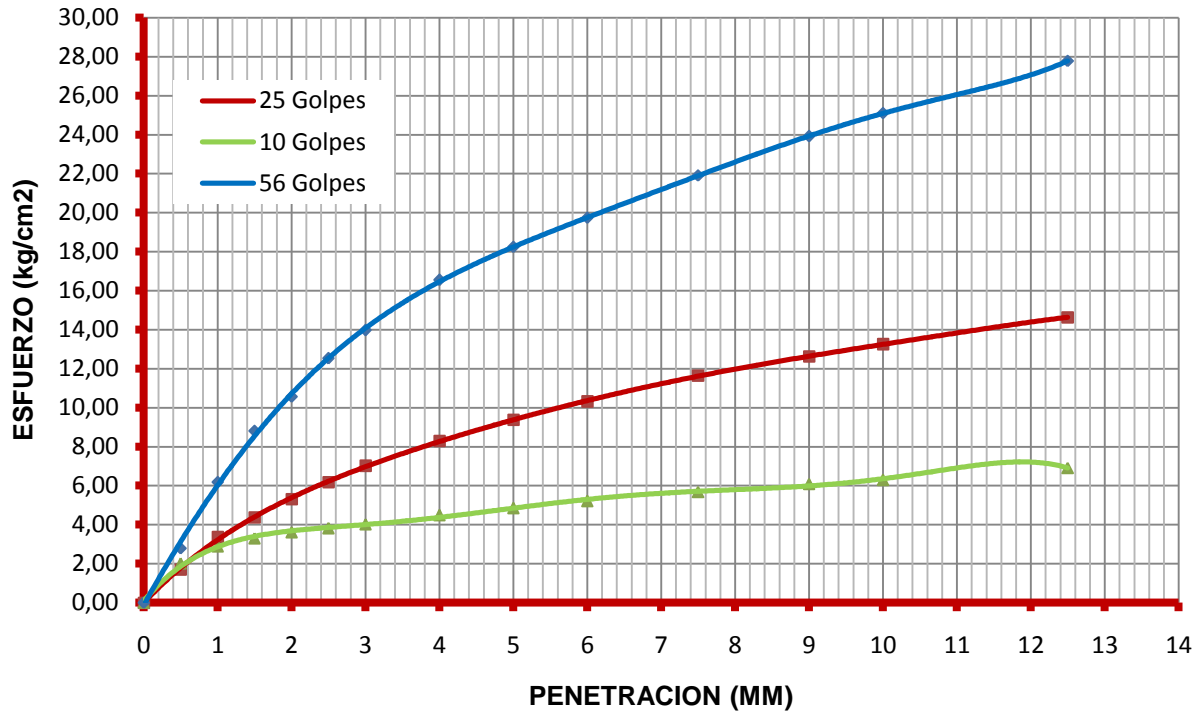


Figura 58. Curvas Esfuerzo – Penetración del ensayo CBR para el material de Puesto 07- P. H. Reventazón.  
Microsoft Excel 2007®

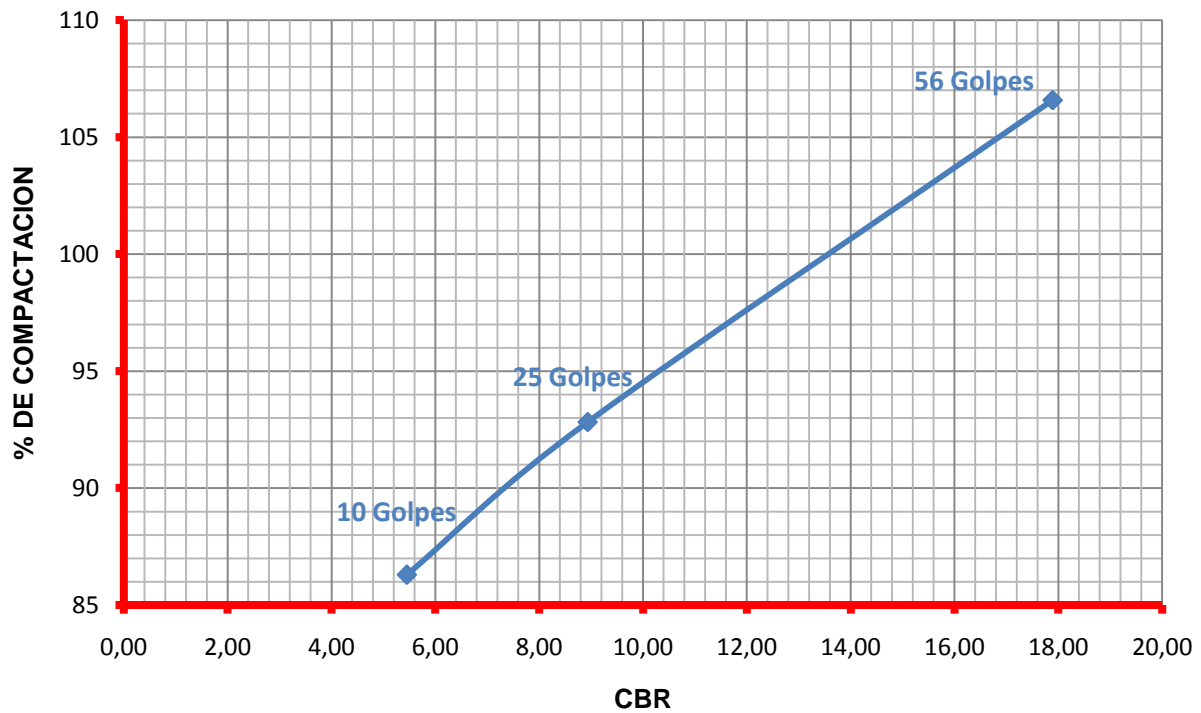


Figura 59. Diagrama de estimación del valor de CBR para el material de Puesto 07- P. H. Reventazón.  
Microsoft Excel 2007®



En el caso de este sitio, no fue necesario extrapolar los datos obtenidos, debido a que la densidad de campo se determinó menor a la densidad máxima del ensayo Próctor Estándar y mayor a la densidad de la muestra menos compactada, por lo que el valor de compactación

de campo se encuentra dentro del gráfico de la Figura 56. El resultado de la comparación entre el CBR obtenido y el coeficiente de balasto de esta investigación, es mostrado y comparado con lo que la teoría expone en el siguiente cuadro.

<b>Cuadro 47. Estimación de la relación entre CBR y coeficiente de balasto para el material de Puesto 07-Reventazón</b>								
<b>Características del Material</b>								
$\gamma_{\text{Nat}}$ :	1644,79 kg/m <sup>3</sup>	$\gamma_{\text{d opt}}$ :	1182,37 kg/m <sup>3</sup>	CBR:				6,54
$\gamma_{\text{d Nat}}$ :	1045,23 kg/m <sup>3</sup>	$\%_{\text{comp}}$ :	88,40					
<b>Relaciones Teóricas CBR - <math>K_{S76}</math></b>								
Real		Anexo 1.1: Nomograma		Anexo 1.2: Curva Logarítmica		Conforme ICC PUCV		
$K_{S30}$	$K_{S76}$	$K_{S76}$	% Desv	$K_{S76}$	% Desv	$K_{S76}$	% Desv	
7,78	3,07	4,25	38,43	4,56	48,52	3,68	20,12	

Microsoft Excel 2007®

## Otras comparaciones de $K_{S30}$ con la teoría

El Cuadro 1 relaciona el valor de coeficiente de balasto para suelos finos con la resistencia a la compresión confinada ( $q_u$ ), como también lo hace la ecuación 7. Al comparar lo obtenido en este trabajo con lo que exponen tanto el Cuadro 1

y la ecuación 7, se observa poca similitud entre el dato obtenido por cualquiera de las dos formas (Cuadro 1 o ecuación 7) y el obtenido a partir de los ensayos de placa realizados. El Cuadro 48 muestra una comparación entre los rangos de  $K_{S30}$  que el Cuadro 1 propone para límites de  $q_u$  con valores de  $K_{S30}$  calculados con la ecuación 7 para los mismos límites de  $q_u$  que propone el Cuadro 1.

<b>Cuadro 48. Comparación de valores de <math>K_{S30}</math> teóricos con el obtenido de ensayo de carga para el material de Higuito de Desamparados</b>						
Rango		$K_{S30}$ Cuadro 1		$K_{S30}$ ecuación 7		$K_{S30}$ Real
0,25	0,50	0,65	1,30	0,41	0,82	<b>18,13</b>
0,50	2,00	1,30	4,00	0,82	3,29	
<b>2,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>8,00</b>	3,29	6,58	
4,00	10,00	8,00	21,00	6,58	16,45	
$q_{u \text{ ensayo}}$	<b>3,40</b>			<b>5,59</b>		

Microsoft Excel 2007®

Con respecto al Sitio 02, una comparación similar a la anterior se expone en el Cuadro 49.

<b>Cuadro 49. Comparación de valores de <math>K_{S30}</math> teóricos con el obtenido de ensayo de placa para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón</b>						
Rango		$K_{S30}$ Cuadro 1		$K_{S30}$ ecuación 7		$K_{S30}$ Real
<b>0,25</b>	<b>0,50</b>	0,65	1,30	0,41	0,82	<b>6,51</b>
0,50	2,00	1,30	4,00	0,82	3,29	
2,00	4,00	4,00	8,00	3,29	6,58	
4,00	10,00	8,00	21,00	6,58	16,45	
<b><math>q_{u\text{ ensayo}}</math></b>	<b>0,48</b>	<b>0,65</b>	<b>1,30</b>	<b>0,79</b>		

Microsoft Excel 2007®

Otra forma de estimar el valor del coeficiente de balasto es mediante la ecuación 6, la cual parte, como se mostró en el apartado de "Antecedentes", del producto entre el factor de

seguridad ( $F.S.$ ) y la carga admisible ( $q_a$ ), lo cual en realidad se refiere a la carga última del material ( $q_{ult}$ ). El resultado estimado a partir de la mencionada ecuación se muestra en la Figura 50:

<b>Cuadro 50. Determinación del coeficiente de balasto a partir de la carga última del material para los dos sitios evaluados</b>						
	$q_{ult}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$q_{ult}$ (kPa)	$K_s \text{ calc}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$K_s \text{ calc}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$K_{30 \text{ real}}$ (Kg/cm <sup>3</sup> )	Factor obtenido
Sitio 01	13,05	1279,77	51190,71	5,22	18,13	1,3893
Sitio 02*	3,13	306,948	12277,93	1,25	4,34	1,3866

Microsoft Excel 2007®

La información presentada en el Cuadro 50 para el Sitio 02 es el resultado del ensayo de placa horizontal. La razón por la cual se presenta ese resultado está en que para este sitio solo fue posible realizar ese ensayo, por lo que solo se tenía el dato de carga última ( $q_{ult}$ ) horizontal y, la determinación se hace con el coeficiente de balasto  $K_{h30}$ .

Por último, como el factor 40 de la ecuación 6 no proporciona una buena aproximación al valor obtenido de  $K_{S30}$ , pero se propuso un factor que equivale a 1,40 (en kg/cm<sup>3</sup>). Lo anterior basado en que para ambos sitios la relación entre el coeficiente de balasto obtenido a partir de los ensayos de carga y la carga última en dicho ensayo, arroja éste factor, que sin duda no puede establecerse como aceptable debido a la poca variedad estadística, pero si proponerse como posible factor que relaciona la carga última del

material y con el coeficiente de balasto, sustentado en que el resultado se repitió en ambos sitios.

# Comparación entre el material inalterado y remoldeado

Con las muestras inalterada extraídas en campo y las tomadas del material remoldeado en el laboratorio, se realizó una comparación entre la resistencia a la compresión simple que ambos tipos de muestras presentaron. En los gráficos

de la Figura 60, se refleja esta comparación donde para el material del Sitio 01, mientras que en la Figura 61 para el Sitio 02, es importante aclarar que en ambas figuras se muestra el resultado de todas las muestras extraídas del campo, pero para el caso de las obtenidas del material remoldeado en el laboratorio, solo se presentan en dichas figuras el resultado de las muestras que presentaron la mayor y la menor resistencia.

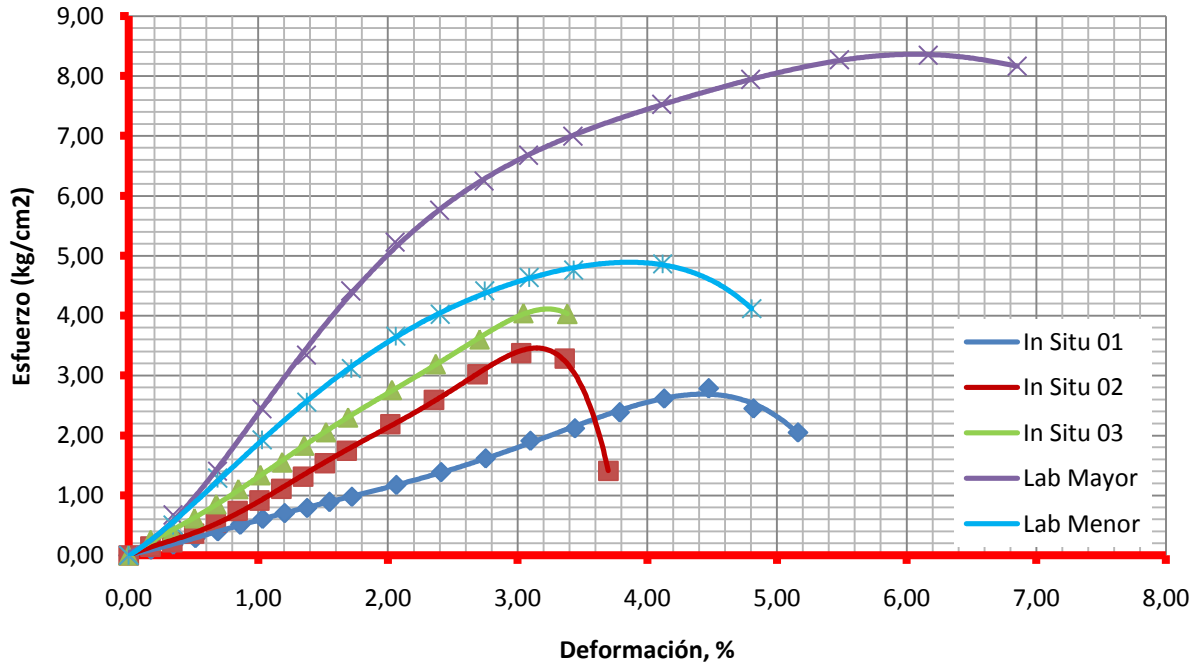


Figura 60. Comparación entre la resistencia a la compresión inconfiada del material inalterado y el material remoldeado de Higuito de Desamparados. Microsoft Excel 2007®

El Cuadro 51, se muestra la determinación del módulo de deformación del material obtenido de los ensayos de compresión inconfiada ( $E_{50}$ ), que se utilizó para determinar con ayuda de la ecuación 5, el valor del coeficiente de balasto y, compararlo con el obtenido del ensayo de carga,

mediante la determinación de un porcentaje de desviación.

**Cuadro 51. Comparación del coeficiente de balasto obtenido a partir del módulo ( $E_{50}$ ), con el del ensayo de carga para el material de Higuito de Desamparados**

	In Situ 01	In Situ 02	In Situ 03	Lab Mayor	Lab Menor
$E_{50}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0,58	1,03	1,35	2,55	1,86
$K_{S30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	0,02	0,04	0,05	0,10	0,07
$K_{S30, real}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	18,24				
% Desviación	99,88	99,79	99,72	99,48	99,62

Microsoft Excel 2007®

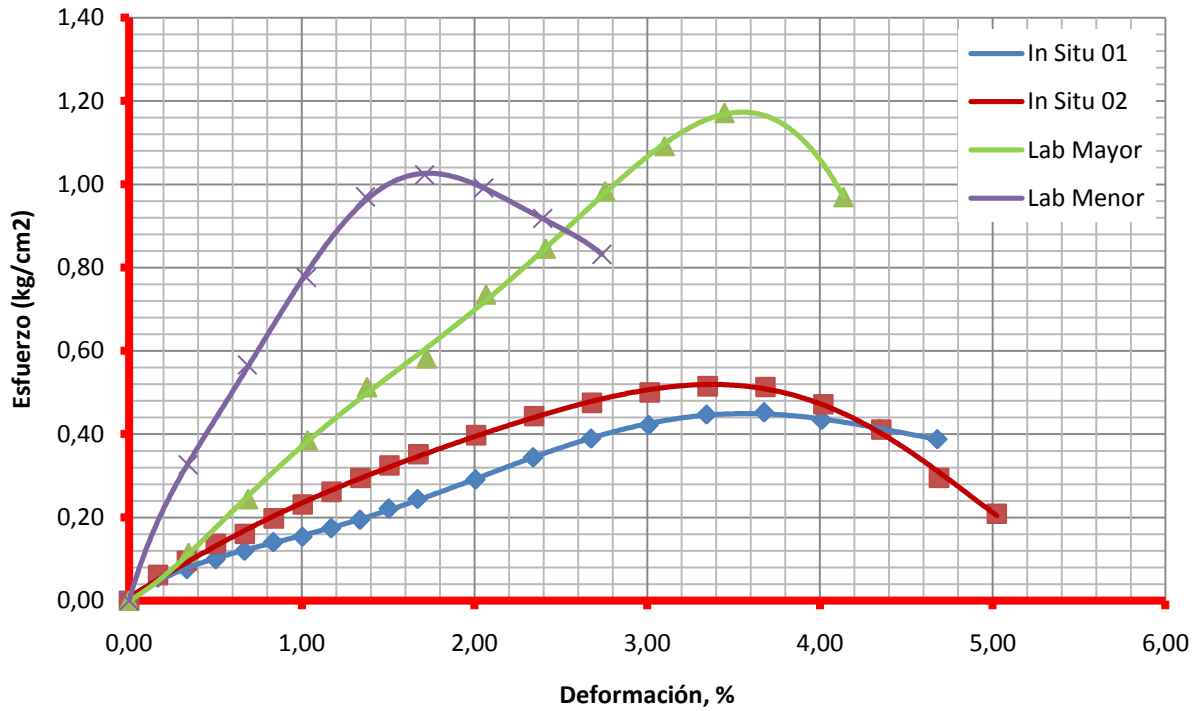


Figura 61. Comparación entre la resistencia a la compresión confinada del material inalterado y el material remoldeado de Puesto 07, P. H. Reventazón. *Microsoft Excel 2007®*

**Cuadro 52. Comparación del coeficiente de balasto obtenido a partir del módulo ( $E_{50}$ ), con el del ensayo de carga para el material de Puesto 07, P. H. Reventazón**

	In Situ 01	In Situ 02	Lab Mayor	Lab Menor
$E_{50}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0,15	0,20	0,34	0,84
$K_{S30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	0,01	0,01	0,01	0,03
$K_{S30, real}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	6,60			
% Desv	99,92	99,89	99,81	99,52

*Microsoft Excel 2007®*

# Análisis de Resultados

## Coeficiente de balasto para el tipo de suelo analizado

Según el nomograma del Anexo 1, es posible realizar una comparación entre el tipo de suelo que se encuentra en un determinado sitio y el valor del coeficiente de balasto que se presentaría en él. Investigadores como, Terzaghi en su trabajo “*Evaluation of coefficients of subgrade reaction*” (1955) o, Sowers en el libro “*Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*” (1972); manifiestan respectivamente que el coeficiente de balasto varía con el área de la placa utilizada en el ensayo de carga y, también con el contenido de humedad que presente el suelo durante este ensayo. Lo anterior hace que parezca imposible pensar en estimar el mencionado coeficiente, solamente con la caracterización efectuada con un ensayo de clasificación *SUCS*, puesto que en un ensayo de clasificación se analizan características como el tamaño de las partículas y la plasticidad del material, sin tomar en cuenta el grado de compactación que el suelo presenta en campo, lo que indudablemente es un factor que afecta la reacción que el terreno impondrá a la cimentación que se coloque sobre él.

Con respecto a los resultados obtenidos en este trabajo, los suelos analizados clasificaron como:

- Sitio 01: Arcilla Densa, color naranja (CH). Con 21% de humedad.
- Sitio 02: Limo Elástico, color rojizo (MH). Con 57% de humedad.

Según el Anexo 1, para el suelo que se encuentra en el Sitio 01, el material debería presentar un coeficiente de balasto  $K_{S76}$  cercano a  $2,00 \text{ kg/cm}^3$ , que equivale con una placa de 30 cm de diámetro a un  $K_{S30}$  de  $5,07 \text{ kg/cm}^3$  aproximadamente. Esto evidencia lo establecido en los párrafos anteriores, debido a que en el

ensayo de carga se determinó el valor  $K_{S30}$  en  $18,24 \text{ kg/cm}^3$ , el cual, presenta una diferencia de 72 % con el resultado que se obtendría con el nomograma del Anexo 1.

En cuanto al Sitio 02, del nomograma del Anexo 1, se estimaría un coeficiente de balasto  $K_{S76}$  de aproximadamente  $2,80 \text{ kg/cm}^3$ , que equivale a un  $K_{S30}$  de  $7,09 \text{ kg/cm}^3$ . Para este sitio, el valor determinado como  $K_{S30}$  del ensayo de carga fue de  $6,60 \text{ kg/cm}^3$ , lo que significa una diferencia de alrededor del 7 %, la cual es considerablemente menor a la diferencia entre resultados que presenta el Sitio 01.

Con los resultados anteriormente expuestos no es posible determinar una relación directa entre el tipo de material y el coeficiente de balasto, esto porque además de que lo expuesto en el Anexo 1 no se cumple, la diferencia encontrada al realizar esta comparación para el material de ambos sitios no se repite, en ambos sitios, lo cual no permite establecer una tendencia.

Por otro lado, si se considera lo apuntado por autores como Terzaghi, Sowers y otros muchos, que manifiestan que el coeficiente de balasto no es función exclusiva del tipo de material sino, de otras características que presenta el terreno (grado de compactación y humedad, entre otras), aún analizando más sitios, quizás no sea posible realizar una estimación confiable del coeficiente de balasto en un terreno, partiendo solo el tipo de material encontrado.

Por último, una alternativa recomendable para realizar estimaciones del coeficiente de balasto, a partir de las propiedades índice del suelo está en la recopilación de los resultados de ensayos de carga como los realizados en este proyecto, donde además de determinar el coeficiente de balasto de los materiales, se podrían evaluar las propiedades índice de estos, para obtener cuadros comparativos como por ejemplo el Cuadro 16. De esta forma, teniendo un material de similares características a alguno ya estudiado, se podría estimar que presentaría

un coeficiente de balasto similar al del material patrón (material al cual ya le han sido determinadas sus características) y, de esta forma estimar el coeficiente de balasto.

## Ensayo de carga vertical In Situ, para el Sitio 01

En este sitio se intentó realizar un ensayo de carga vertical utilizando una placa de 30 cm de diámetro, pero no fue posible obtener resultados de este ensayo, por lo que se tomó la decisión de realizarlo con una placa de 12,5 cm de diámetro.

El problema al realizar este ensayo utilizando la placa de 30 cm de diámetro estuvo en que la resistencia del material analizado venció el peso ejercido por el *backhoe* (utilizado para conformar la trinchera y, además, como reacción al esfuerzo aplicado al terreno), ocasionando que el suelo dejara de deformarse y, por el contrario, el gato hidráulico levantara la máquina. La máquina empleada fue un *backhoe* Caterpillar® modelo 416C, el cual, según especificaciones técnicas, tiene un peso de 9800 kg. La razón por la cual el ensayo de carga realizado con una placa de 30 cm no tuvo éxito, está en que el equipo de ensayo de placa de carga (placas, rótulas, gato hidráulico y extensiones) no fue colocado bajo el centro de masa del aparato, lo cual no permitió aprovechar el peso total de 9800 kg, que hubiese aplicado un esfuerzo de  $13,86 \text{ kg/cm}^2$ . Como la capacidad de carga última mostrada por el material, según la Figura 40, se estableció en  $13,05 \text{ kg/cm}^2$ , al no aprovechar el peso total del *backhoe*, no se logró llegar a la carga necesaria para fallar el material, por lo que el ensayo no se concluyó.

El motivo por el cual el equipo de placa no se colocó bajo el centro de masa para aprovechar el peso completo del *backhoe*, es principalmente por seguridad, ya que desplazándolo del centro de masa se evita que el equipo se desestabilice y caiga, poniendo en peligro al asistente que realiza las lecturas de los asentamientos. Por esto, el esfuerzo de  $13,86 \text{ kg/cm}^2$  que el *backhoe* puede haber aportado se redujo sustancialmente y no fue posible llegar a la falla con la ayuda de esta máquina.

Del ensayo vertical utilizando la placa de 12,5 cm, es preciso decir que este tuvo una desventaja por la forma en que fue realizado.

Específicamente por lo reducido de la placa empleada en su ejecución, debido a que si se compara el esfuerzo aplicado por la placa utilizada, con el que pudo ejercer la que se pretendió emplear en principio de 30 cm, los esfuerzos registrados con la primera fueron mayores (esto lógicamente porque al disminuir el área de contacto y aplicar siempre la misma fuerza, los esfuerzos aumentan). Lo anterior ocasionó imprecisión en la tendencia del gráfico de Esfuerzo – Asentamiento, sobre todo en su parte inicial, pues el primer incremento de carga va de  $0 \text{ kg/cm}^2$  a  $1,86 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que con la placa de 30 cm de diámetro el primer incremento hubiese ido de  $0 \text{ kg/cm}^2$  a  $0,32 \text{ kg/cm}^2$ . La importancia de considerar esto radica, sobre todo, en la estimación del coeficiente de balasto por el criterio que lo establece como la razón entre la carga de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$  y su respectiva deformación registrada en el ensayo de carga.

Del resultado del ensayo vertical realizado dentro de una trinchera y con la placa de 12,5 cm, es evidente notar que no se presenta mayor variación entre los resultados obtenidos por los cuatro métodos propuestos (ver Cuadro 21).

Analizando el coeficiente de balasto obtenido a partir de módulos secantes (método partiendo de la carga admisible  $q_{adm}$  y, el método tomando el coeficiente de balasto a una deformación  $0,127 \text{ cm}$ ), se hace evidente que no existe mayor variación entre los dos resultados, puesto que se obtuvo un valor de  $K_{S12,5}$  de  $48,02 \text{ kg/cm}^3$  por el primer método y  $47,55 \text{ kg/cm}^3$  mediante el tercero.

Para el segundo método de estimación (pendiente de la fase pseudo-elástica), se debe aclarar que su análisis se separó de los dos métodos antes expuestos, por motivo de que, en este caso, el coeficiente de balasto se determina a partir de un módulo tangente. En cuanto al resultado, se puede notar que el valor determinado decae en comparación con el obtenido de los dos métodos antes analizados ( $K_{S12,5} = 38,83 \text{ kg/cm}^3$ ). Además, si se determina un promedio entre los tres métodos ya analizados, se obtiene un coeficiente de balasto  $K_{S12,5}$  de  $44,80 \text{ kg/cm}^3$ , lo que deja a los valores obtenidos a partir de módulos secantes sobre este promedio, mientras que el valor calculado a partir de la pendiente de la fase pseudo-elástica, queda por debajo del promedio. Por este motivo se determinó que, lo conveniente es establecer el valor del coeficiente de balasto mediante la

pendiente de la recta de mejor ajuste en la fase pseudo-elástica del gráfico Esfuerzo – Asentamiento.

Por su parte el resultado del cuarto método propuesto para estimar el coeficiente de balasto (a un esfuerzo de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$ ), fue descartado para el Sitio 01; esto porque el propio método sugiere un valor máximo para calcularlo directamente sin realizar el gráfico (ver Cuadro 20). Además, determinar mediante este método el valor del coeficiente de balasto, probablemente no otorgue un dato exacto. Esto porque no hay lecturas intermedias en el rango de  $0 \text{ kg/cm}^2$  a  $1,86 \text{ kg/cm}^2$ .

De todo lo anteriormente analizado, se determinó fijar el coeficiente de balasto para una placa de 30 cm de diámetro ( $K_{S30}$ ) en  $18,67 \text{ kg/cm}^3$ , que se estimó indirectamente a partir del resultado del ensayo vertical con placa de 12,5 cm de diámetro y la ecuación 4.

## Ensayo de carga horizontal In Situ, para el Sitio 01

Para determinar el valor de  $K_{S30}$  a partir del ensayo de carga horizontal, se empleó la ecuación 8. Esta fue aplicada al resultado obtenido por cada uno de los cuatro métodos para determinar el coeficiente de balasto, que en este trabajo se propone.

Al igual que en el caso del ensayo de carga vertical, al comparar lo obtenido con el método basado en la carga admisible y el basado en el asentamiento de  $0,127 \text{ cm}$ , se establecen como resultados  $11,37 \text{ kg/cm}^3$  y  $13,03 \text{ kg/cm}^3$ , respectivamente, determinándose entre ambos un promedio de  $12,20 \text{ kg/cm}^3$ , que si bien es cierto no se muestra tan preciso como en el ensayo de placa vertical, aún se considera que ambos resultados son aceptables como coeficiente de balasto  $K_{h30}$  del material del Sitio 01.

El segundo método de determinación, el cual es un módulo tangente, como ya fue mencionado, mantiene el comportamiento del Sitio 01, en el que el coeficiente de balasto determinado bajo éste aporta el dato más conservador de los cuatro analizados.

Por último, en cuanto al ensayo de carga horizontal, el valor determinado como coeficiente de balasto para el Sitio 01 es el promedio de tres

de los cuatro métodos analizados (excluyendo el que se basa en la carga de  $0,71 \text{ kg/cm}^2$ ) y, equivale a  $11,88 \text{ kg/cm}^3$ , valor que permite estimar el coeficiente de balasto  $K_{S30}$   $17,81 \text{ kg/cm}^3$ .

De este ensayo es importante observar dos situaciones: 1) al analizar la Figura 44, se hace evidente que por utilizar una placa de 30 cm de diámetro, los incrementos de esfuerzos aplicados son más pequeños que con el uso de la placa de 12,5 cm, como ya se había apuntado. La ventaja de realizar este ensayo con una placa de 30 cm o mayor, se nota al observar cómo el gráfico de la Figura 44 describe una curva Esfuerzo – Deformación casi perfectamente ajustada a la teoría. 2) Debido a la apreciable tendencia lineal que presentan los datos, los resultados del coeficiente de balasto determinado por cualquiera de los tres primeros métodos hasta ahora utilizados (exceptuando el último, por las razones ya mencionadas), aportan resultados que no tienen mayor diferencia entre sí.

Evaluando tanto el resultado de  $K_{S30}$  obtenido a partir del ensayo vertical, empleando la placa de 12,5 cm de diámetro, como el estimado indirectamente del ensayo de carga horizontal, con la placa de 30 cm, es evidente notar que existe cierto acercamiento entre ambos valores determinados, de los cuales se podría proponer su promedio ( $18,24 \text{ kg/cm}^3$ ), como el coeficiente de balasto  $K_{S30}$ . Aún cuando asegurar con solo dos ensayos que el valor de  $K_{S30}$  que se acaba de establecer es el que presenta el Sitio 01, en este proyecto se consideró  $18,24 \text{ kg/cm}^3$  como el valor real del  $K_{S30}$ . Esto apoyado en la escasa diferencia presentada entre el resultado del ensayo vertical y el horizontal.

## Ensayo de carga horizontal In Situ, para el Sitio 02

Como se ha mencionado ya con anterioridad, tanto en el apartado de “Metodología” como en el de “Resultados”, para este sitio solamente fue posible realizar el ensayo de carga horizontal.

El resultado obtenido refleja la poca resistencia que el suelo ofreció, mostrando una carga última de  $3,13 \text{ kg/cm}^2$ , que en comparación con el suelo del Sitio 01, muestra a este material como de menor calidad.

La baja resistencia que el material mostró se debe principalmente al alto contenido de humedad que el suelo poseía el día en que fue realizado el ensayo de carga.

En cuanto al análisis de los datos obtenidos, se realizaron las mismas estimaciones que en el Sitio 01, donde el coeficiente de balasto horizontal, determinado para una placa de 30 cm de diámetro, mediante el primer y tercer método expuesto en este trabajo (método partiendo de la carga admisible  $q_{adm}$  y método tomando el coeficiente de balasto a una deformación 0,127cm), proponen que su valor es de 4,63 kg/cm<sup>3</sup> y 5,19 kg/cm<sup>3</sup>, respectivamente, lo cual propone un promedio de 4,90 kg/cm<sup>3</sup>.

De este mismo ensayo de carga se obtuvo, mediante el segundo método, que el coeficiente de balasto equivale a 3,06 kg/cm<sup>2</sup>; lo que prueba de nuevo que, realizar la determinación del coeficiente de balasto mediante este criterio, otorga un parámetro más conservador que el de los otros dos métodos antes presentados, por lo que, ya analizados los resultados del Sitio 01 y del Sitio 02, se podría determinar que el coeficiente de balasto obtenido con la pendiente de la recta de mejor ajuste de la fase pseudo-elástica es lo conveniente, sobre todo por motivo de que este resultado es el que aporta un valor más conservador.

También es importante citar que para el ensayo de carga horizontal realizado en el Sitio 02, en este caso el resultado aportado por el cuarto método sí es concluyente debido a que se estimó en 4,50 kg/cm<sup>3</sup>, lo cual equivale a  $K_{S30}$  6,75 kg/cm<sup>3</sup>, quedando bajo el valor límite que el método propone, que dicho sea de paso es igual a 14,50 kg/cm<sup>3</sup>, con lo que evidentemente el valor obtenido mediante este último criterio sí debe ser considerado.

Tomando en cuenta los cuatro métodos empleados en este trabajo se determinó un valor de  $K_{h30}$  es igual a 4,40 kg/cm<sup>3</sup>, el cual, con la ayuda de la ecuación 8, establece un valor de  $K_{S30}$  igual a 6,60 kg/cm<sup>3</sup>.

Como se estableció en el Sitio 01, al comparar el resultado obtenido del ensayo de carga vertical con el uso de una placa de 12,5 cm y el del horizontal con la placa de 30 cm, y considerando que ambos resultados no muestran diferencia significativa para el Sitio 02, como solo fue posible realizar un ensayo en campo y este fue de tipo horizontal, el valor de  $K_{S30}$  estimado con la ecuación 8 y el ensayo de campo realizado se

tomará como válido. Si bien es cierto sería apresurado asegurar que este valor es correcto solamente por la concordancia que mostraron los resultados obtenidos para el primer sitio, la falta de más ensayos que ayuden a dar exactitud a la investigación y la falta de tiempo para realizar este trabajo, obligó a tomar decisiones como ésta para poder tener un parámetro de comparación entre lo obtenido en el campo con lo que se observó en el laboratorio, lo cual se estará mostrando más adelante.

En resumen, el valor que se le asignó al coeficiente de balasto de cada sitio se presenta a continuación.

<b>Cuadro 53. Valores propuestos del coeficiente de balasto para cada sitio analizado.</b>			
	$K_{S12,5}$	$K_{h30}$	$K_{S30}$
	Kg/cm <sup>3</sup>		
Sitio 01	44,80	12,16	18,24
Sitio 02	-	4,34	6,60

Microsoft Excel 2007®

## Ensayo de carga en laboratorio, para el material de Sitio 01

Como se mencionó antes, básicamente en este proyecto se buscó determinar la posible relación entre el coeficiente de balasto obtenido con un ensayo *In Situ*, y un resultado de similar naturaleza, pero derivado del ensayo de carga vertical modelado en el laboratorio.

Como ya se ha señalado, para este sitio se lograron realizar tres repeticiones del ensayo de carga en el laboratorio; esto ayudo, a ajustar el valor obtenido y a determinar si este tiene una repetitividad aceptable.

Los ensayos de laboratorio presentaron la tendencia que se manifiesta en los gráficos de la Figura 46. Cabe destacar que en la figura mencionada, se muestra solamente la fase pseudo-elástica del material; es decir no se graficó el material en la falla. Lo anterior debido a que para determinar el coeficiente de balasto de campo o de laboratorio, éste se desprende de la mencionada fase pseudo-elástica.

Los resultados de estos ensayos, no se ajustan de forma precisa con el resultado del



ensayo efectuado en el campo, por lo cual se buscó determinar el factor de ajuste entre los resultados de ambos ensayos.

El coeficiente de balasto obtenido de primera mano (o sin corregir) en los ensayos de laboratorio, que se presentan en el Cuadro 26, muestran cómo la determinación de éste mediante el primer y tercer método, proporcionan resultados que no varían mucho entre sí, otorgando, por ejemplo, para el primer ensayo de laboratorio un valor de  $K_{S12,5}$  que equivaldría a  $76,20 \text{ kg/cm}^3$ , mientras que si se determina el coeficiente de balasto con el segundo método el valor obtenido es de  $66,40 \text{ kg/cm}^3$  y, si éste se introduce en la determinación del promedio se verá reducido a  $72,93 \text{ kg/cm}^3$ .

En lo expuesto en el párrafo anterior se hace evidente que, si por un lado de nuevo el valor del coeficiente de balasto determinado, ya sea por el primero o el tercer método, no presenta una considerable variación, el valor determinado por el segundo método, aún en los ensayos de laboratorio, sigue brindando un dato más conservador que el deducido por los otros dos métodos.

En cuanto a la determinación del factor de ajuste, éste se realizó, como ya fue mencionado en el apartado de “Resultados”, con la siguiente expresión:

$$\frac{y_L}{y_C} = \phi_K$$

donde:

$y_L$  = Asentamiento producto de un determinado esfuerzo aplicado, registrado en el Laboratorio.

$y_C$  = Asentamiento producto de un determinado esfuerzo aplicado, registrado *In Situ*.

La relación anterior, se empleó en cada uno de los pares ordenados que se registraron en los ensayos de carga analizados, obteniendo así los valores de  $\phi_K$  del Cuadro 25, los cuales, como se muestra, fueron promediados para establecer el factor de ajuste  $\phi_K$  para el material del Sitio 01, el cual se fija en 0,50. Con la determinación de este factor, lo que se concluye es que los asentamientos registrados sobre la muestra remoldeada en el laboratorio, se reducen aproximadamente a la mitad de los que suceden en el campo. Aún cuando el espécimen remoldeado en teoría presenta la misma

densidad y humedad que en el campo, el espécimen compactado dentro del molde, presenta un aumento en su resistencia a la compresión inconfiada, como se evidencia en la Figura 60, donde inclusive la muestra recuperada del molde, tras el ensayo de carga vertical en el laboratorio que presentó una menor resistencia a la compresión inconfiada (“*Lab Menor*”), superó la resistencia obtenida de todas las muestras inalteradas recuperadas en el campo. La posible razón de esta aparente mejora, posiblemente está en la diferencia de los volúmenes analizados; esto porque aún cuando al espécimen remoldeado en el laboratorio se le dio la misma humedad y densidad que en el campo, la realidad es que en estado natural o inalterado, el material posiblemente presentará vacíos e imperfecciones, que no será posible reproducir, dando como resultado una mejora del material y una mayor resistencia a la mostrada en su estado natural y, por esto, las deformaciones en el laboratorio se vieron reducidas.

Volviendo al factor 0,50, este se utilizó para hacer la comparación entre el resultado obtenido de los ensayos de carga vertical en el laboratorio, con lo que del ensayo de carga en campo se obtuvo.

En cuanto al factor 0,50, la primera forma de ajustar el resultado de laboratorio fue calculando el valor del coeficiente de balasto, obtenido a partir de los ensayos de carga vertical de laboratorio, el cual, como se mostró en el Cuadro 26 es considerablemente más elevado que el determinado en el campo (en este caso si es posible una comparación directa, ya que tanto en el laboratorio como en el campo se realizó el ensayo de carga vertical haciendo uso de una placa de 12,5 cm de diámetro). La razón de esto está en el hecho de que para una misma carga las deformaciones en el campo son mayores a las presentadas en el laboratorio, haciendo que la pendiente de los gráficos de laboratorio (en su parte pseudo-elástica) sea más pronunciada que la pendiente del gráfico de los resultados de campo. Volviendo a la utilización del factor de corrección 0,50, al aplicarse éste a los valores obtenidos en el cálculo del coeficiente de balasto por cada uno de los cuatro métodos presentados en el Cuadro 26, se obtiene el coeficiente de balasto corregido correspondiente a cada método de cálculo.

En el cuadro antes mencionado, además de los valores corregidos de  $K_{S12,5}$ , muestra la variación que el coeficiente de balasto, ya

corregido por  $\phi_K$ , presenta con respecto al resultado *In Situ*. Las variaciones para la corrección realizada al coeficiente de balasto determinado en el ensayo de laboratorio, van de 3,23 % a 18,78 % para el primer método, para el segundo método de 1,11 % a 10,32 % y para el tercer método de 2,49 % a 20,77. El cuarto método, como ya se ha mencionado, se descartó en el análisis de este sitio. Aunque las desviaciones máximas presentes tanto para el primer método como para el tercero son considerablemente altas (18,78 % y 20,77 % respectivamente), estas desviaciones pertenecen a los resultados del primer ensayo de laboratorio, que también presentó la desviación más elevada para el segundo método. Lo anterior fue posiblemente producto de una sobre compactación del material, o debido a la falta de experiencia a la hora de realizar este ensayo, puesto que fue el primero en ejecutarse. Esto se aclara por el motivo de que al revisar los resultados de los ensayos 02 y 03, no se mostraron errores mayores al 10 %.

Por su parte, el ajuste de los datos obtenidos en el laboratorio, aplicando el factor  $\phi_K$  a las deformaciones de cada gráfico, se muestra en el Cuadro 27, donde se puede observar que la desviación con la deformación de campo para los mismos esfuerzos está entre 8 % y 23% para el primer y segundo ensayo de laboratorio, mientras que para el tercer ensayo éste reduce el rango de variación entre 2 % y 7%.

Para finalizar, el Cuadro 28 muestra el valor de  $K_{S12,5}$  obtenido de cada una de las formas de corregir los resultados, donde se puede apreciar la corrección del coeficiente de balasto obtenido de las curvas resultantes de los ensayos de laboratorio. El valor de  $K_{S12,5}$  corregido es de 41,37 kg/cm<sup>3</sup>, el cual se establece como el valor del coeficiente de balasto  $K_{S12,5}$  determinado a partir del ensayo de laboratorio. Esto por motivo de que el valor determinado mediante la corrección de los asentamientos es más elevado y presenta una mayor desviación estándar, aún cuando este último presenta una menor variación en comparación con el valor de campo, como se evidencia en el Cuadro 28.

## Ensayo de carga en laboratorio, para el material de Sitio 02

Habiendo efectuado los ensayos y realizado el cálculo del factor de relación entre el ensayo de carga *In Situ* y el ensayo de carga vertical en el laboratorio para el Sitio 01, para establecer este factor en el material del Sitio 02, simplemente se siguió la misma metodología antes expuesta.

La diferencia con el Sitio 01 estuvo, como ya se mencionó, en que el ensayo de carga vertical en el laboratorio se realizó con un contenido de humedad de 43,77 %, por lo que el resultado obtenido de los ensayos de carga en el laboratorio debió ser corregido para estimar el valor del coeficiente de balasto de laboratorio a la humedad de campo, que dicho sea de paso es de 57 %.

Además, como en el campo solo fue realizado el ensayo de carga horizontal, a partir de éste se tuvo que determinar el valor de  $K_{S30}$  mediante la ecuación 4; la comparación de la tendencia de las curvas se mostró en la Figura 50, donde como ya se mencionó, la curva que corresponde al hipotético ensayo vertical, no fue obtenida de un ensayo si no de una estimación realizada a partir del ensayo de carga horizontal.

Antes de entrar al análisis de los resultados de los ensayos de carga vertical en laboratorio, es preciso mencionar los resultados de la consolidación de las muestras utilizadas para determinar el factor de corrección por humedad, empleado para relacionar los ensayos de carga en el laboratorio a humedad de 43,77 %, con el ensayo *In Situ* a humedad de 57 %. Estos se presentan en la Figura 48 y en la Figura 49, de donde se extrae que el asentamiento final de la muestra con humedad de 57 % es de 1,0465 mm, mientras que para la muestra que poseía un contenido de humedad similar al de los ensayos de carga en el laboratorio, el asentamiento final es de 0,8763. Con los datos anteriores se determinó que el factor de corrección por humedad que se establece en la ecuación 17 equivale a 0,84, factor que se muestra en el Cuadro 31. En dicho cuadro también se encuentra el factor de ajuste para la estimación del coeficiente de balasto a partir de los ensayos de laboratorio,  $\phi_K$ , al cual se llegó de la misma forma que en los ensayos del Sitio 01, donde se determinó un factor  $\phi_K$  para cada incremento de carga, como se muestra en el Cuadro 31. Al final

se calculó el promedio de todos los factores de ajuste obtenidos, que se fijó como el factor de ajuste global o utilizado para determinar la relación entre los resultados de laboratorio y de campo, que tuvo un valor de 0,54. Al comparar este valor con el obtenido para el material del Sitio 01, se puede evidenciar una escasa diferencia, lo cual permite creer que el método empleado para realizar una estimación del coeficiente de balasto mediante un ensayo de laboratorio, ofrece resultados que parecieran ser precisos. Sin embargo, dar una conclusión donde se pueda defender el método hasta ahora expuesto es apresurado, debido al hecho de que dos materiales es poco para establecer el procedimiento como totalmente válido.

## Verificación de las características que el material presentó en la ejecución de los ensayos de carga realizados en el laboratorio

Al observar los Cuadros 36 al 41, en los cuales se presentan los resultados de la verificación realizada al material extraído de cada ensayo de carga vertical en el laboratorio, se puede observar que, en cuanto a la densidad que el material del Sitio 01 alcanzó al ser colocado dentro del molde, ésta no varió en más de 5,83%, desviación que correspondió a la densidad del segundo ensayo. Por el contrario, este mismo ensayo fue el que presentó la menor desviación en cuanto al contenido de humedad, el cual fue de solo de 2,46 %. Como es posible notar en la información que presentan el Cuadro 36 y el Cuadro 37, la variación en las características que el suelo remoldeado presentó para los ensayos de carga realizados, puede ser despreciable y se puede considerar aceptable determinar el factor de ajuste que se propuso para estimar el coeficiente de balasto en campo ( $\phi_k$ ), mediante el promedio del resultado obtenido en cada una de las repeticiones realizadas, puesto que se considera que los ensayos realizados presentaron las mismas características.

En lo que respecta al Sitio 02, los resultados obtenidos presentan una mayor desviación, aunque para la densidad alcanzada ésta no llegó al 10%; en el caso de la humedad en el segundo ensayo, la muestra tenía un contenido de 14,23

%. Cabe aclarar que del segundo ensayo de carga vertical en el laboratorio al material del Sitio 02, solo se extrajo una muestra y datos presentados en los Cuadros 38 y 39 corresponden a esta muestra. Aún así, para este material se utiliza el promedio de los resultados obtenidos de ambos ensayos realizados para determinar la relación entre lo que del laboratorio se obtiene con el valor real de coeficiente de balasto que se determinó en el campo.

Por último, aprovechando las muestras extraídas con tubos *liner*, de donde se midieron los parámetros analizados en el párrafo anterior, se realizaron pruebas de compresión confinada para verificar el comportamiento mostrado por las muestras inalteradas recuperadas en el campo y si éstas cumplían con lo estipulado en la ecuación 7. La realidad es que de nuevo existe una amplia diferencia entre el resultado que la ecuación brinda y el módulo de reacción que el material presenta en el ensayo de carga, lo cual argumenta que el uso de esta ecuación no se considera adecuado.

## Guía de investigación para establecer un procedimiento de laboratorio

Ya analizado lo obtenido en los ensayos tanto de campo como de laboratorio y, realizadas las comparaciones entre ambos resultados para establecer un factor de relación (0,50 para el estudio realizado en el Sitio 01 y 0,54 para lo respectivo al Sitio 02), se puede afirmar que el método empleado muestra concordancias que parecieran repetibles aún en materiales distintos (recordando que el Sitio 01 presentaba una Arcilla Densa - CH y el Sitio 02 un Limo Elástico - MH). Por tal motivo continuar con una investigación más amplia que busque establecer una correlación entre el coeficiente de balasto  $K_{30}$  y el  $K_{12,5}$  determinado en el laboratorio, pareciera ser una idea válida. Por tal motivo se establecen los siguientes puntos a tomar en cuenta donde se citan las tareas a seguir y recomendaciones para ello:

- Para realizar esta investigación lo ideal es utilizar sitios donde se pretenda establecer cimentaciones superficiales y así aprovechar los datos obtenidos en los ensayos de carga,

no solo en el diseño de la misma, si no en la investigación.

- Ya en el sitio: excavar una trinchera al nivel de desplante del cimiento que se pretende construir y que al menos tenga 1,20 m de ancho; esto para cumplir con lo que en la norma ASTM D-1194 solicita sobre el ancho mínimo que debe tener la trinchera. Además se debe conformar la trinchera con largo de 5,00 m mínimo, para de esta forma poder tener el espacio suficiente donde se pueda realizar al menos tres ensayos y así optimizar tiempo y recursos. Ver Apéndice 2
- En cuanto a la realización del ensayo *In Situ*, es importante que el equipo utilizado para ejercer la presión en el terreno (bomba, manguera, gato hidráulico y manómetro) sea el mismo que se empleará en los ensayos de laboratorio y que además se mantenga en constante calibración. Si no es posible utilizar el mismo equipo en el campo y en el laboratorio, se debe buscar emplear equipos que sean capaces de registrar los mismos esfuerzos aplicados, siempre considerando que para lograr aplicar en el laboratorio el mismo esfuerzo que se ejerció en el campo se debe usar una presión de la bomba menor, debido a que la placa del laboratorio es más pequeña y esto hace que para una misma fuerza aplicada el esfuerzo sea mayor en el laboratorio (con placa de 12,5 cm) que en el campo (placa de 30 cm).
- Antes de comenzar a realizar el ensayo se debe aplicar una precarga de  $0,50 \text{ kg/cm}^2$ ; esta ayudará a que el equipo del ensayo de carga se sujete y que en la superficie sobre la que se efectuará el ensayo de carga se eliminen las irregularidades que harían que la placa experimente asentamientos diferenciales entre distintos puntos de ella.
- Como recomendación se propone la siguiente secuencia de cargas, con las cuales puede asegurarse la obtención la cantidad necesaria de pares ordenados, para describir el diagrama de Esfuerzo – Deformación:  $0,50 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1,00 \text{ kg/cm}^2$ ,  $2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $4 \text{ kg/cm}^2$ ,  $5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $7,50 \text{ kg/cm}^2$ ,  $9 \text{ kg/cm}^2$ ,  $10 \text{ kg/cm}^2$ ,  $12 \text{ kg/cm}^2$ ,  $14 \text{ kg/cm}^2$ ,  $16 \text{ kg/cm}^2$ ,  $18 \text{ kg/cm}^2$ ,  $20 \text{ kg/cm}^2$ . Estas cargas deben incrementarse y pasar a la siguiente en el momento que los deformímetros se estabilicen, es decir, cuando no haya un incremento considerable en la lectura de las

deformaciones. Como se puede percibir, los primeros siete incrementos son muy bajos; esto debido a que, si se encuentra un suelo no muy competente, aplicar cargas bajas hace más probable la obtención de la cantidad de puntos necesarios para conformar el gráfico de Esfuerzo – Deformación.

- Cuando se ha finalizado el ensayo de carga, se deben extraer muestras inalteradas del suelo en análisis, como mínimo cinco. Estas muestras se utilizarán principalmente para determinar parámetros, como la densidad natural del material ( $\gamma_{\text{Nat}}$ ) y la humedad natural (%w), que serán utilizados en la reproducción del modelo de laboratorio.
- Para realizar los ensayos de laboratorio es preciso recuperar al menos  $0,5 \text{ m}^3$  de material en el campo. Lo anterior con el fin de garantizar tener el material necesario para realizar cuatro repeticiones del ensayo (el cual se hace en el molde del odómetro mostrado en el Anexo 2). La cantidad de material antes mencionado equivale a retirar el material del piso de la trinchera descrita en este apartado y mostrada en el Apéndice 2, a una profundidad de 7 cm.
- Para preparar el material con que se realizarán los ensayos de carga en laboratorio, se aconseja seguir el método descrito en el apartado de “*Metodología*” de este proyecto.
- Para aplicar las cargas al material remoldeado y confinado dentro del molde que se utilice, se deben aplicar las mismas cargas que se indicaron antes para el ensayo de carga *In Situ*. Con esto se garantiza que la comparación en la determinación del valor del coeficiente de balasto no tendrá más variables que la diferencia entre los asentamientos experimentados.
- Por último, el análisis de los resultados obtenidos se puede realizar de dos formas: 1) Siguiendo la metodología mostrada en este trabajo y así verificar los resultados de esta investigación; o 2) Determinando tan solo el valor del coeficiente de balasto  $K_{30}$  (*In Situ*) y  $K_{12,5}$  (en laboratorio), empleando solamente uno de los cuatro métodos presentados en este trabajo (se aconseja el segundo método, por ser el que proporciona un dato más conservador) y haciendo una comparación directa entre los dos resultados, con la cual, después de haber realizado la investigación

para varios sitios se podría proponer una correlación lineal entre ambos resultados.

## Ensayos adicionales

### Presiómetro Ménard

El primer ensayo que se realizó para obtener el coeficiente de balasto en suelos en forma indirecta fue utilizando el presiómetro Ménard. Como ya se ha referenciado, la ecuación 5 otorga una estimación del valor del coeficiente de balasto a partir del módulo de deformación del material, mismo que se puede determinar con el uso de la ecuación 13, donde se necesita conocer de antemano el módulo presiométrico del material.

En el Cuadro 42 se muestra que el coeficiente de balasto obtenido en el Sitio 01, el cual equivale a  $17,06 \text{ kg/cm}^3$  y que se obtuvo mediante la estimación previa del módulo de deformación del material, comparándolo con el obtenido del ensayo de carga, que corresponde a  $18,13 \text{ kg/cm}^3$ , se establece una diferencia de  $5,90 \%$ , lo que se considera bajo y por tanto aceptable como forma indirecta de determinar el coeficiente de balasto. Cabe mencionar que la estimación se hizo para la placa de  $30 \text{ cm}$  ( $B = 30 \text{ cm}$  en la ecuación), por lo cual se recomienda realizar esta evaluación comparando el resultado con ensayos de carga que empleen placas de otros diámetros.

Por otra parte, el resultado obtenido en el Sitio 02 no se consideró en este análisis puesto que el resultado estimado con la ecuación 13 difiere en  $72 \%$ . La razón en que se fundamenta no considerar este resultado no está en la amplia diferencia mostrada, sino en el prolongado lapso de tiempo que transcurrió entre la realización del ensayo de carga y el ensayo presiométrico. Exactamente transcurrió un mes desde que se abrió el nicho en la pared del talud utilizado en el Sitio 02, esto sin ninguna duda afectó la posible relación que podía existir entre el coeficiente de balasto y el módulo de deformación, por las siguientes razones:

- Descompresión del material presente en el talud.
- Cambio de humedad, debido a que el día en que se realizó el ensayo de placa el suelo

presentaba saturación debido a las lluvias que se presentaron durante varios días. Durante el mes y, al permanecer abierto el nicho, es esperable que se presentaran cambios en la humedad del material, por lo cual el resultado se ve afectado.

### Compresión Inconfinada

Como ya se ha expuesto en este trabajo, el ensayo de compresión inconfinada se relaciona teóricamente mediante a la ecuación 7 con el coeficiente de balasto.

Como es notorio en el Cuadro 44 y el Cuadro 45, la relación que propone la ecuación 7 no se cumple y, por el contrario, ofrece valores muy conservadores del coeficiente de balasto, que presentan desviaciones de entre  $70 \%$  y  $88 \%$  con respecto al dato obtenido del ensayo de carga. Si bien los resultados obtenidos no son concluyentes de que la ecuación 7 sea un buen método de estimación del coeficiente de balasto  $K_{S30}$ , no por eso se descarta; por el contrario, se aconseja hacer una investigación más profunda sobre esta relación, debido al hecho de que el valor  $K_{S30}$  fue estimado indirectamente y lo ideal es mediante un ensayo de carga utilizando una placa de ese diámetro. Además, de los resultados obtenidos no es posible proponer un factor para calcular el coeficiente de balasto, esto porque el valor  $1,645$  que presenta la ecuación como factor de relación entre el coeficiente de balasto  $K_{S30}$  y la resistencia a la compresión inconfinada, puede tomarse como la razón entre  $K_{S30}$  y  $q_u$ , la cual, si se calcula para los resultados del Sitio 01 y del Sitio 02, equivaldrían a  $5,33$  y  $8,45$  respectivamente. Lo cual evidencia que no se presenta ninguna similitud. Lo que lleva a concluir que, debido a la poca cantidad de datos obtenidos en esta investigación, no es posible proponer un factor que correlacione la resistencia a la compresión inconfinada ( $q_u$ ) y el coeficiente de balasto  $K_{S30}$ .

### CBR

En lo pertinente a la relación entre el CBR y coeficiente de balasto, antes de realizar este ensayo, como ya fue mencionado, se debió determinar el contenido de humedad óptima, el

cual, como ya se había aclarado, se obtuvo del ensayo Próctor Estándar.

La comparación entre el CBR y el coeficiente de balasto se hizo utilizando un valor para placa de 76 cm ( $K_{S76}$ ), que se obtuvo utilizando el resultado del ensayo *In Situ* vertical con placa de 12,5 cm para el Sitio 01 y del horizontal con placa de 30 cm para el Sitio 02 e incorporando ambos datos en la ecuación 4.

Para el Sitio 01 el mencionado contenido de humedad se estableció en 22,80 %, como puede ser observado en la Figura 54. Al observar que el contenido de humedad mencionado es solo un poco mayor al que se presentó en campo (que se determinó en 21,00 %), se decidió que realizar la fase de saturación al material no sería necesario y, por el contrario, el resultado no hubiese sido de ayuda para determinar una relación entre el valor del coeficiente de balasto y el ensayo CBR, porque al saturar las muestras, éstas no tendrían comparación con la humedad en campo.

El resultado del ensayo CBR refleja que haber dejado de lado la fase de inmersión de las muestras fue una decisión acertada, esto se demuestra en la Figura 57, donde es posible ver la muestra compactada con 56 golpes, que presentó un porcentaje de compactación de 99 %, que se hubiese disminuido si se hubiese llevado a cabo el proceso de inmersión de las muestras. En cuanto al porcentaje de compactación en campo, este se fijó en 103,52 %, razón por la cual se debió extrapolar el gráfico para obtener el valor CBR que representa el Sitio 01, que como se muestra en el Cuadro 46 es de 40,06. Al analizar los resultados del Cuadro 46, es posible ver que no se presentó alguna concordancia entre el valor CBR y el coeficiente de balasto. La posible razón de este resultado está en que la estimación de  $K_{S76}$ , debió realizarse con base en el resultado del ensayo efectuado con una placa de 12,5 cm, lo cual posiblemente pueda haber provocado distorsión en el resultado obtenido, debido a la considerable diferencia entre placas utilizadas. Además, cabe aclarar que el mencionado cuadro muestra el resultado de tres métodos presentados en la literatura para realizar la estimación del coeficiente de balasto, donde se demuestra que el método que utiliza el nomograma y el que utiliza la curva logarítmica muestran similitud entre ellos (la desviación entre el resultado de  $K_{S76}$  estimado a partir del ensayo de carga realizado y la ecuación 4, con los

valores obtenidos de  $K_{S76}$  andan entre 48,80 % y 51,50 %); mientras que el método propuesto por la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) no es concordante con los otros dos y, por el contrario, el coeficiente de balasto obtenido de esta forma se muestra más concordante con lo resultó del ensayo de carga efectuado en este proyecto.

Por otro lado, el material del Sitio 02 sí fue necesario sumergirlo para realizar el ensayo CBR, pues para este caso las muestras empleadas fueron conformadas utilizando un contenido de humedad del 43,77 %, mientras que el contenido de humedad del material en el campo era de 57 % aproximadamente, como ya se ha venido mencionando. Para este segundo sitio, al evaluar el porcentaje de compactación que el material presenta en el campo, se determina que este es de 88 %. Este valor está comprendido en el gráfico de la Figura 59, por lo cual no fue necesario realizar una extrapolación del gráfico, como en el caso del cálculo de CBR del Sitio 01. El valor de CBR obtenido para este sitio, como se muestra en el Cuadro 47, es de 6,54. Al analizar las comparaciones hechas con los mismos métodos expuestos en la teoría que se utilizaron para hacer el análisis de los resultados del Sitio 01, se pueden observar que salvo para el método de determinación del coeficiente de balasto utilizando la curva logarítmica, la desviación de los resultados con respecto a lo obtenido del ensayo de carga *In Situ*, no presentan similitud con las desviaciones presentes en el Sitio 01.

Por último, en cuanto a la comparación entre CBR y coeficiente de balasto realizada en este trabajo, es evidente que de ninguna forma es concluyente, por el hecho de que los resultados no se ajustan a ninguna de las propuestas teóricas expuestas en este informe y que solamente el análisis de dos muestras no es suficiente para sentar un criterio.

## Determinación del coeficiente de balasto a partir del Cuadro 1

Como es posible ver en el Cuadro 48, si a partir de los valores de resistencia a la compresión confinada ( $q_u$ ) que el Cuadro 1 presenta, se calculan los rangos con el uso de la ecuación 7,

estos difieren de los presentados en el Cuadro 1. En realidad solo hacen la estimación un poco más conservadora, puesto que los límites del rango en que varía el coeficiente de balasto se disminuyen.

Por otro lado, la comparación que se hace en el Cuadro 1 de este proyecto entre la resistencia a la compresión inconfiada y el coeficiente de balasto para suelos finos, indica que para el Sitio 01 el valor de  $K_{S30}$  debería de estar entre  $4,00 \text{ kg/cm}^3$  y  $8,00 \text{ kg/cm}^3$ , lo cual, como ya se ha expuesto antes, no es verdadero, puesto que el coeficiente de balasto ( $K_{S30}$ ) para este sitio se fijó en  $18,24 \text{ kg/cm}^3$ .

En cuanto a la estimación realizada con el mismo Cuadro 1 para el material del Sitio 02, el coeficiente  $K_{S30}$  debería estar comprendido en el rango de  $0,65 \text{ kg/cm}^3$  y  $1,30 \text{ kg/cm}^3$ ; pero igual que en el Sitio 01 esto no se cumple, ya que en este caso el valor  $K_{S30}$  se fijó en  $6,60 \text{ kg/cm}^3$ .

## Determinación de $K_S$ con la ecuación 6

Como fue presentado en los resultados, en la ecuación 6 el factor 40 que se establece no indica para qué tamaño de placa fue calculado, como ha sido lo habitual en la presentación del valor estimado del coeficiente de balasto.

Por tal razón, se buscó establecer un factor que sí permita relacionar el valor de  $K_{S30}$  y la carga última del material, el cual, como se muestra en el Cuadro 50 para ambos sitios, equivale aproximadamente a 1,40 (en  $\text{Kg/cm}^3$ ). Por este motivo, buscar una relación entre la carga última del material y el coeficiente de balasto pareciera ser de interés. La utilidad de lograr una relación entre el valor  $K_{S30}$  y el de carga última no está en realizar la estimación a partir de la carga última obtenida del ensayo de carga (puesto que si se realiza este ensayo el valor de  $K_{30}$  lógicamente podría estimarse de los resultados que se desprenden del ensayo de carga); sino de formas de estimar indirectamente el valor de carga última, como podría ser alguna correlación con el resultado del ensayo con el presiómetro Ménard, del ensayo SPT u otros que aporten este dato y no sean tan complicados de realizar como el ensayo de carga.

# Conclusiones

En este apartado del trabajo se muestran las conclusiones obtenidas.

## Sitio 01: Higuito de Desamparados

- El Sitio 01 mostró un comportamiento contrario al que la teoría indica debería tener, considerando que el material encontrado, según la clasificación SUCS, es Arcilla Densa (CH), que debería presentar un coeficiente de balasto considerablemente más bajo al que en el ensayo de carga se obtuvo. Lo anterior posiblemente se deba a la elevada compactación que este material presentó.
- La elevada capacidad de soporte de este material, posiblemente se vería reducida si el suelo hubiese presentado saturación. Esto debido a su característica de hinchamiento, determinada a partir del ensayo de expansión libre.
- La determinación del valor del coeficiente de balasto utilizando cada uno de los cuatro métodos presentados en este trabajo, brindan resultados similares que muestran poca variación entre sí, lo cual hace para este sitio válida cualquier forma de estimarlo.
- Para este material, aún cuando el resultado del cuarto método no se desvía del resultado propuesto por los otros tres, este valor no se puede aceptar como el valor del coeficiente de balasto, debido a que este método de estimación es válido si  $K_{S30}$  es menor a  $14,50 \text{ kg/cm}^3$ , requisito que no se cumplió.
- Con la comparación realizada entre los resultados obtenidos en el ensayo de carga vertical con la placa de 12,5 cm y el ensayo horizontal utilizando la placa de 30 cm, se podría considerar que las estimaciones que

se hacen mediante la ecuación 4 y la ecuación 8 del coeficiente de balasto vertical, son válidas. El inconveniente que afecta esta aseveración es la falta de datos de otros sitios que permitieran dar por un hecho que las ecuaciones son válidas.

- Para determinar el coeficiente de balasto a partir del ensayo de carga vertical en el laboratorio, se propone utilizar un factor de ajuste. Esto debido a que el coeficiente determinado en el laboratorio se muestra mayor al obtenido directamente en el campo.
- El factor de ajuste  $\phi_K$ , propuesto para el Sitio 01, es de 0,50. Esto debido a que al equiparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los de campo, se observó que la deformación que una determinada carga provoca en el espécimen remoldeado en el laboratorio, es aproximadamente la mitad de las registradas en el campo para la misma carga.
- La determinación del coeficiente de balasto a partir de la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{E}{B(1-\mu^2)};$$

(donde  $E$  se determinó indirectamente de un ensayo presiométrico), otorgó un valor cercano al obtenido en el ensayo de carga. Por este motivo, se sugiere continuar con la investigación de esta relación para determinar si en realidad es válida.

- Para este sitio la estimación del coeficiente de balasto mediante al ecuación 7, que lo relaciona con la resistencia a la compresión confinada, arrojó un dato considerablemente más conservador al obtenido del ensayo de carga, por lo cual se aconseja continuar verificando si para otros



suelos esta relación se cumple o, si por el contrario la relación es otra.

- La estimación que la ecuación 6 propone, la cual indica que el coeficiente de balasto es 40 veces la carga última del material ( $\text{kN/m}^3$ ), no se evidenció con los datos obtenidos en este proyecto. Como alternativa se ofrece el factor que se determinó con los datos recopilados de este proyecto, que fue de aproximadamente 1,40 ( $\text{kg/cm}^3$ ), valor que como fue indicado en el apartado de Análisis de Resultados, es solamente propuesto y para establecerse requerirá de una investigación más profunda.
- Al determinar en el material de este sitio el coeficiente de balasto a partir del CBR, como se indica en la teoría, se obtiene un dato mayor al encontrado con el ensayo de carga. Esto evidencia la necesidad de continuar investigando la relación entre CBR y coeficiente de balasto, debido a la posibilidad de una sobreestimación del coeficiente por parte de la teoría.
- Por otra parte, una posible razón por la cual se presentó la diferencia mencionada en el punto anterior, está en que la comparación entre el ensayo CBR y el coeficiente de balasto que la teoría hace, considera un coeficiente determinado con una placa de 76 cm, mientras que la utilizada en el ensayo de carga en este proyecto fue de 12,5 cm de diámetro

## Sitio 02: Puesto 07, P. H. Reventazón

- El material presente en el Sitio 02 – Puesto 07, P. H. Reventazón, según la clasificación SUCS, es un Limo Elástico (MH), que presentó una capacidad de soporte baja, tal como es de esperarse para un material de este tipo.
- La baja capacidad de soporte que el material de este sitio presentó está ligada indudablemente también al alto contenido de humedad que el material poseía el día en que se realizó el ensayo de carga.

- La determinación del valor del coeficiente de balasto utilizando cada uno de los cuatro métodos presentados en este trabajo, brindan resultados similares que muestran poca variación entre sí. Y al igual que en el Sitio 01, determinar el coeficiente por cualquiera de los cuatro criterios es válido.
- Para este material, el cuarto método de estimación del coeficiente de balasto sí se considera en el análisis debido a que el  $K_{S30}$  obtenido es menor a  $14,50 \text{ kg/cm}^3$ .
- Para estimar el valor de  $K_{30}$  para este sitio se consideró que la ecuación 8 es adecuada partiendo de un coeficiente de balasto horizontal ( $K_{h30}$ ), basado en la similitud de los resultados de la comparación hecha entre el ensayo vertical y el horizontal para el primer sitio.
- El factor de corrección de los datos de laboratorio para hacer la comparación con lo obtenido en campo se estableció en 0,54.
- Aplicar el factor de corrección de 0,54 al valor de coeficiente de balasto obtenido de los ensayos de laboratorio, ofrece un dato más conservador que hacer la corrección a los asentamientos y luego determinar de la curva corregida el coeficiente.
- Para este material utilizar la ecuación 5 en la estimación del coeficiente de balasto no se considera válido, porque la determinación del módulo presiométrico del cual parte esta comparación se realizó aproximadamente un mes después de la realización del ensayo de carga. Lo cual sin ninguna duda afectó el resultado obtenido.
- Al igual que el caso del Sitio 01, el resultado de la ecuación 7 no ofrece un dato similar al coeficiente de balasto obtenido en el ensayo de carga, por lo que esta ecuación no es concluyente para el análisis de este sitio.
- La estimación realizada con la ecuación 6 en este proyecto no se cumple. Por esta razón se ofrece un factor propio de este sitio que relaciona la carga última del material con el valor  $K_{S30}$ , el cual se fija en 1,40 para

obtener el dato en  $\text{kg/cm}^3$ . El motivo por el cual se decidió presentar este factor es el mismo que se indicó en la conclusión que hace alusión a esta ecuación para el Sitio 01.

- Determinar el coeficiente de balasto partiendo del CBR que el material presenta, al igual que en el Sitio 01, no ofreció ningún resultado comparable con la teoría; posiblemente por las mismas razones que se indicaron en el Sitio 01.

## Conclusiones Generales

- La comparación entre el tipo de material y el coeficiente de balasto parece no ser adecuada en todas las situaciones. Por ejemplo, en el Sitio 01 el material se clasificó según el SUCS como *CH*, el cual debería presentar un coeficiente de balasto relativamente bajo; pero la realidad es que, debido al alto grado de compactación encontrado en el sitio, este coeficiente se mostró mayor a lo que la teoría podría sugerir.
- Para realizar la comparación entre el coeficiente de balasto obtenido *In Situ* y el obtenido de Laboratorio, lo ideal es utilizar equipos que permitan aplicar incrementos de carga similares en campo y laboratorio y con esto garantizar que la única diferencia que presentarán los gráficos será en los asentamientos registrados.
- Para establecer el coeficiente de balasto a partir del gráfico Esfuerzo – Deformación, es recomendable utilizar el método que determina el coeficiente a partir de la recta de mejor ajuste de la fase pseudo-elástica del material. Puesto que, según los resultados observados en todos los ensayos de carga realizados en este trabajo, este método fue el que ofreció un valor más conservador del parámetro en cuestión.
- Por tratarse de una investigación del comportamiento del material y no solamente para la obtención de un dato, como sería en el caso de estimar la capacidad de soporte,

se recomienda realizar los ensayos de carga de forma lenta y con incrementos de esfuerzo pequeños al inicio para garantizar la obtención de la cantidad de datos necesaria para crear el gráfico y además garantizar datos precisos en su inicio.

- El ensayo de carga vertical en laboratorio es recomendable para suelos que en campo se presenten homogéneos, compactados y no saturados; esto por motivo de que la compactación dentro del molde utilizado en el ensayo de laboratorio para un material que no presente estas características, se hace difícil de realizar y provoca que se deba recurrir a alternativas como la utilizada en el Sitio 02.
- Según los resultados obtenidos en esta investigación, el coeficiente de balasto  $K_{S12,5}$  que se determina del ensayo propuesto en laboratorio equivale aproximadamente al doble del obtenido en el campo. La razón probable de esto está en la aparente mejora que experimenta el material al ser remoldeado.
- Para poder realizar una comparación directa entre resultados experimentales y datos teóricos, de la relación CBR y coeficiente de balasto, se sugiere realizar ensayos de carga utilizando una placa de 76 cm de diámetro.
- Observando que el coeficiente de balasto, determinado mediante la ecuación 5 en el Sitio 01, proporciona un valor cercano al obtenido en el ensayo de carga y, por otro lado para el Sitio 02 esto no sucede, se piensa que el tiempo que transcurrió en el Sitio 02 entre la realización del ensayo de carga y el ensayo presiométrico, influyó en el resultado final, debido a la descompresión y cambio de humedad que el material sufrió.
- Observando la similitud en la razón obtenida entre el coeficiente de balasto y la capacidad de carga última estimada para el material de cada sitio (que equivale a  $1,40 \text{ kg/cm}^3$ ), parece ser que existe una importante relación que se recomienda verificar con más ensayos de carga y análisis teórico.

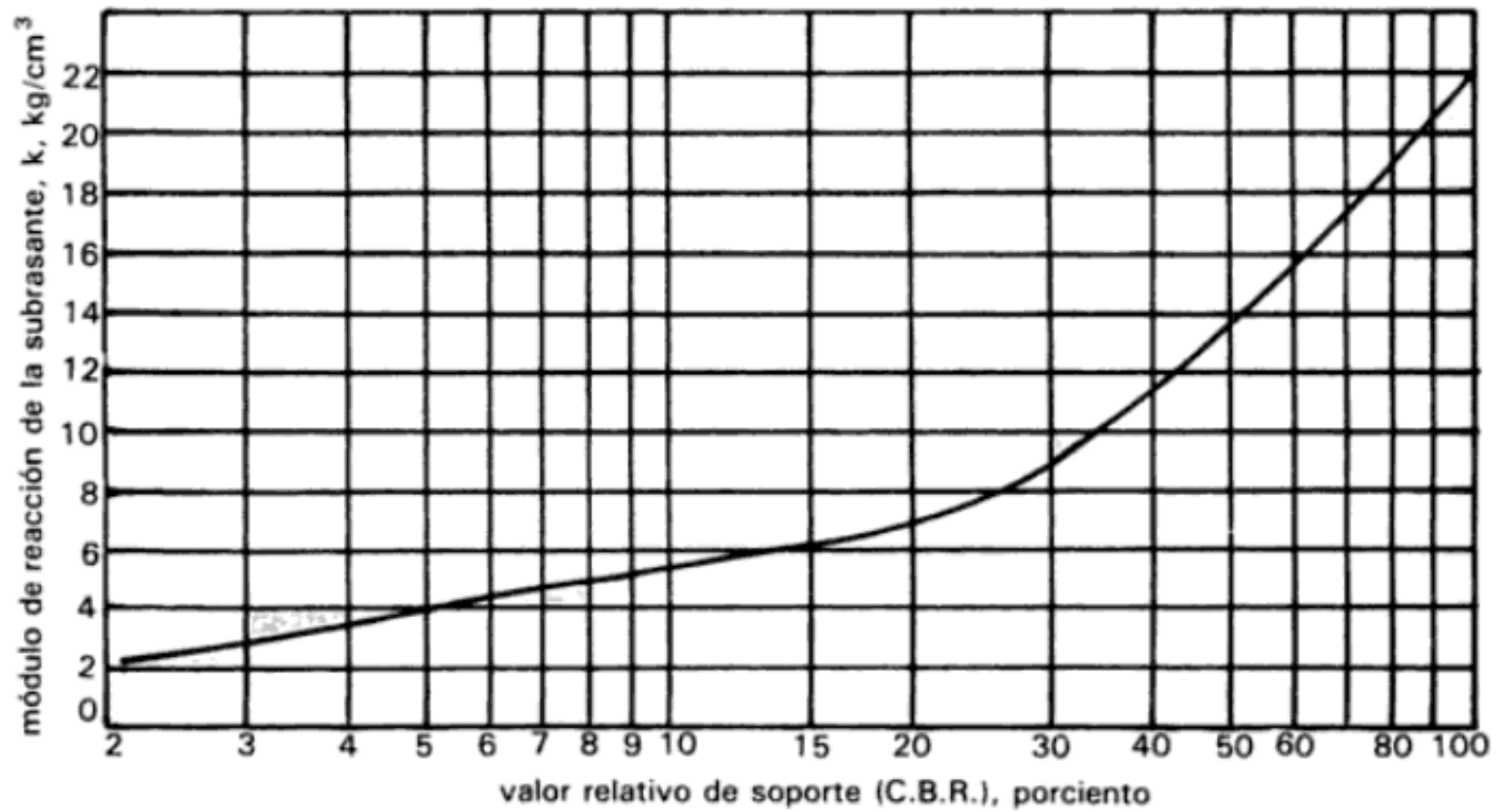
- Con esta investigación y sobre todo con los resultados del ensayo de carga vertical en el laboratorio, se puede presumir que estimar el coeficiente de balasto en el laboratorio es posible, por lo cual se aconseja continuar investigando la tendencia que el coeficiente de balasto determinado a partir de ensayos de laboratorio presenta, con respecto al coeficiente de balasto determinado en el campo en el ensayo de carga.
- Se hace conveniente encontrar formas de estimar el coeficiente de balasto a partir de ensayos de laboratorio sencillos y económicos, que permitan evaluar varios estratos de un mismo sitio a la vez, ya que estas son algunas limitantes del ensayo de carga, que además es complicado de ejecutar.

# **Anexos**

# **Anexo 1**

**Métodos teóricos para estimar el coeficiente de balasto  
a partir del CBR del tipo de material en análisis**



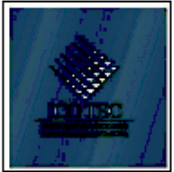
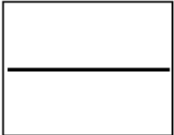
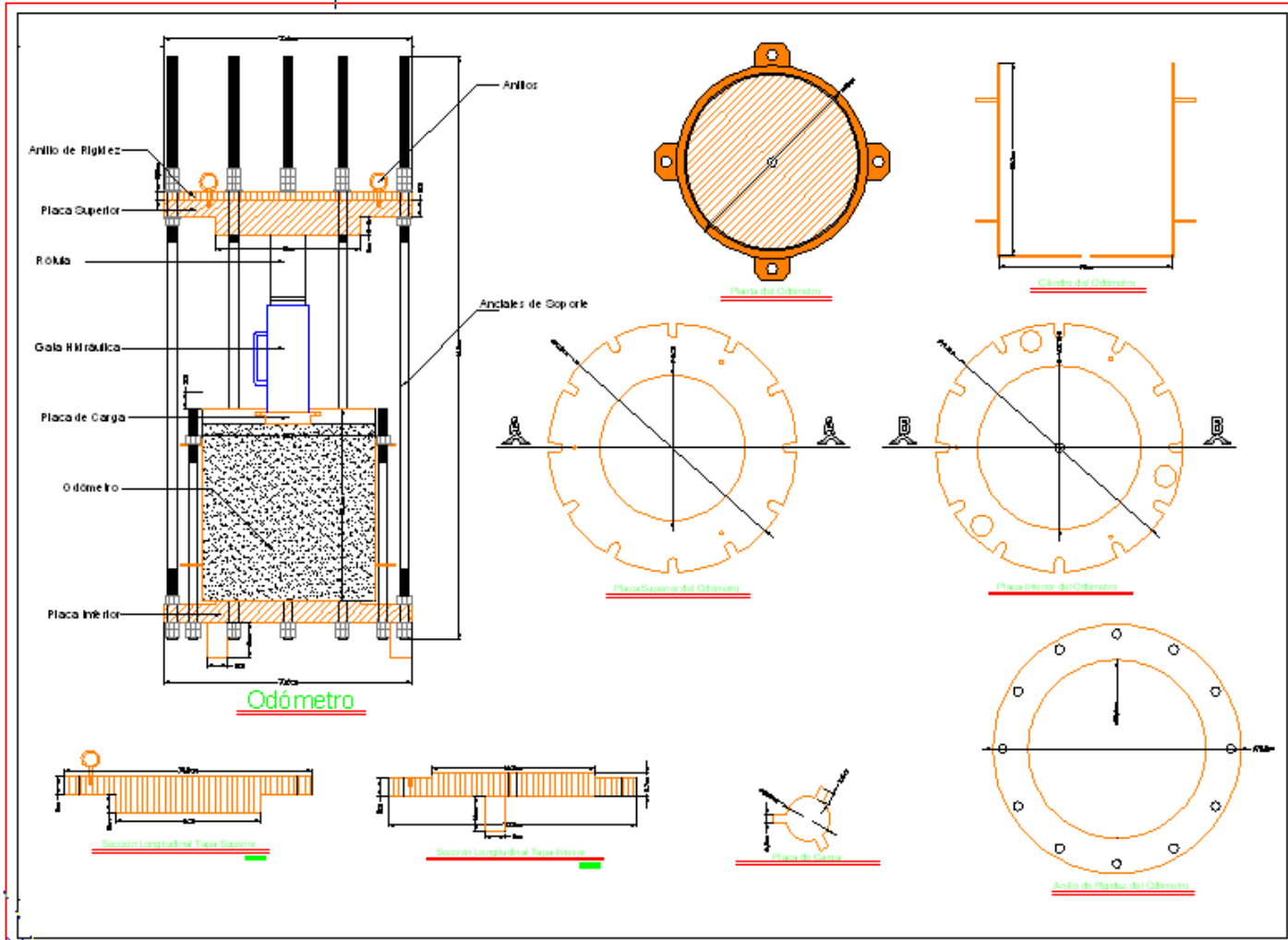


**Anexo 1.2.** Curva logarítmica de relación Coeficiente de Balasto ( $K_{76}$ ) y el CBR. Tomado de "*Mecánica de Suelos y Cimentaciones*"; Crespo Villalaz Carlos.



# **Anexo 2**

**Diagrama del equipo utilizado en el ensayo propuesto  
para determinar el coeficiente de balasto en el  
laboratorio (Ruíz, 2009)**




ESCALA	FECHA	LIBRO
1:1		1/1

# **Anexo 3**

**Resultados obtenidos a partir de la hoja cálculo elaborada en el ICE para interpretar los resultado del ensayo con el Presiómetro Menard**

UEN PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS  
CENTRO DE SERVICIO DISEÑO  
ÁREA INGENIERÍA GEOTÉCNICA  
**ENSAYO CON PRESIÓMETRO MENARD**

<b>PROYECTO:</b>	Higuito	<b>OPERADOR:</b>	Alonso
<b>FECHA:</b>	03/03/2010	<b>NIVEL FREÁTICO:</b>	No se detecta
<b>PERFORACIÓN:</b>	P-1	<b>TIPO DE SUELO:</b>	Arcilla de alta compresibilidad
<b>PROFUNDIDAD:</b>	2,55	<b>DIÁMETRO PROBETA (mm):</b>	70

Altura de monitor sobre superficie (m):	1,0	Calcular
Volumen inicial (cm <sup>3</sup> ):	0,0	Calcular "q"
Coeficiente de poisson:	0,33	
Presión de contacto:	0,30	Calcular "s"

E (kg/cm <sup>2</sup> )	p <sub>f</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	p <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	p <sub>L</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Cu (kg/cm <sup>2</sup> )	Φ	q <sub>adm</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	s(cm)
228,09	4,70	31,21	69,35	7,160	45,84	33,4244	0,844
211,86							

**Anexo 3.1.** Presentación de resultados de la hoja de cálculo que interpreta los resultados del ensayo con el Presiómetro Menard, para el material proveniente de Higuito de Desamparados. Tomado de *"Implantación y Calibración del Presiómetro Ménard para estimación de capacidad de soporte y deformabilidad de suelos en cimentaciones de proyectos ICE"*; Jiménez Priscilla.

**UEN PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**  
**CENTRO DE SERVICIO DISEÑO**  
**ÁREA INGENIERÍA GEOTÉCNICA**  
**ENSAYO CON PRESIÓMETRO MENARD**

<b>PROYECTO:</b>	Reventazón	<b>OPERADOR:</b>	Alonso
<b>FECHA:</b>	09/04/2010	<b>NIVEL FREÁTICO:</b>	No se detecta
<b>PERFORACIÓN:</b>	P-2	<b>TIPO DE SUELO:</b>	Limo de alta compresibilidad
<b>PROFUNDIDAD:</b>	2,15	<b>DIÁMETRO PROBETA (mm):</b>	70

Altura de monitor sobre superficie (m):	1,0	Calcular
Volumen inicial (cm <sup>3</sup> ):	0,0	Calcular "q"
Coeficiente de poisson:	0,33	Calcular "s"
Presión de contacto:	0,27	

<b>E (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>p<sub>f</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>p<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>p<sub>L</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cu (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Φ</b>	<b>q<sub>adm</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>s(cm)</b>
24,03	2,27	1,96	4,36	0,664	28,53	2,0431	8,013
17,36							

**Anexo 3.2.** Presentación de resultados de la hoja de cálculo que interpreta los resultados del ensayo con el Presiómetro Menard, para el material proveniente de Puesto 07, P. H. Reventazón. Tomado de *"Implantación y Calibración del Presiómetro Ménard para estimación de capacidad de soporte y deformabilidad de suelos en cimentaciones de proyectos ICE"*; Jiménez Priscilla.

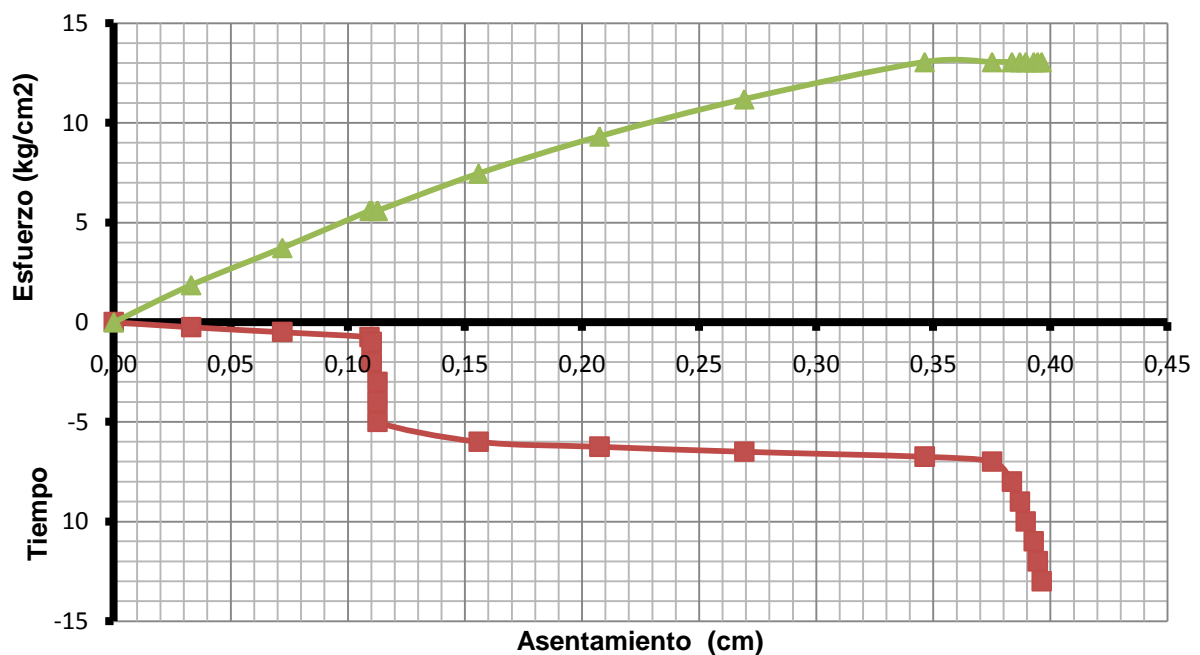
# Apéndices

# **Apéndice 1**

**Resultados obtenidos en los ensayos realizados en el proyecto.**

DATOS DE CAMPO: ENSAYO DE CARGA VERTICAL, HIGUITO DE DESAMPARADOS							
TIEMPO	PRESION	CARGA	DEF # 1	DEF# 2	DEF# 3	$\delta$	ESFUERZO
	PSI	kg	$1 \times 10^{-3}$ "			cm	Kg/cm <sup>2</sup>
00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
00:15	50,00	278,84	5,00	5,00	5,00	0,03	1,86
00:30	100,00	507,64	20,00	19,00	15,00	0,07	3,73
00:45	150,00	736,44	35,00	36,00	29,00	0,11	5,59
01:00	200,00	965,24	50,00	52,00	42,00	0,11	5,59
02:00	200,00	965,24	50,00	53,00	42,00	0,11	5,59
03:00	200,00	965,24	50,00	53,00	42,00	0,11	5,59
04:00	200,00	965,24	51,00	54,00	43,00	0,11	5,59
05:00	200,00	965,24	51,00	54,00	43,00	0,11	5,59
06:00	200,00	965,24	51,00	54,00	43,00	0,16	7,46
06:15	250,00	1194,04	68,00	72,00	59,00	0,21	9,32
06:30	300,00	1422,84	88,00	94,00	78,00	0,27	11,19
06:45	350,00	1651,64	110,00	120,00	103,00	0,35	13,05
07:00	400,00	1880,44	141,00	150,00	133,00	0,38	13,05
08:00	400,00	1880,44	153,00	162,00	143,00	0,38	13,05
09:00	400,00	1880,44	156,00	166,00	146,00	0,39	13,05
10:00	400,00	1880,44	157,00	167,00	148,00	0,39	13,05
11:00	400,00	1880,44	158,00	168,00	149,00	0,39	13,05
12:00	400,00	1880,44	160,00	169,00	150,00	0,39	13,05
13:00	400,00	1880,44	160,00	170,00	151,00	0,40	13,05

Apéndice 1.1. Datos obtenidos en el ensayo de carga vertical con placa de 12,5 cm, realizado en Higuito de Desamparados.

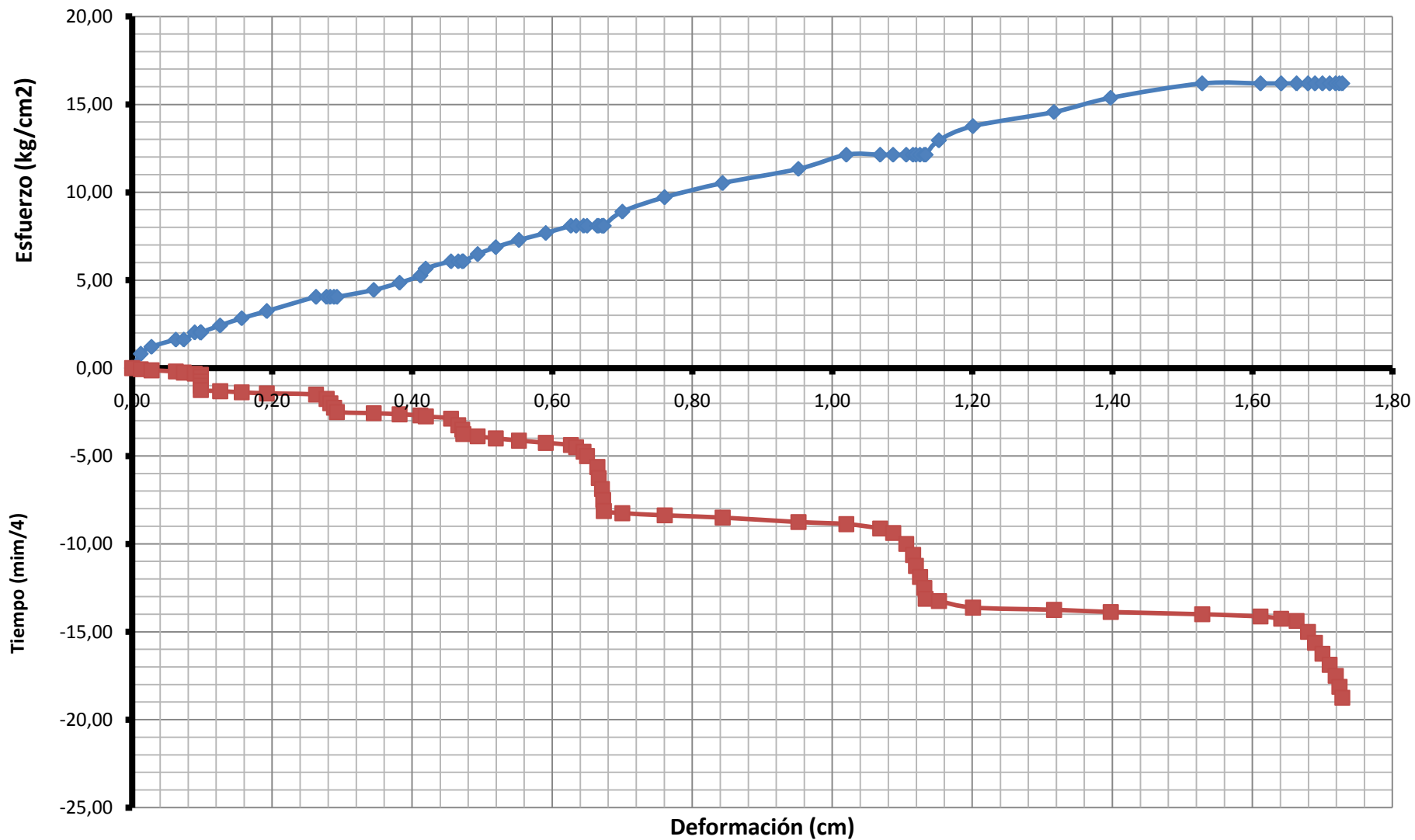


Apéndice 1.2. Gráfico de Esfuerzo – Asentamiento y Tiempo Asentamiento del ensayo de carga vertical, realizado en Higuito de Desamparados.



DATOS DE CAMPO: ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL, HIGUITO DE DESAMPARADOS							
TIEMPO	PRESION	CARGA	DEF # 1	DEF# 2	DEF# 3	δ	ESFUERZO
	PSI	kg	1x10 <sup>-3</sup> "			cm	Kg/cm <sup>2</sup>
00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
00:15	100,00	572,00	0,14	0,12	0,11	0,02	0,40
00:30	150,00	858,00	0,29	0,28	0,26	0,05	0,81
00:45	200,00	1144,00	0,60	0,57	0,70	0,06	0,81
01:00	200,00	1144,00	0,80	0,64	0,77	0,08	1,21
01:15	250,00	1430,00	0,85	0,81	1,02	0,09	1,21
01:30	250,00	1430,00	0,96	0,88	1,10	0,09	1,21
02:00	250,00	1430,00	0,96	0,88	1,10	0,09	1,21
03:00	250,00	1430,00	0,96	0,88	1,10	0,09	1,21
04:00	250,00	1430,00	0,96	0,88	1,10	0,09	1,21
05:00	250,00	1430,00	0,96	0,88	1,10	0,11	1,62
05:15	300,00	1716,00	1,22	1,25	1,30	0,14	2,02
05:30	350,00	2002,00	1,50	1,46	1,73	0,18	2,43
05:45	400,00	2288,00	1,88	1,78	2,11	0,25	3,24
06:00	500,00	2860,00	2,46	2,47	2,95	0,27	3,24
07:00	500,00	2860,00	2,70	2,60	3,03	0,27	3,24
08:00	500,00	2860,00	2,75	2,65	3,09	0,28	3,24
09:00	500,00	2860,00	2,80	2,70	3,15	0,28	3,24
10:00	500,00	2860,00	2,84	2,74	3,19	0,33	3,64
10:15	550,00	3146,00	3,03	3,02	4,30	0,37	4,05
10:30	600,00	3432,00	3,40	3,30	4,76	0,40	4,45
10:45	650,00	3718,00	3,67	3,56	5,12	0,41	4,86
11:00	700,00	4004,00	4,08	2,95	5,55	0,44	5,26
11:30	750,00	4290,00	4,41	3,30	5,95	0,45	5,26
13:00	750,00	4290,00	4,54	3,40	6,03	0,46	5,26
14:00	750,00	4290,00	4,60	3,45	6,09	0,46	5,26
15:00	750,00	4290,00	4,62	3,46	6,11	0,48	5,66
15:30	800,00	4576,00	4,82	3,65	6,33	0,51	6,07
16:00	850,00	4862,00	5,08	3,90	6,60	0,54	6,47
16:30	900,00	5148,00	5,42	4,20	6,95	0,58	6,88
17:00	950,00	5434,00	5,82	4,60	7,30	0,61	7,28
17:30	1000,00	5720,00	6,15	4,92	7,73	0,62	7,28
18:00	1000,00	5720,00	6,25	5,02	7,75	0,63	7,28
19:00	1000,00	5720,00	6,30	5,10	7,94	0,64	7,28
20:00	1000,00	5720,00	6,40	5,12	7,97	0,65	7,28
22:30	1000,00	5720,00	6,50	5,28	8,15	0,65	7,28
25:00	1000,00	5720,00	6,56	5,28	8,15	0,66	7,28
27:30	1000,00	5720,00	6,60	5,33	8,20	0,66	7,28
30:00	1000,00	5720,00	6,62	5,34	8,22	0,66	7,28
32:30	1000,00	5720,00	6,63	5,35	8,23	0,69	8,09
33:00	1100,00	6292,00	6,90	5,59	8,51	0,75	8,90
33:30	1200,00	6864,00	7,47	6,15	9,20	0,83	9,71
34:00	1300,00	7436,00	8,30	6,90	10,10	0,94	10,52
35:00	1400,00	8008,00	9,95	7,60	11,00	1,01	11,33
35:30	1500,00	8580,00	9,95	8,65	12,00	1,06	11,33
36:30	1500,00	8580,00	10,50	9,05	12,50	1,07	11,33
37:30	1500,00	8580,00	10,71	9,20	12,70	1,09	11,33
40:00	1500,00	8580,00	10,92	9,35	12,90	1,10	11,33
42:30	1500,00	8580,00	11,00	9,45	13,01	1,11	11,33
45:00	1500,00	8580,00	11,05	9,48	13,05	1,11	11,33
47:30	1500,00	8580,00	11,10	9,54	13,12	1,12	11,33
50:00	1500,00	8580,00	11,16	9,60	13,18	1,12	11,33

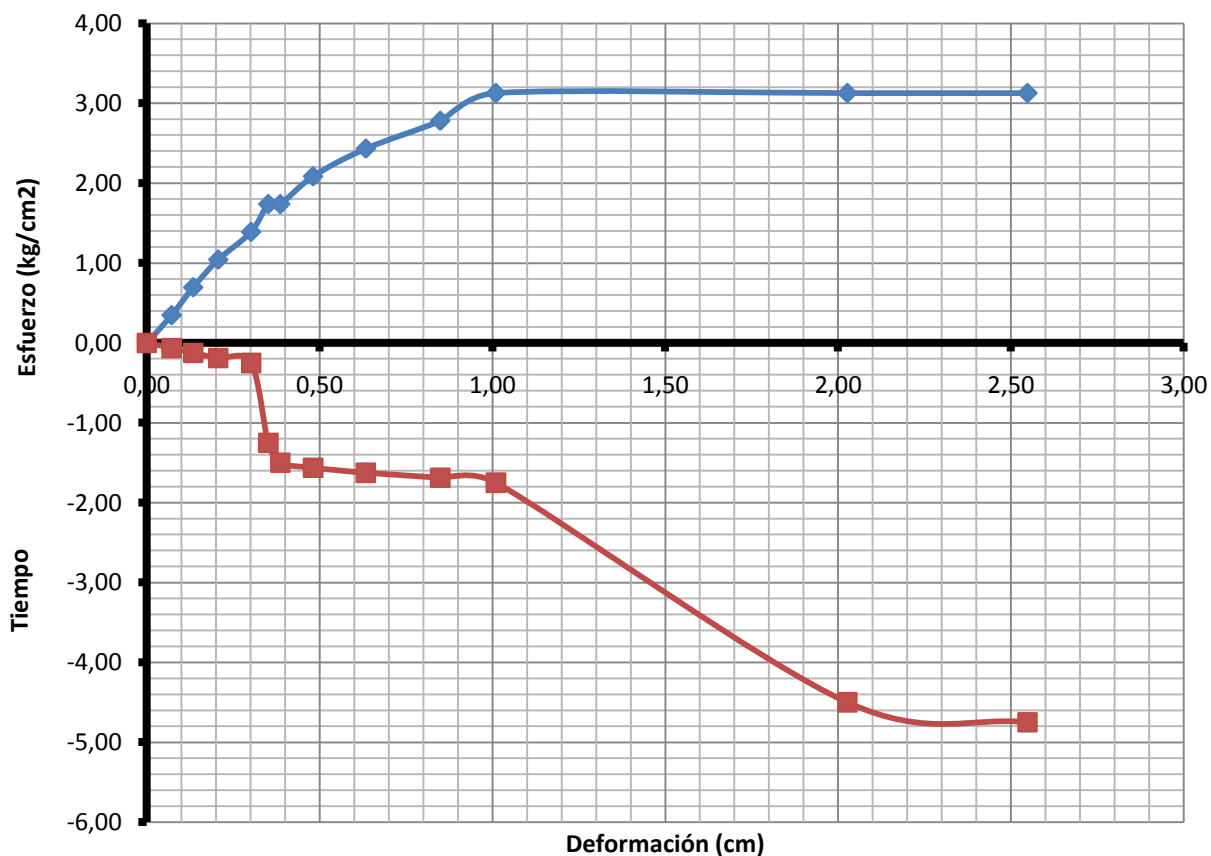
Apéndice 1.3. Datos obtenidos en el ensayo de carga horizontal realizado en Higuito de Desamparados.



**Apéndice 1.4.** Gráfico de Esfuerzo – Asentamiento y Tiempo Asentamiento del ensayo de carga vertical, realizado en Higuito de Desamparados.

DATOS DE CAMPO: ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL, HIGUITO DE DESAMPARADOS						
Tiempo	PRESION PSI	CARGA kg	DEF # 1 mm	DEF# 2 mm	$\delta$ cm	ESFUERZO Kg/cm <sup>2</sup>
00:00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
00:15	50	245,64	0,30	1,45	0,07	0,35
00:30	100	491,27	0,80	2,20	0,13	0,70
00:45	150	736,91	1,13	3,55	0,21	1,04
01:00	200	982,54	2,10	4,55	0,30	1,39
05:00	250	1228,18	2,20	5,60	0,35	1,74
06:00	250	1228,18	2,60	5,84	0,39	1,74
06:15	300	1473,81	3,41	7,10	0,48	2,09
06:30	350	1719,45	4,34	9,80	0,63	2,43
06:45	400	1965,08	6,76	13,57	0,85	2,78
07:00	450	2210,72	7,03	16,93	1,01	3,13
18:00	450	2210,72	11,88	28,11	2,03	3,13
19:00	450	2210,72	15,11	34,52	2,55	3,13

Apéndice 1.5. Datos obtenidos en el ensayo de carga horizontal con placa de 30 cm, realizado en Puesto 07, P. H. Reventazón.



Apéndice 1.6. Gráfico de Esfuerzo – Asentamiento y Tiempo Asentamiento del ensayo de carga horizontal, realizado en Higuito de Desamparados.

<b>DATOS DE CAMPO: ENSAYO PRESIOMÉTRICO</b>			
<b>Carga KPa</b>	<b>Carga kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Lectura 30"</b>	<b>Lectura 60"</b>
0	0	0	85
25	0,25	130	170
50	0,51	230	270
75	0,76	320	342
100	1,02	370	378
125	1,27	390	395
150	1,53	407	411
175	1,78	420	423
200	2,04	432	434
225	2,29	440	442
250	2,55	445	449
275	2,80	457	459
300	3,06	465	467
325	3,31	470	472
350	3,57	478	479
375	3,82	484	485
400	4,08	490	492
425	4,33	495	496
450	4,59	502	504
475	4,84	508	509
500	5,10	515	516
525	5,35	520	522
550	5,61	525	527

**Apéndice 1.7.** Datos obtenidos en el ensayo presiométrico realizado en Higuito de Desamparados.

<b>DATOS DE CAMPO: ENSAYO PRESIOMÉTRICO</b>			
<b>Carga KPa</b>	<b>Carga kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Lectura 30"</b>	<b>Lectura 60"</b>
0	0	0	40
25	0,25	85	115
50	0,51	170	200
75	0,76	245	265
100	1,02	280	287
125	1,27	315	315
150	1,53	330	350
175	1,78	360	362
200	2,04	377	380
225	2,29	395	400
250	2,55	415	415
275	2,80	445	455
300	3,06	472	480
325	3,31	505	507
350	3,57	535	552
375	3,82	570	585

**Apéndice 1.8.** Datos obtenidos en el ensayo presiométrico realizado en Puesto 07 – P. H. Reventazón.



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

Código  
F01-SAEG-MC-10-

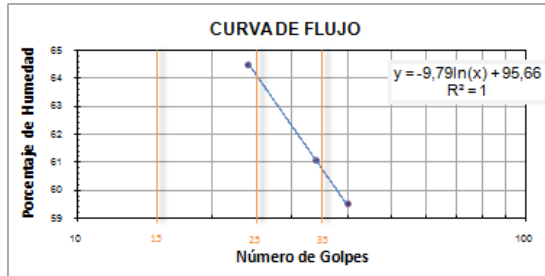
**RESULTADOS SL- CLASIFICACIÓN SUCS Y LÍMITES  
ATTERBERG**

Versión  
00  
Página  
1 de 2

Solicitud de cambio No. 00	Elaborado por SAEG	Aprobado por Alta Dirección SAEG	Rige a partir de 2010-03-01
Responsable solicitud	Jonathan G. Cortés Mena	Teléfono	e-mail
Proyecto / Obra	Proyecto de Graduación Jonathan G. Cortés Mena	Fecha de solicitud	03/03/2010
Localización / Sitio	Higuito de Desamparados	Orden Trabajo	
Identificación de la muestra		Profundidad (m)	2,7
Descripción del material	Arcilla Sobreconsolidada	Fecha muestreo	02/03/2010
Color del material	Naranja	Orden Servicio	

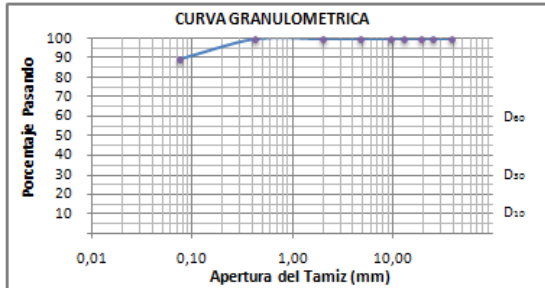
**LÍMITE LÍQUIDO**

Determinación No.	1	2	3	4
Recipiente No.	51	93	94	81
No. de Golpes	40,00	34,00	24,00	14,00
Wc + Ww (g)	17,89	16,46	16,34	16,34
Wc + Ws (g)	13,61	11,81	11,61	11,38
w (g)	4,28	4,65	4,73	4,96
Wc (g)	6,42	4,20	4,28	4,23
Ws (g)	7,19	7,61	7,33	7,15
w (%)	59,53	61,10	64,53	69,37



**LÍMITE PLÁSTICO**

Determinación No.	1	2	3	4
Recipiente No.	05	19		
Wc + Ww (g)	20,63	18,30		
Wc + Ws (g)	18,50	16,49		
w (g)	2,13	1,81		
Wc (g)	11,15	10,24		
Ws (g)	7,35	6,25		
w (%)	28,98	28,96		



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
No. TAMIZ	APERTURA (mm)	W RET (g)	% RET	% R. A.	% PAS
1 1/2"	38,100	0,00			100
1"	25,400	0,00			100,00
3/4"	19,100	0,00			100,00
1/2"	12,700	0,00			100,00
3/8"	9,520	0,00			100,00
4	4,760	0,00			100,00
10	2,000	0,00			100,00
40	0,425	0,00			100,00
200	0,075	10,70	10,39	10,39	89,61
Peso de la muestra (g)			103,00		

D60 (mm)		Coefficiente de Uniformidad Cu
D30 (mm)		Coefficiente de Curvatura Cc
D10 (mm)		Gravedad Especifica (Gs)

Grava:	0,00%
Arena:	10,39%
Finos:	89,61%

<b>Humedad Natural, w<sub>n</sub> (%)</b>	<b>20,91%</b>
<b>CLASIFICACION SUCS</b>	<b>CH</b>

TABLA RESUMEN	
Límite Líquido (LL)	64,77
Límite Plástico (LP)	28,97
Índice Plasticidad (IP)	35,80

**OBSERVACIONES**

Técnico(a) que ejecuta	Jonathan G. Cortés Mena
Digita	Jonathan G. Cortés Mena
Resultados entregados a	
Revisa	

Fecha	
Fecha	
Fecha	
Fecha	



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

Código  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS SL- CLASIFICACIÓN SUCS Y LÍMITES  
ATTERBERG**

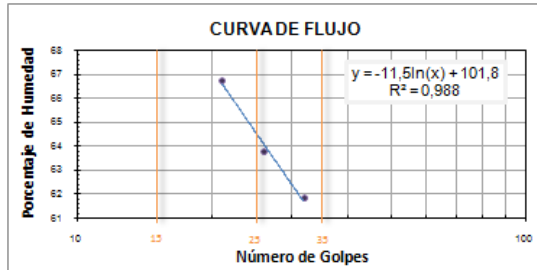
Versión  
00

Página  
1 de 2

Solicitud de cambio No. 00	Elaborado por SAEG	Aprobado por Alta Dirección SAEG	Rige a partir de 2010-03-01
Responsable solicitud	Jonathan G. Cortés Mena	Teléfono	e-mail
Proyecto / Obra	Proyecto de Graduación Jonathan G. Cortés Mena		Fecha de solicitud
Localización / Sitio	PH Reventazón	Orden Trabajo	
Identificación de la muestra		Profundidad (m)	2,7
Descripción del material	Limo Arcilloso Color Rojizo	Fecha muestreo	10/03/2010
Color del material	Rojizo	Orden Servicio	

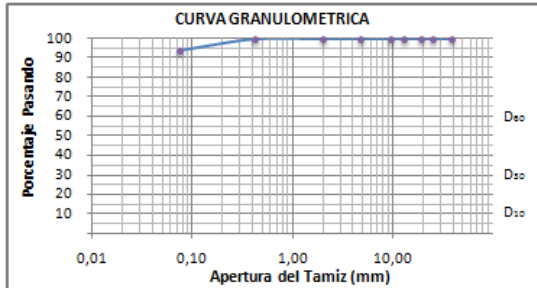
**LÍMITE LÍQUIDO**

Determinación No.	1	2	3	4
Recipiente No.	51	93	94	81
No. de Golpes	32,00	26,00	21,00	17,00
Wc + Ww (g)	19,50	16,11	16,92	16,53
Wc + Ws (g)	14,50	11,47	11,86	11,53
w (g)	5,00	4,64	5,06	5,00
Wc (g)	6,42	4,20	4,28	4,24
Ws (g)	8,08	7,27	7,58	7,29
w (%)	61,88	63,82	66,75	68,59



**LÍMITE PLÁSTICO**

Determinación No.	1	2	3	4
Recipiente No.	5	19		
Wc + Ww (g)	18,93	19,40		
Wc + Ws (g)	16,29	16,25		
w (g)	2,64	3,15		
Wc (g)	11,15	10,24		
Ws (g)	5,14	6,01		
w (%)	51,36	52,41		



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
No. TAMIZ	APERTURA (mm)	W RET (g)	% RET	% R. A.	% PAS
1 1/2"	38,100	0,00			100
1"	25,400	0,00			100,00
3/4"	19,100	0,00			100,00
1/2"	12,700	0,00			100,00
3/8"	9,520	0,00			100,00
4	4,760	0,00			100,00
10	2,000	0,00			100,00
40	0,425	0,00			100,00
200	0,075	6,00	5,85	5,85	94,15

D60 (mm)		Coefficiente de Uniformidad Cu	
D30 (mm)		Coefficiente de Curvatura Cc	
D10 (mm)		Gravedad Específica (Gs)	

Grava:	0,00%
Arena:	5,85%
Finos:	94,15%

Peso de la muestra (g) 102,50

Humedad Natural, w <sub>n</sub> (%)	59,08%
<b>CLASIFICACION SUCS</b>	<b>MH</b>

TABLA RESUMEN	
Límite Líquido (LL)	64,80
Límite Plástico (LP)	51,89
Índice Plasticidad (IP)	12,90

**OBSERVACIONES**

Técnico(a) que ejecuta	Jonathan G. Cortés Mena
Digita	Jonathan G. Cortés Mena
Resultados entregados a	
Revisa	

Fecha	
Fecha	
Fecha	
Fecha	



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**Código:**  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**

**Versión:**  
0

**Página:**  
1 de 2

**Solicitud de cambio No.**  
0

**Elaborado por:**  
SAEG

**Aprobado por:**  
Alta Dirección SAEG

**Rige a partir de:**  
2009-11-01

Responsable que solicitó el servicio  Teléfono  e-mail   
Proyecto  Proyecto de Graduación de Jonathan G. Cortés Mena  
Procedencia  Higuito de Desamparados  
Orden de Trabajo SAEG

**DATOS DE LA MUESTRA O ESPECÍMEN**

Fecha de muestreo  02/03/2010 Fecha Recepción Muestra  03/03/2010  
Localización  Higuito de Desamparados Profundidad, m  2,70  
Descripción del material  Arcilla Sobreconsolidada Código Muestra

**DATOS DEL EQUIPO UTILIZADO**

Área molde (cm <sup>2</sup> )	181,9
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2120
Espesor de la galleta (cm)	6,14
Área del pistón (cm <sup>2</sup> )	19,40

**RESULTADOS DEL ENSAYO**

Peso volumétrico máximo Proctor (g/cm<sup>3</sup>)  1,550

DATOS GENERALES								DETERMINACIÓN HUMEDAD INICIAL						
GOLPES	MOLDE	Ww+m (g)	Wmolde (g)	Ww (g)	δW (g/cm <sup>3</sup> )	δS (g/cm <sup>3</sup> )	%C	CÁPSULA	W <sub>c</sub> (g)	W <sub>w+c</sub> (g)	W <sub>s+c</sub> (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w
56	1	11140	7120	4020	1,896	1,565	101	C-01	111,7	453,3	393,6	341,6	281,9	21,18
25	2	10725	7100	3625	1,710	1,409	90,9	C-19	111,5	317,2	281	205,7	169,5	21,36
10	3	10580	7160	3420	1,613	1,326	85,56	C-40	111,6	319,6	282,6	208	171	21,64

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**

Versión:

0

Página:

2 de 2

Código:

F01-SAEG-MC-10-

MOLDE	FECHA	H. INICIAL	LECTURA DEL EXTENSÓMETRO									
			1 (h)	2 (h)	4 (h)	8 (h)	12 (h)	24 (h)	36 (h)	48 (h)	72 (h)	96 (h)
1	17/03/2010	07:00	42	58	74	93	97	126	141	143	147	148
2	17/03/2010	07:00	89	108	116	119	120	123	125	125	127	127
3	17/03/2010	07:00	111	114	116	118	119	121	123	123	125	125

**FUERZA APLICADA (kg) vrs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7,5 mm	9 mm	10 mm	12,5 mm
1		62	76	90	102	114	124	138	150	160	172	182	190	202
2		70	76	82	86	88	92	98	102	108	115	122	125	130
3		70	75	78	80	83	88	92	94	97	100	103	105	108

**ESFUERZO (kg) vrs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo	mm	1mm	1mm	2mm	2mm	3mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm	9mm	10mm	13mm
1		0	3,1959	3,918	4,639	5,258	5,876	6,392	7,113	7,732	8,247	8,866	9,381	9,794	10,41
2		0	3,6082	3,918	4,227	4,433	4,536	4,742	5,052	5,258	5,567	5,928	6,289	6,443	6,701
3		0	3,6082	3,866	4,021	4,124	4,278	4,536	4,742	4,845	5	5,155	5,309	5,412	5,567

MOLDE	Ecuación ajuste			CBR		CARACTERIZACIÓN FINAL								
	m	b	Correc	2,5mm	5mm	Ww+m (g)	Cápsula	Wcápsula	Ww+C (g)	Ws+C (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w	
1	1,319	2,044	-1,5491	4,7	6,3	11325	C-43	112,1	368,7	313,1	256,6	201	27,66	
2	0,72	2,415	-3,3535	4,4	4,7	11010	C-23	111,7	493,6	403,5	381,9	291,8	30,88	
3	0,639	2,396	-3,7495	4,3	4,4	10915	C-21	111,7	486,2	392,6	374,5	280,9	33,32	

**OBSERVACIONES**

Técnico(a) que ejecuta  
Digita  
Datos entregados a  
Revisa

Jonathan G. Cortés Mena

Jonathan G. Cortés Mena

Fecha

Fecha

Fecha

Fecha





**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**Código:**  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**

**Versión:**  
0

**Página:**  
1 de 2

**Solicitud de cambio No.**  
0

**Elaborado por:**  
SAEG

**Aprobado por:**  
Alta Dirección SAEG

**Rige a partir de:**  
2009-11-01

Responsable que solicitó el servicio Jonathan G. Cortés Mena Teléfono e-mail  
Proyecto Proyecto de Graduación Jonathan G. Cortés Mena  
Procedencia Higuito de Desamparados  
Orden de Trabajo SAEG

**DATOS DE LA MUESTRA O ESPECÍMEN**

Fecha de muestreo 02/03/2010 Fecha Recepción Muestra 03/03/2010  
Localización Higuito de Desamparados Profundidad, m 2,70  
Descripción del material Arcilla Sobreconsolidada Código Muestra

**DATOS DEL EQUIPO UTILIZADO**

Área molde (cm <sup>2</sup> )	181,9
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2120
Espesor de la galleta (cm)	6,14
Área del pistón (cm <sup>2</sup> )	19,40

**RESULTADOS DEL ENSAYO**

Peso volumétrico máximo Proctor (g/cm<sup>3</sup>) 1,550

DATOS GENERALES								DETERMINACIÓN HUMEDAD INICIAL						
GOLPES	MOLDE	Ww+m (g)	Wmolde (g)	Ww (g)	$\delta W$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta S$ (g/cm <sup>3</sup> )	%C	CÁPSULA	W <sub>c</sub> (g)	W <sub>w+c</sub> (g)	W <sub>s+c</sub> (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w
56	1	11075	7100	3975	1,875	1,537	99,17	C-41	111,5	430	372,6	318,5	261,1	21,98
25	2	10730	7100	3630	1,712	1,402	90,43	C-46	111,4	451	389,4	339,6	278	22,16
10	3	10465	7160	3305	1,559	1,277	82,4	C-08	111,6	418,2	362,8	306,6	251,2	22,05

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**Versión:  
**0**Página:  
**2 de 2**Código:  
F01-SAEG-MC-10-

MOLDE	FECHA	H. INICIAL	LECTURA DEL EXTENSÓMETRO											
			1 (h)	2 (h)	4 (h)	8 (h)	12 (h)	24 (h)	36 (h)	48 (h)	72 (h)	96 (h)		
1														
2														
3														

**FUERZA APLICADA (kg) vrs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7,5 mm	9 mm	10 mm	12,5 mm
1		12,37	15,46		17,94	19,79	21,24	22,68	25,05		28,76		31,55	33,71
2		0,36	0,52		3,2	5,36	6,55	7,68	9,54		12,11		14,07	15,62
3		2,32	3,87		4,85	5,46	6,03	6,55	7,47		9,02		10,26	11,29

**ESFUERZO (kg) vrs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo	mm	1mm	1mm	2mm	2mm	3mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm	9mm	10mm	13mm
1		0	0,6376	0,797		0,925	1,02	1,095	1,169	1,291		1,482		1,626	1,738
2		0	0,0186	0,027		0,165	0,276	0,338	0,396	0,492		0,624		0,725	0,805
3		0	0,1196	0,199		0,25	0,281	0,311	0,338	0,385		0,465		0,529	0,582

MOLDE	Ecuación ajuste			CBR		CARACTERIZACIÓN FINAL								
	m	b	Correc	2,5mm	5mm	Ww+m (g)	Cápsula	Wcápsula	Ww+C (g)	Ws+C (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w	
1	0,206	0,403	-1,9542	0,7	1,0									
2	0,108	-0,028	0,2618	0,0	0,3									
3	0,068	0,082	-1,2034	0,2	0,3									

**OBSERVACIONES**

Este ensayo fue realizado sin saturar antes las muestras, esto con el fin de lograr una compactación final a la que se tenía en campo.

**Técnico(a) que ejecuta**  
**Digita**  
**Datos entregados a**  
**Revisa**

Jonathan G. Cortés Mena  
 Jonathan G. Cortés Mena  
  
 \_\_\_\_\_

**Fecha**  
**Fecha**  
**Fecha**  
**Fecha**



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**Código:**  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**

**Versión:**  
0

**Página:**  
1 de 2

**Solicitud de cambio No.**  
0

**Elaborado por:**  
SAEG

**Aprobado por:**  
Alta Dirección SAEG

**Rige a partir de:**  
2009-11-01

Responsable que solicitó el servicio  Teléfono  e-mail   
 Proyecto   
 Procedencia   
 Orden de Trabajo SAEG

**DATOS DE LA MUESTRA O ESPECÍMEN**

Fecha de muestreo  Fecha Recepción Muestra   
 Localización  Profundidad, m   
 Descripción del material  Código Muestra

**DATOS DEL EQUIPO UTILIZADO**

Área molde (cm <sup>2</sup> )	181,9
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2120
Espesor de la galleta (cm)	6,14
Área del pistón (cm <sup>2</sup> )	19,40

**RESULTADOS DEL ENSAYO**

Peso volumétrico máximo Proctor (g/cm<sup>3</sup>)

DATOS GENERALES								DETERMINACIÓN HUMEDAD INICIAL						
GOLPES	MOLDE	Ww+m (g)	Wmolde (g)	Ww (g)	δW (g/cm <sup>3</sup> )	δS (g/cm <sup>3</sup> )	%C	CÁPSULA	W <sub>c</sub> (g)	W <sub>w+c</sub> (g)	W <sub>s+c</sub> (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w
56	1	10695	7120	3575	1,686	1,260	106,8	C-44	111,7	701,6	552,5	589,9	440,8	33,82
25	2	10440	7100	3340	1,575	1,097	93,01	C-50	111,3	794,9	587,5	683,6	476,2	43,55
10	3	10265	7155	3110	1,467	1,020	86,46	C-40	111,5	744,3	551,6	632,8	440,1	43,79

**RESULTADOS ENSAYO SL- CBR**Versión:  
**0**Página:  
**2 de 2**Código:  
F01-SAEG-MC-10-

MOLDE	FECHA	H. INICIAL	LECTURA DEL EXTENSÓMETRO									
			1 (h)	2 (h)	4 (h)	8 (h)	12 (h)	24 (h)	36 (h)	48 (h)	72 (h)	96 (h)
1	24/05/2010	12:10	2,3	3	5	6		7		7	7	7
2	24/05/2010	12:10	6,8	8	9	9,5		10,2		10,8	11	11
3	24/05/2010	12:10	10,9	11,5	12	12,5		13,7		14,2	14,5	14,5

**FUERZA APLICADA (kg) vs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo		0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7,5 mm	9 mm	10 mm	12,5 mm
1			54	120	171	205	243	271	321	354	383	425	464	487	539
2			33	65	85	103	120	136	161	182	200	226	245	257	284
3			39	56	64	70	74	78	87	94	101	110	118	122	134

**ESFUERZO (kg) vs PENETRACIÓN (mm)**

MOLDE	Lo	mm	1mm	1mm	2mm	2mm	3mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm	9mm	10mm	13mm
1		0	2,7835	6,186	8,814	10,57	12,53	13,97	16,55	18,25	19,74	21,91	23,92	25,1	27,78
2		0	1,701	3,351	4,381	5,309	6,186	7,01	8,299	9,381	10,31	11,65	12,63	13,25	14,64
3		0	2,0103	2,887	3,299	3,608	3,814	4,021	4,485	4,845	5,206	5,67	6,082	6,289	6,907

MOLDE	Ecuación ajuste			CBR		CARACTERIZACIÓN FINAL								
	m	b	Correc	2,5mm	5mm	Ww+m (g)	Cápsula	Wcápsula	Ww+C (g)	Ws+C (g)	Ww (g)	Ws (g)	%w	
1	3,645	2,063	-0,5661	13,0	17,4	818,9	C-44	111,8	818,9	600,2	707,1	488,4	44,78	
2	1,821	1,123	-0,617	6,6	8,8	788,5	C-40	112,3	788,5	564	676,2	451,7	49,70	
3	0,793	1,5	-1,8914	4,3	4,8	772,9	C-50	111,5	772,9	536,9	661,4	425,4	55,48	

**OBSERVACIONES**Técnico(a) que ejecuta  
Digita  
Datos entregados a  
RevisaJonathan G. Cortés Mena  
Jonathan G. Cortés Mena  
  
Fecha  
Fecha  
Fecha  
Fecha



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**Código:**  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS ENSAYO SL- PROCTOR ESTÁNDAR**

**Versión:**  
0

**Página:**  
1 de 2

**Solicitud de cambio No.**  
0

**Elaborado por:**  
SAEG

**Aprobado por:**  
Alta Dirección SAEG

**Rige a partir de:**  
01/11/2009

Responsable Jonathan G. Cortés Mena Teléfono e-mail  
Proyecto Proyecto de Graduación de Jonathan G. Cortés Mena  
Procedencia Higuito de Desamparados  
Orden de Trabajo SAEG

**DATOS DE LA MUESTRA O ESPECÍMEN**

Fecha de muestreo 02/03/2010 Fecha Recepción Muestra 03/03/2010  
Localización Higuito de Desamparados Profundidad, m 2,70  
Descripción del material Arcilla Sobreconsolidada Código Muestra

**DATOS DE EQUIPO UTILIZADO**

Peso del molde (g) 6645  
Volumen del molde (cm<sup>3</sup>) 2124

**DATOS DE ENSAYO**

**DENSIDADES**

DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5	6	7
Ww + P(molde) (g)	10460	10615	10710	10715	10620		
Ww (g)	3815	3970	4065	4070	3975		
$\gamma_w$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1796,14	1869,11	1913,84	1916,20	1871,469		
$\gamma_s$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1506,59	1539,18	1547,77	1509,93	1440,457		

**CONTENIDO DE AGUA**

DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5	6	7
No. Cápsula	C-02	C-21	C-23	C-24	C-33		
Wc (g)	111,9	111,6	111,6	111,7	111,4		
Ww + Wc (g)	487,2	593,7	421,1	521,1	427,5		
Ws + Wc (g)	426,7	508,6	361,9	434,3	354,7		
Ww (g)	375,3	482,1	309,5	409,4	316,1		
Ws (g)	314,8	397,0	250,3	322,6	243,3		
%W	19,22	21,44	23,65	26,91	29,92		



## RESULTADOS ENSAYO SL- PROCTOR ESTÁNDAR

Versión:  
0

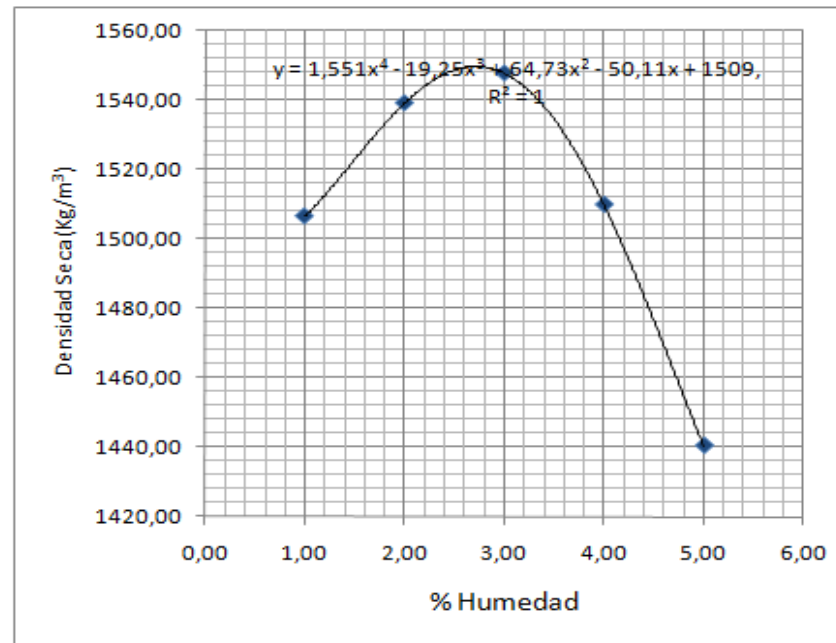
Página:  
2 de 2

Código:  
F01-SAEG-MC-10-

Humedad Óptima, w (%)	22,74
$\gamma_{\text{máx}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1550

### OBSERVACIONES

Gráfico de densidad seca vs humedad



Técnico(a) que ejecuta	Jonathan G. Cortés Mena
Digita	Jonathan G. Cortés Mena
Entregado a	
Revisa	

Fecha	
Fecha	
Fecha	
Fecha	



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**Código:**  
F01-SAEG-MC-10-

**RESULTADOS ENSAYO SL- PROCTOR ESTÁNDAR**

**Versión:**  
0

**Página:**  
1 de 2

**Solicitud de cambio No.**  
0

**Elaborado por:**  
SAEG

**Aprobado por:**  
Alta Dirección SAEG

**Rige a partir de:**  
01/11/2009

Responsable Jonathan G. Cortés Mena Teléfono e-mail  
Proyecto Proyecto de Graduación de Jonathan G. Cortés Mena  
Procedencia PH Reventazón  
Orden de Trabajo SAEG

**DATOS DE LA MUESTRA O ESPECÍMEN**

Fecha de muestreo 10/03/2010 Fecha Recepción Muestra 15/03/2010  
Localización Puesto 07 Profundidad, m 1,80  
Descripción del material Limo Arcilloso color Rojizo Código Muestra

**DATOS DE EQUIPO UTILIZADO**

Peso del molde (g) 6645  
Volumen del molde (cm<sup>3</sup>) 2124

**DATOS DE ENSAYO**

**DENSIDADES**

DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5	6	7
Ww + P(molde) (g)	10070	10180	10250	10245	10230		
Ww (g)	3425	3535	3605	3600	3585		
$\gamma_w$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1612,52	1664,31	1697,27	1694,92	1687,853		
$\gamma_s$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1146,76	1167,96	1176,36	1165,82	1151,608		

**CONTENIDO DE AGUA**

DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5	6	7
No. Cápsula	C-32	C-12	C-28	C-09	C-14		
Wc (g)	111,2	111,3	111,2	111,6	111,3		
Ww + Wc (g)	609,4	603,2	642,3	632,8	668,1		
Ws + Wc (g)	465,5	456,5	479,3	470,1	491,2		
Ww (g)	498,2	491,9	531,1	521,2	556,8		
Ws (g)	354,3	345,2	368,1	358,5	379,9		
%W	40,62	42,50	44,28	45,38	46,56		



## RESULTADOS ENSAYO SL- PROCTOR ESTÁNDAR

Versión:

0

Página:

2 de 2

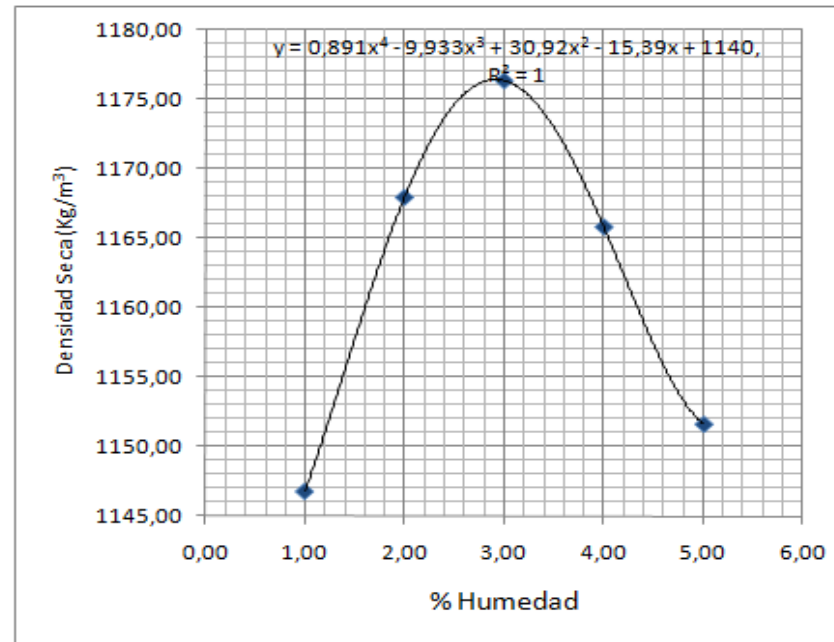
Código:

F01-SAEG-MC-10-

Humedad Óptima, w (%)	43,77
$\gamma_{\text{máx}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1176

### OBSERVACIONES

Gráfico de densidad seca vs humedad



Técnico(a) que ejecuta Jonathan G. Cortés Mena

Digita Jonathan G. Cortés Mena

Entregado a

Revisa

Fecha

Fecha

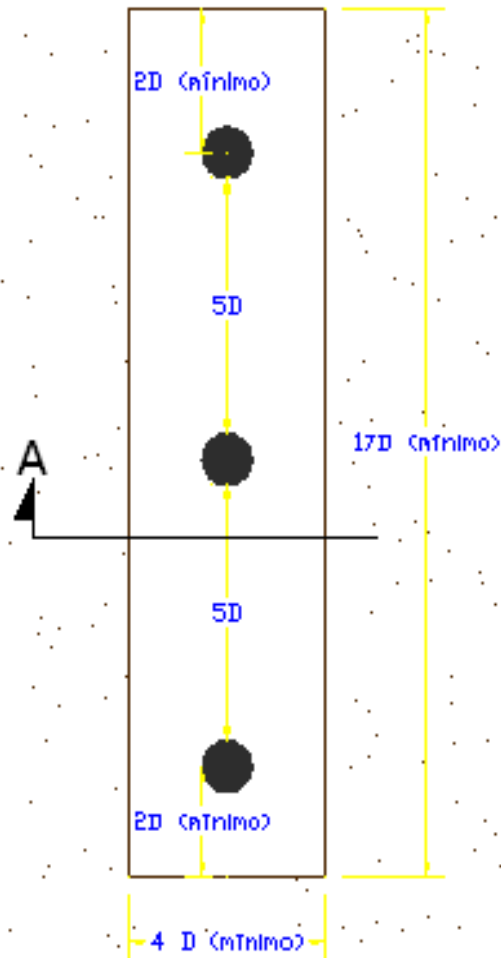
Fecha

Fecha



# Apéndice 2

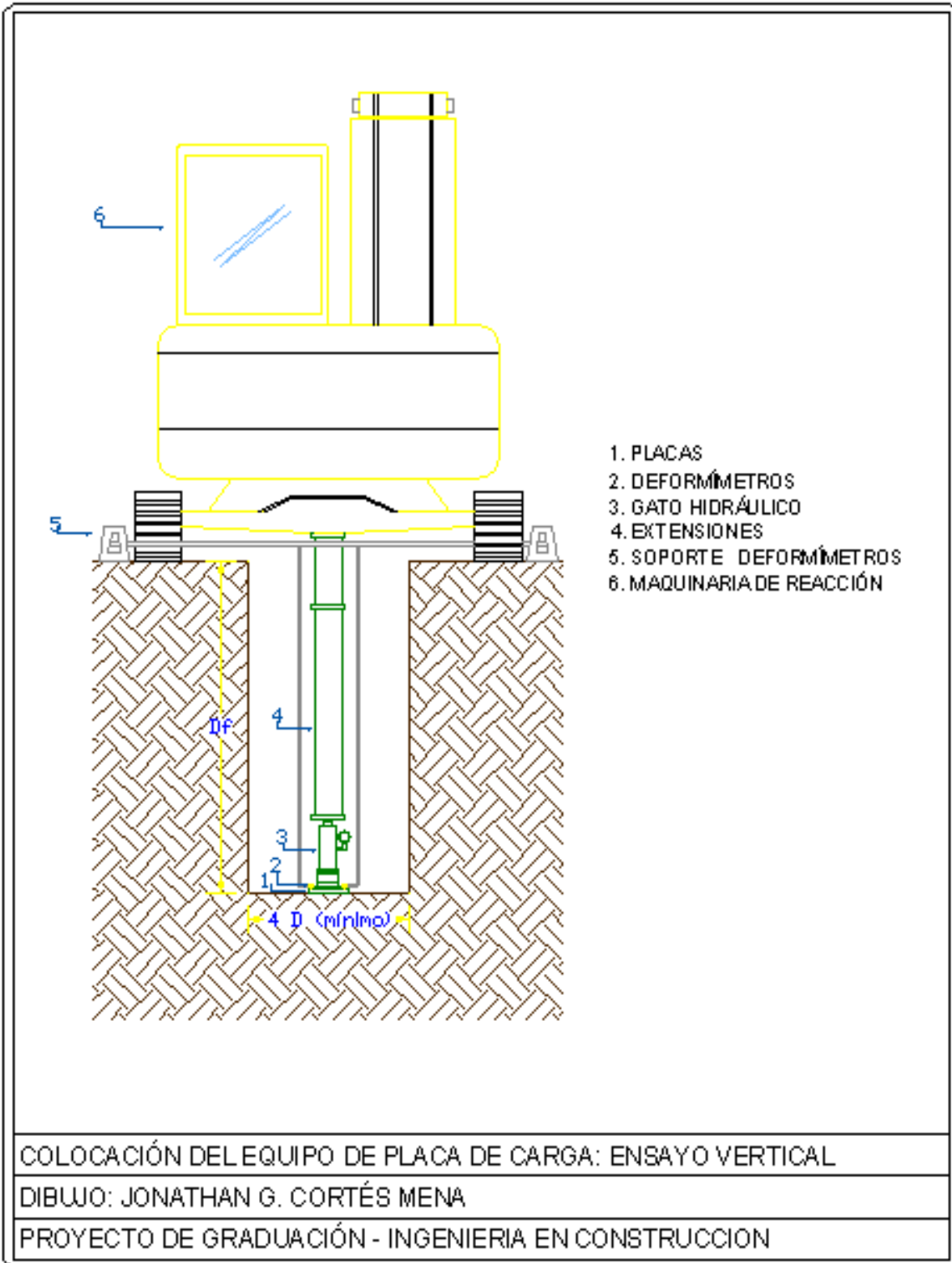
Diagrama de la conformación del equipo para el ensayo de placa de carga *In Situ*.

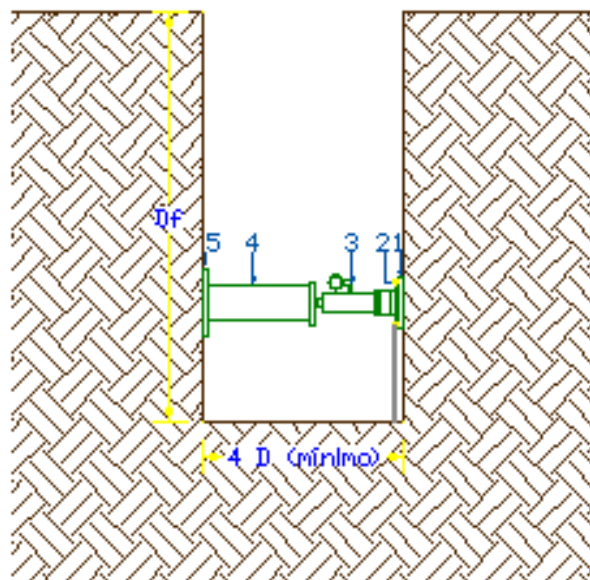


DISTRIBUCIÓN DE LOS SITIOS A ENSAYAR DENTRO DE UNA TRINCHERA

DIBUJO: JONATHAN G. CORTÉS MENA

PROYECTO DE GRADUACIÓN - INGENIERIA EN CONSTRUCCION





1. PLACAS
2. DEFORMÍMETROS
3. GATO HIDRÁULICO
4. EXTENSIONES
5. PLACA DE REACCIÓN

COLOCACIÓN DEL EQUIPO DE PLACA DE CARGA: ENSAYO HORIZONTAL

DIBUJO: JONATHAN G. CORTÉS MENA

PROYECTO DE GRADUACIÓN - INGENIERIA EN CONSTRUCCION

# Referencias

Araya, A. 2010. **Consultas Técnicas sobre los ensayos de carga y ensayos presiométricos realizados en este Proyecto.** San José. Comunicación personal.

Asociación Costarricense de Geotecnia. 2009. **Código de Cimentaciones de Costa Rica.** Cartago; Editorial Tecnológica de Costa Rica.

ASTM. Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils. **Norma ASTM Designación D-4719.**

ASTM. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. **Norma ASTM designación D-1883.**

ASTM. Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings. **Norma ASTM Designación D-1194.**

ASTM. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). **Norma ASTM Designación D-2487.**

ASTM. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. **Norma ASTM Designación D-854.**

ASTM. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. **Norma ASTM Designación D-698.**

ASTM. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil". **Norma ASTM Designación D-2166.**

Avilés, E. 2010. **Consultas sobre los resultados obtenidos durante la ejecución del Proyecto.** San José. Comunicación personal.

Badillo, J. 2004. **Mecánica de Suelos: Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos.** México; Editorial LIMUSA. 19:28p

Bermúdez, L. 2010. **Consultas Técnicas Referentes a Resultados Obtenidos.** San José. Comunicación personal.

Bermúdez, L. 2010. **Consultas Técnicas sobre los ensayos realizados en el Proyecto.** San José. Comunicación personal.

Bowles, J. 1997. **Foundation Analysis and Design.** New York; McGraw-Hill. 501:506.

Braja, D. 2006. **Principios de Ingeniería de Cimentaciones.** México; CENGAGE Learning. 241:244p.

Bravo, J. 2010. **Consultas Técnicas Sobre los ensayos realizados en el Proyecto.** San José. Comunicación Personal.

Calavera, J. 2000. **Cálculo de Estructuras de Cimentación.** México; Intemac. 245:267p.

Crespo, C. 2004. **Mecánica de Suelos y Cimentaciones.** México; Editorial LIMUSA. 113:115p

Delgado, J. 2010. **Consultas sobre los procedimientos para la ejecución de los ensayos realizados en el Proyecto.** San José. Comunicación personal.

Delgado, J. 2010. **Consultas sobre los resultados obtenidos durante la ejecución del Proyecto.** San José. Comunicación personal.

Delgado, M. 1993. **El coeficiente de balasto.** Bogotá; Segundo encuentro nacional de Ingenieros en Suelos y Estructuras. 8:9p

ICC-UCV. 2006. **Determinación del Módulo de Reacción (Placa De Carga)**. Valparaíso; ICC. 1:18p

Jiménez, A. 1980. **Geotecnia y Cimientos III**. Madrid; Editorial Rueda

Jiménez, M. 2010. **Consultas sobre los procedimientos para la ejecución de los ensayos realizados en el Proyecto**. San José. Comunicación personal.

Jiménez, P. 2009. **Implantación y Calibración del Presiómetro Ménard para estimación de capacidad de soporte y deformabilidad de suelos en cimentaciones de proyectos ICE**. Cartago; Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Juárez, E. 2004. **Mecánica de Suelos**. México; Editorial Limusa. 29p.

Kauffmann, R. 2010. **Consultas sobre los procedimientos para la ejecución de los ensayos realizados en el Proyecto**. San José. Comunicación personal.

Leoni, A. 2005. **Apunte de Coeficiente de Balasto**. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de la Plata. 1:30p.

Muzás, F. 2002. **Consideraciones sobre la Elección De Coeficientes de Balasto**. Revista de Obras Públicas. (3427)

Oficina Nacional de Normalización. 1998. Métodos de Ensayo de Carga sobre placa en suelos. **NORMA CUBANA DESIGNACION N. C. 11**.

Requena, I. 2007. **Determinación del coeficiente de balasto en cimentaciones**.

Ruiz, R. 2009. **Valoración de los Materiales Aluviales presentes en el Río Reventazón para ser utilizados como Enrocado en la Construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón**. Cartago; Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Sowers, G. 1972. **Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones**. México; Editorial LIMUSA. 321:318p.

Tapia, M. 2010. **Consultas sobre los resultados obtenidos durante la ejecución del Proyecto**. San José. Comunicación personal.

Terzaghi, K. 1955. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. 5 (4). **Geotechnique**. 297:326p.

Torres, A. 2010. **Consultas Técnicas Sobre los ensayos realizados en el Proyecto**. San José. Comunicación Personal.

Venegas, F. 2010. **Consultas Técnicas Sobre los ensayos realizados en el Proyecto**. San José. Comunicación Personal.

Winter, G. 1977. **Proyecto de Estructuras de Hormigón**. Madrid; Editorial Reverté. 280:282p.