

ESTIMACIÓN DE DEFORMACIONES DE RELLENOS TÉCNICOS BAJO LOS CIMIENTOS A PARTIR DE LA CORRELACIÓN DE PRUEBAS “IN SITU”

Yuri Jesús Cruz Mendez

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Carretera a Morón km 2½, Ciego de Avila, Cuba. ZIP 65200. E-mail: uicca@enia.co.cu o yuri@eicca.fica.inf.cu

RESUMEN

El desarrollo de la actividad turística en Cayo Guillermo, Cayo Coco y Cayo Paredón Grande, en la Provincia de Ciego de Avila, presupone la existencia de diferentes condiciones físicas y geológicas para la cimentación de las edificaciones que allí se han ejecutado y se pretenden ejecutar; por lo tanto ha sido necesario el uso de Rellenos Técnicos para solucionar algunos proyectos de cimentación. En el presente trabajo se propone una herramienta práctica para estimar las deformaciones que se producirán en el suelo, bajo los cimiento colocados sobre estos rellenos técnicos (conformados con material de canteras de la Formación Jaimanitas) con el objetivo de reducir al mínimo la cantidad de pruebas de placa cargada; por lo costosas que resultan y la falta de equipamiento para realizarlas; y lograr mayor racionalidad en los proyectos de cimentación. Para este propósito los datos usados son obtenidos a través de la correlación de los resultados de dos ensayos de campo muy comunes (Prueba de Placa Cargada PLT y la Prueba de Control de Compactación) y la ecuación que relaciona las deformaciones bajo una placa de ensayo, de lado igual a 30cm, con las deformaciones que ocurren debajo de cimientos con lados de mayores dimensiones.

ABSTRACT

The development of the tourist activity in Key Guillermo, Key Coco and Key Paredón Grande, in the province of Ciego de Avila, presuppose the existence of physical and geologic different conditions for the foundation of the constructions that there they have been executed and they are sought to execute; therefore it has been necessary the use of technical fillers to solve some foundation projects. Presently work intends a practical tool to estimate the deformations that will take place in the soil, under the foundation placed on these technical fillers (conformed with material of quarries of the Jaimanitas Formation) with the objective of reducing to the minimum the quantity of tests of loaded plates (for the expensive ones that they are and the equipment lack to carry out them) and to achieve bigger rationality in the foundation projects. For this purpose the used data are obtained through the correlation of the results of two very common field tests (test of loaded plates (PLT) and the test of control of compaction) and the equation that relates the deformations under a plate of test, of side similar to 30cm, with the deformations that happen under foundations with sides of major dimensions.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las obras edificadas en el Polo Turístico Jardines del Rey, de la cayería Norte de Ciego de Avila, se han utilizado Rellenos Técnicos como terreno de cimentación, para los que se definen sus parámetros de calidad y capacidad soportante siempre por separado; estas condiciones presuponen la realización de un elevado número de ensayos, tanto de campo como de laboratorio, provocando el encarecimiento y retardo de los proyectos.

Por ello, como objetivo principal, en el presente trabajo se propone una herramienta práctica que, vinculando ambos parámetros (calidad y capacidad soportante del relleno), permite estimar las deformaciones (asentamientos, (ΔH)) del suelo bajo los cimiento colocados sobre rellenos tecnificados (conformados con material de la Formación Jaimanitas), mediante la ecuación que relaciona el asiento de una placa de ensayo de lado igual a $B_p = 30\text{cm}$ con el asiento de zapatas

de lados mayores, con el propósito de hacer la menor cantidad de pruebas de carga sobre placas, por lo costosas que resultan, y lograr mayor rapidez en los proyectos de cimentación.

Este proceder puede ser aplicado a todas las obras que se cimienten sobre Rellenos Técnicos conformados con material de préstamo triturado de dicha Formación, la que ha sido ampliamente estudiada, desde el punto de vista geotécnico, en el Polo Turístico mencionado; pero no conocemos la existencia de algún trabajo que se dedique a la correlación de los resultados de Prueba de Placa Cargada (Plate Load Test) y de Control de Compactación.

Según el Mapa Geológico a escala 1:250000, la Formación Jaimanitas (**Q₃ js**) aparece como una faja discontinua que ciñe la costa cubana y gran parte de las islas adyacentes y está representada por Calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, conteniendo principalmente conchas bien preservadas, corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Las bolsas cársicas se encuentran rellenas por una fina mezcla carbonato - arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a calcarenitas masivas o finamente estratificadas y a veces contienen intercalaciones de margas. La cementación es variable. La coloración predominante es blancuzca o amarillenta. Se estima que esta formación posea un espesor mayor de 10 metros y la misma data del Pleistoceno Superior.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la confección de este trabajo se realizó la recopilación y consulta de los Informes Ingeniero Geológicos Arena Real (Cayo Coco), Villa Vigía y Villa Gregorio (Cayo Guillermo), así como los Informes de Control de Compactación de Hotel Villa Gregorio, Hotel Arena Real, Hotel La Terraza.



Figura 1.- Equipo durante una prueba de placa cargada real.

Las Pruebas de Placas Cargadas (Plate Load Test. PLT) utilizadas para la correlación se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos por la Norma Cubana NC 54-275:84. En la Figura 1 se muestra una imagen del Equipo durante una prueba de campo.

El Control de Compactación se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por la Norma Cubana NC-54-137: 78.

En la Figura 2 se muestra el esquema del Aparato usado para la determinación de la Densidad del relleno en el campo por el Método de la Arena.

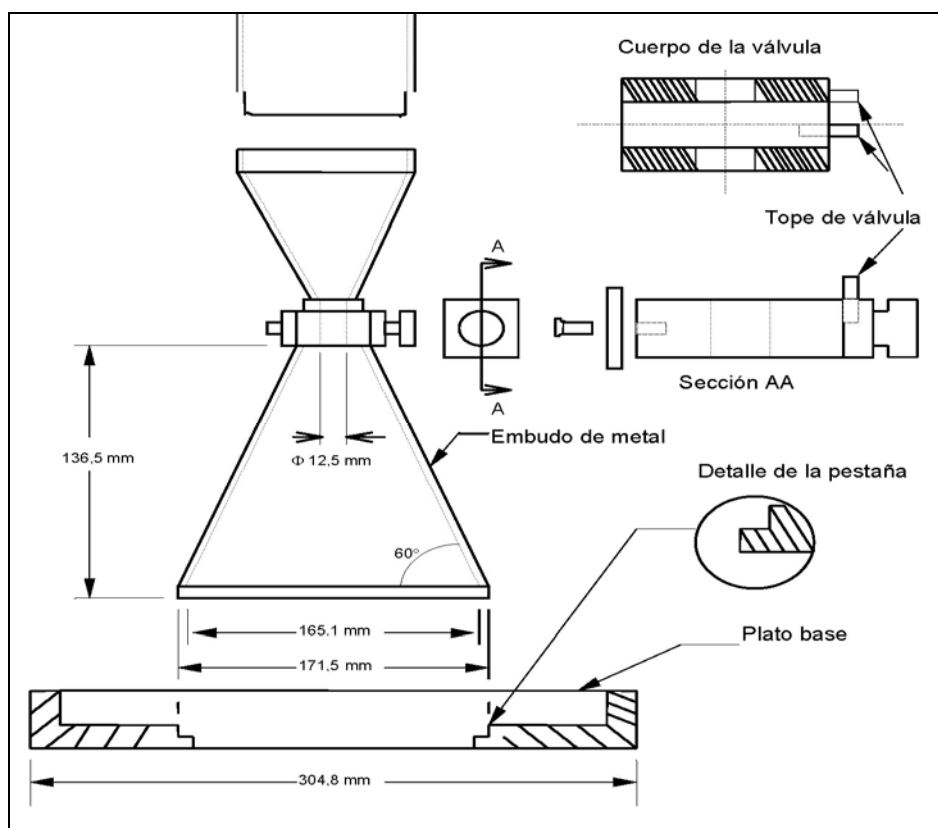


Figura 2.- Esquema del Equipo de Densidad "in situ". Método de la Arena.

Las Normas Cubanas mencionadas se encontraban vigentes en el periodo de realización de dichas investigaciones.

En la actualidad, para el control de compactación se emplea un método muy moderno, con tecnología de punta, conocido como Método Radiométrico, para el cual se emplea el Equipo Troxler. Este método es mucho más eficiente debido a la rapidez de las pruebas.

El análisis estadístico se realizó con Microsoft Excel, mediante el cual se determinaron los estadígrafos Media, Desviación Estándar, Coeficiente de Variación y se practicó la Correlación Simple de los datos en proceso, para obtener las ecuaciones de las rectas de ajuste para cada Escalón de Carga y el Coeficiente de Correlación entre el Grado de Compactación y las deformaciones (asientos) del suelo bajo la placa. (Referencia Bibliográfica 2).

Con las ecuaciones de las rectas se calculan las deformaciones, bajo la placa de ensayo, ocurridas en cada Escalón de Carga, en dependencia del Grado de Compactación del relleno.

Aplicando la ecuación 9:13b, que aparece en la página 511 del libro Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones (Referencia Bibliográfica 1), se obtienen los estimados de deformaciones del relleno bajo los cimientos reales.

RESULTADOS Y DISCUSION

Clasificación del material de préstamo

El material de préstamo se extrajo de canteras de Calcarenitas de la Formación Jaimanitas, con grados variables de cementación y alteración, mediante voladuras las más resistentes del techo y con medios mecánicos las menos cementadas de la parte inferior.

Las propiedades físicas del material, obtenidas de los ensayos de laboratorio, son las siguientes:

Plasticidad: No plástico.

Peso Específico: 2.79

Granulometría: % que pasa el Tamiz # 10=73%;
% que pasa el Tamiz # 40=56%;
% que pasa el Tamiz # 200=22%

También se sometieron a ensayos de Proctor Modificado, obteniéndose los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I.- Resumen de ensayos de Proctor Modificado.

	Humedad Óptima. W_{opt.} (%)	Densidad Húmeda. γ_f (kN/m³)	Densidad Seca. γ_d (kN/m³)	Indice de Poros. e (Adim.)	Saturación S (%)	Energía
	13.5	21.67	19.10	0.41	88	Modificado
	14.5	21.50	18.78	0.43	89	Modificado
	13.3	21.56	19.00	0.42	87	Modificado
	12.0	21.61	19.30	0.39	81	Modificado
Promedios	13.33	21.59	19.05	0.41	86.25	

Según los resultados de los ensayos practicados y usando el Sistema de Clasificación del Departamento de Caminos Públicos (American Association State Highway and Transportation Officials. (A.A.S.H.T.O.)); (Referencias bibliográficas 1, 4, 5 y 6), este material clasifica como A-1-b₍₀₎ ó A-2-4₍₀₎, apreciándose un comportamiento muy uniforme, por lo que resulta fácil tomar los valores de Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima necesarios para ser usados como referencias durante el proceso de Control de Compactación.

Resultados del Control de compactación y de las Pruebas de Carga Sobre Placa

Tanto los ensayos del Control de Compactación como las Pruebas de Placas Cargadas (Plate Load Test. PLT) se realizaron muy cerca unos de las otras de manera que se garantizara la homogeneidad de las condiciones del relleno. En la Tabla II se muestran, resumidos, los resultados finales de ambas actividades.

Tabla II.- Resultados del Control de Compactación y las Pruebas de Placas Cargadas.

Puntos de Prueba	Grado de Compactación (%)	Presión por Escalones de Carga				
		P=2.00	P=4.00	P=6.00	P=8.00	P=10.00
		Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²
Pto. 1	90.0	0.159	0.295	0.411	0.523	0.625
Pto. 2	92.0	0.121	0.235	0.355	0.439	0.532
Pto. 3	92.5	0.136	0.255	0.332	0.391	0.493
Pto. 4	94.8	0.089	0.148	0.200	0.254	0.310
Pto. 5	95.2	0.069	0.121	0.161	0.210	0.255
Pto. 6	95.5	0.061	0.116	0.161	0.201	0.257

Pto. 7	95.6	0.057	0.101	0.146	0.189	0.236
Pto. 8	96.0	0.050	0.070	0.107	0.145	0.185
Promedio	93.95	0.093	0.168	0.234	0.294	0.362
Desv. Estándar	2.18	0.04	0.08	0.11	0.14	0.16
Coef. Variación	0.02	0.44	0.49	0.49	0.47	0.45

En el gráfico de la Figura 3 se muestran las curvas de presión, en escala logarítmica, contra deformación, de cada Prueba de Placa Cargada.

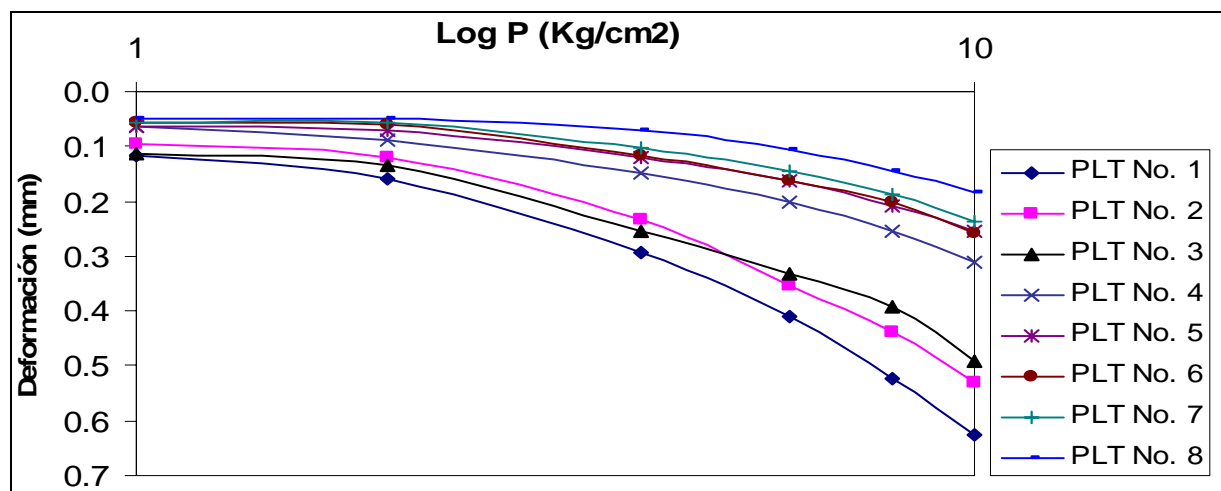


Figura 3.- Gráfico de las curvas de Presión vs Deformación para cada prueba de placa.

Las tres curvas inferiores representan las pruebas PLT realizadas sobre relleno con un rango del 90% al 92.5% de compactación y las superiores corresponden a las pruebas PLT realizadas sobre relleno con rango de 94.8% al 96% de compactación. En ambos rangos puede apreciarse un comportamiento casi lineal de las deformaciones respecto a las presiones aplicadas y que los asentamientos alcanzados no llegan a los 7mm para la carga máxima en la prueba PLT más desfavorable.

De este comportamiento se infiere que, hasta la carga máxima aplicada (10.0 kg/cm^2), en ninguna de las pruebas se llegó a la carga de rotura y que todas las curvas corresponden a la rama elástica de las deformaciones; por todo lo anterior se puede afirmar que los parámetros de capacidad de carga del relleno están garantizados, siempre que las estructuras a construir no generen presiones superiores a los 10.0 kg/cm^2 en la junta suelo-cimiento.

Correlación de los resultados

El incremento del Grado de Compactación del relleno provoca un aumento de su resistencia a las cargas impuestas y una disminución de la magnitud de los asentamientos (deformaciones), toda vez que la compactación, al provocar la disminución de la relación de vacíos del suelo como consecuencia del reordenamiento de los granos, genera un aumento de las ligaduras mecánicas entre partículas y una disminución apreciable del volumen susceptible a deformaciones.

En la presente correlación solo dedicamos los esfuerzos a relacionar las variables de compactación y deformación; con este propósito, en la Figura 4, se muestra un gráfico de dispersión de las deformaciones respecto al grado de compactación para cada escalón de carga y en la totalidad de los puntos ensayados.

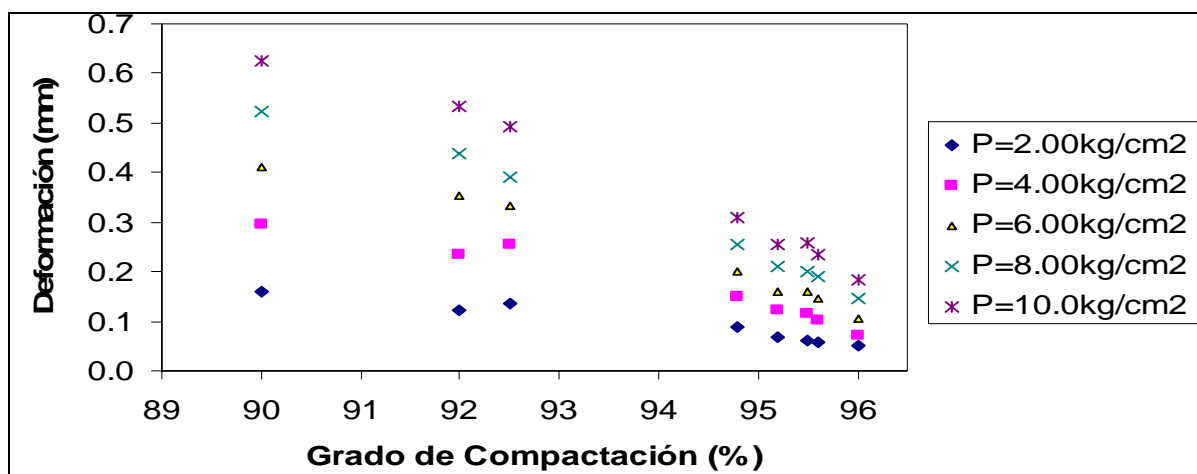


Figura 4.- Dispersión de los valores de deformación según el grado de compactación.

Obsérvese que en el rango del 90% al 92.5% de compactación la diferencia de deformaciones en una misma prueba es mayor que en el rango del 94.8% al 96% de compactación. Se conoce además que los Rellenos Técnicos destinados a servir de base a las cimentaciones deben tener, por norma, el 95% de compactación como mínimo.

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores se decide hacer la correlación con las pruebas correspondientes al rango del 94.8% al 96% de compactación.

En la Figura 5 se muestran las rectas de ajuste, de la correlación lineal, para cada escalón de carga, con la ecuación de la recta correspondiente y el cuadrado de coeficiente de correlación. Aplicando la operación correspondiente, raíz cuadrada, se obtienen los valores simples de los coeficientes de correlación, que se muestran en la Tabla III, los cuales garantizan una fuerte correlación entre las variables analizadas.

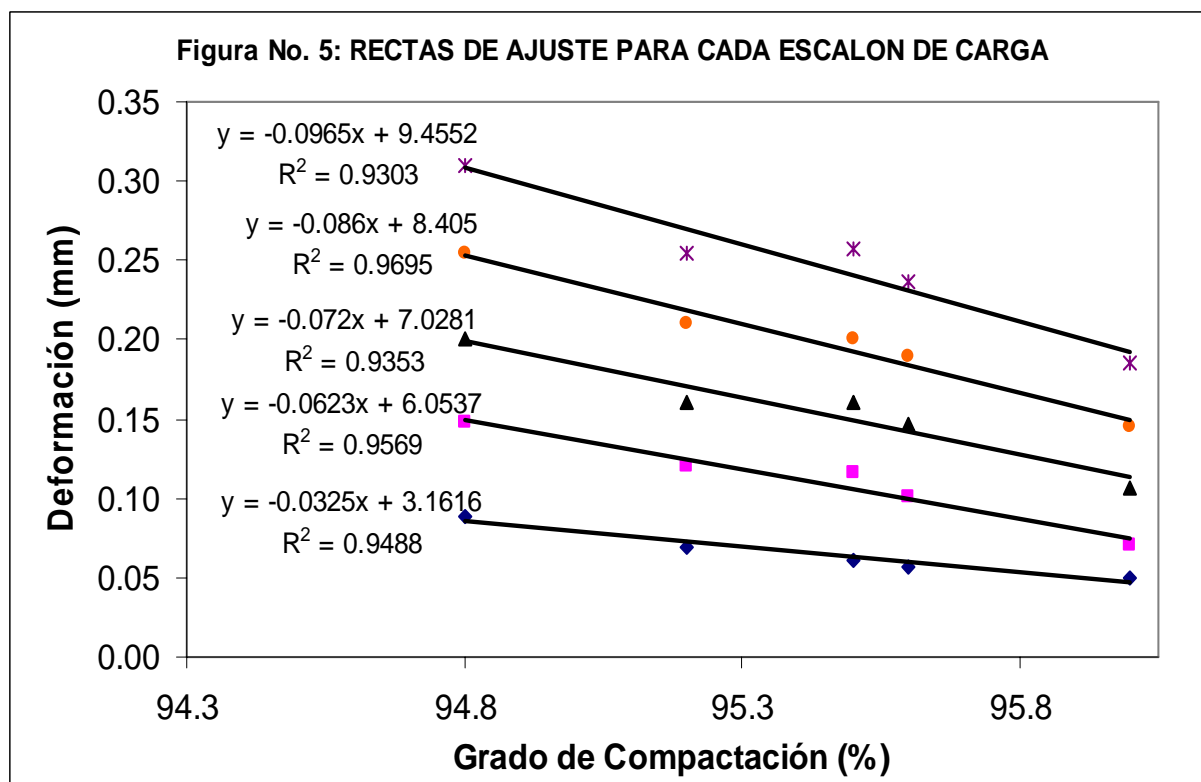


Figura 5.- Rectas de ajuste para cada escalón de carga.

Tabla III.- Coeficientes de Correlación (R) calculados.

Escalón de Carga	P=2.0 Kg/cm ²	P=4.0 Kg/cm ²	P=6.0 Kg/cm ²	P=8.0 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
Coeficiente de Correlación	0.974	0.978	0.967	0.985	0.965

Tomando en cuenta la fiabilidad que aporta la correlación simple y aplicando las ecuaciones de las rectas de ajuste para cada escalón de carga, se realiza el cálculo estimado de los valores de deformación (ΔH) que se producen bajo la placa de carga, para cualquier Grado de Compactación comprendido en el rango analizado.

En la Tabla IV, que se muestra a continuación, se presentan los valores de deformación determinados en el rango del 94.8% al 96% de Grado de Compactación. Nótese que hemos expandido el rango de compactación en valores de una décima para cubrir todos los valores cuya ocurrencia es probable que aparezcan realmente durante la realización del Control de Compactación en el campo.

Tabla IV.- Valores de deformación bajo la Placa de Carga según Grado de Compactación.

Grado de Compactación (%)	P=2.00 Kg/cm ²	P=4.00 Kg/cm ²	P=6.00 Kg/cm ²	P=8.00 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$
94.8	0.0806	0.1477	0.2025	0.2522	0.3070
94.9	0.0773	0.1414	0.1953	0.2436	0.2973
95.0	0.0741	0.1352	0.1881	0.2350	0.2877
95.1	0.0709	0.1290	0.1809	0.2264	0.2781
95.2	0.0676	0.1227	0.1737	0.2178	0.2684
95.3	0.0644	0.1165	0.1665	0.2092	0.2587
95.4	0.0611	0.1103	0.1593	0.2006	0.2491
95.5	0.0578	0.1041	0.1521	0.1920	0.2395
95.6	0.0546	0.0978	0.1449	0.1834	0.2298
95.7	0.0513	0.0916	0.1377	0.1748	0.2201
95.8	0.0481	0.0854	0.1305	0.1662	0.2105
95.9	0.0448	0.0791	0.1233	0.1576	0.2008
96.0	0.0416	0.0729	0.1161	0.1490	0.1912

Aplicación de la ecuación

La ecuación 9:13b, del texto Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones (Referencia Bibliográfica 1), se expresa como sigue:

$$S_c = S_p \left(\frac{B_c}{B_p} \right)^{0.7}$$

Donde:

S_c = Asiento del cimiento.

S_p = Asiento de la placa.

B_c = Ancho del cimiento

B_p = Lado de la placa de ensayo =30cm

Fijando el lado de la placa (B_p) en 30cm (pues constituye el valor real de la placa utilizada en las pruebas de campo), asignando los lados (B_c) de cimientos reales y sustituyendo S_p por los valores asientos bajo la placa de ensayo, que se muestran en la Tabla IV, se calcula el asentamiento (S_c) del cimiento real, para cada grado de compactación del rango analizado.

Como resultado final del trabajo se presenta una serie de tablas (Tabla V a la Tabla VIII) donde se muestran los valores de asentamiento calculados para las dimensiones de cimientos reales, obtenidos aplicando la ecuación anterior y que, tal como se muestran, pueden ser usados para el pronóstico de deformaciones, tanto en el diseño geotécnico que realiza el proyectista como en las condiciones de construcción de obras.

Tabla V.- Valores de deformación bajo el cimiento de lados $a=0,80m$ y $b=0,80m$.

Grado de Compactación (%)	P=2.00 Kg/cm ²	P=4.00 Kg/cm ²	P=6.00 Kg/cm ²	P=8.00 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$
94,8	0,1601	0,2934	0,4023	0,5011	0,6100
94,9	0,1537	0,2810	0,3880	0,4840	0,5908
95,0	0,1472	0,2686	0,3737	0,4669	0,5716
95,1	0,1408	0,2563	0,3594	0,4498	0,5525
95,2	0,1343	0,2439	0,3451	0,4327	0,5333
95,3	0,1279	0,2315	0,3308	0,4157	0,5141
95,4	0,1214	0,2191	0,3165	0,3986	0,4949
95,5	0,1149	0,2067	0,3022	0,3815	0,4758
95,6	0,1085	0,1944	0,2879	0,3644	0,4566
95,7	0,1020	0,1820	0,2736	0,3473	0,4374
95,8	0,0956	0,1696	0,2593	0,3302	0,4182
95,9	0,0891	0,1572	0,2450	0,3131	0,3991
96,0	0,0827	0,1448	0,2307	0,2960	0,3799

Tabla VI.- Valores de deformación bajo el cimiento de lados $a=1,00m$ y $b=1,00m$.

Grado de Compactación (%)	P=2.00 Kg/cm ²	P=4.00 Kg/cm ²	P=6.00 Kg/cm ²	P=8.00 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$
94,8	0,1872	0,3430	0,4704	0,5858	0,7131
94,9	0,1797	0,3285	0,4536	0,5658	0,6907
95,0	0,1721	0,3140	0,4369	0,5459	0,6683
95,1	0,1646	0,2996	0,4202	0,5259	0,6459
95,2	0,1570	0,2851	0,4035	0,5059	0,6234
95,3	0,1495	0,2706	0,3867	0,4859	0,6010
95,4	0,1419	0,2562	0,3700	0,4660	0,5786
95,5	0,1344	0,2417	0,3533	0,4460	0,5562
95,6	0,1268	0,2272	0,3366	0,4260	0,5338
95,7	0,1193	0,2127	0,3199	0,4060	0,5114
95,8	0,1117	0,1983	0,3031	0,3861	0,4890
95,9	0,1042	0,1838	0,2864	0,3661	0,4665

96,0	0,0966	0,1693	0,2697	0,3461	0,4441
------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabla VII.- Valores de deformación bajo el cimiento de lados a=1,50m y b=1,50m.

Grado de Compactación (%)	P=2.00 Kg/cm ²	P=4.00 Kg/cm ²	P=6.00 Kg/cm ²	P=8.00 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$
94,8	0,2487	0,4556	0,6247	0,7781	0,9471
94,9	0,2386	0,4363	0,6025	0,7515	0,9174
95,0	0,2286	0,4171	0,5803	0,7250	0,8876
95,1	0,2186	0,3979	0,5581	0,6985	0,8578
95,2	0,2086	0,3787	0,5359	0,6719	0,8281
95,3	0,1985	0,3595	0,5137	0,6454	0,7983
95,4	0,1885	0,3402	0,4915	0,6189	0,7685
95,5	0,1785	0,3210	0,4693	0,5924	0,7387
95,6	0,1685	0,3018	0,4470	0,5658	0,7090
95,7	0,1584	0,2826	0,4248	0,5393	0,6792
95,8	0,1484	0,2634	0,4026	0,5128	0,6494
95,9	0,1384	0,2441	0,3804	0,4862	0,6197
96,0	0,1283	0,2249	0,3582	0,4597	0,5899

Tabla VIII.- Valores de deformación bajo el cimiento de lados a=2,00m y b=2,00m.

Grado de Compactación (%)	P=2.00 Kg/cm ²	P=4.00 Kg/cm ²	P=6.00 Kg/cm ²	P=8.00 Kg/cm ²	P=10.00 Kg/cm ²
	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$	$\Delta H(\text{cm})$
94,8	0,3041	0,5572	0,7641	0,9517	1,1584
94,9	0,2919	0,5337	0,7370	0,9192	1,1220
95,0	0,2796	0,5102	0,7098	0,8868	1,0856
95,1	0,2673	0,4867	0,6826	0,8543	1,0492
95,2	0,2551	0,4632	0,6554	0,8219	1,0128
95,3	0,2428	0,4396	0,6283	0,7894	0,9764
95,4	0,2306	0,4161	0,6011	0,7569	0,9400
95,5	0,2183	0,3926	0,5739	0,7245	0,9035
95,6	0,2060	0,3691	0,5468	0,6920	0,8671
95,7	0,1938	0,3456	0,5196	0,6596	0,8307
95,8	0,1815	0,3221	0,4924	0,6271	0,7943
95,9	0,1692	0,2986	0,4653	0,5947	0,7579
96,0	0,1570	0,2751	0,4381	0,5622	0,7215

CONCLUSIONES

1. Realizando un buen control de compactación de los rellenos técnicos destinados a bases de cimentación, con los suelos descritos, se puede reducir el número de pruebas de placa cargada en cada obra e incluso estimar las deformaciones en aquellas que, cumpliendo las condiciones referidas, no puedan ser sometidas a ensayos de carga.
2. El tratamiento estadístico aplicado muestra valores de correlación que garantizan más del 95% de fiabilidad para la aplicación de este método de estimación de deformaciones bajo cimientos colocados en las condiciones descritas.
3. El conjunto de tablas de Valores de deformación bajo el cimiento, resultante de esta correlación, puede ser utilizado en la práctica y mejorado calculando nuevas tablas en

dependencia de las combinaciones de dimensiones de cimientos establecidas por cada especialista.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar el cálculo para crear tablas semejantes a las mostradas pero para estimar deformaciones bajo zapatas corridas.
2. Propiciar la continuidad de esta investigación, enriqueciendo la muestra analizada y extendiéndola a otros tipos de suelos susceptibles de ser usados como relleno técnico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Sowers, G. B. G. F Sowers. 1976. Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. Edición Revolucionaria. Cuba. Editorial Pueblo y Educación. 511.
- Guerra Bustillo, C. W. y otros. 1987. Estadística. Cuba. Editorial Pueblo y Educación. 33-52; 228-235.
- Paz Morales, Sergio. 1984. Geología para Ingenieros. Tomo I y II. Cuba. Pueblo y Educación.
- Das, Braja. 2001. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México. Thomson Learning.
- Juárez Badillo, E. y A. Rico Rodríguez. 1997. Mecánica de Suelos. Tomos I. México. Limusa. Noriega Editores.
- Bowles, Joseph. 1985. Physical and Geotechnical Properties of Soils. Parte I. Cuba. Pueblo y Educación.