

Determinación estadística de parámetros de diseño en cimentaciones superficiales

José L. Sánchez-Amador¹, Alejandro García-Elías¹, Armando Aguilar-Melendez¹, Avril González Sierra¹ y Raúl Vázquez-Fernandez²

Facultad de Ingeniería Civil¹, Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones²
Universidad Veracruzana
Poza Rica, Veracruz, México
jossanchez@uv.mx

Abstract— This research proposes a methodology to determine the design parameters by load capacity for high and low compressibility clays in the southeast region of Poza Rica Veracruz, based on identification tests; The method relies on statistics to define the values of the design values and the consistency limits of the soils in which they may be used. The tool used is the confidence intervals, which were determined with a 95% confidence level of 95%. The sample that was analyzed comes from works that have been carried out at the Faculty of Civil Engineering of Poza Rica.

Keyword— *Foundation, statistics, parameters, normality, intervals.*

Resumen— En esta investigación se propone una metodología para determinar los parámetros de diseño por capacidad de carga para las arcillas de alta y baja compresibilidad de la región sureste de Poza Rica Veracruz, a partir de ensayos de identificación; el método se apoya en la estadística para definir los valores de los parámetros de diseño y de los límites de consistencia de los suelos en los que se podrán emplear. La herramienta utilizada son los intervalos de confianza, los cuales se determinaron con un 95% de nivel de confianza del 95%. Las muestras que se analizaron provienen de trabajos que han sido realizados en la Facultad de Ingeniería Civil de Poza Rica.

Palabras claves. *Cimentación, estadísticos, parámetros, normalidad, intervalos.*

I. INTRODUCCIÓN

El análisis y diseño de una cimentación, por capacidad de carga, se realiza a partir de parámetros de diseño provenientes del suelo y de la geometría preliminar del elemento estructural; para el caso de una cimentación superficial los parámetros son: el ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso volumétrico del suelo, que se obtienen a partir de un estudio de mecánica de suelos que tiene un costo que fluctúa alrededor de los \$ 30,000.00 para una casa habitación de nivel económico medio-bajo, esto deriva en que casi nunca se realizan los mismos, siendo una práctica común que las dimensiones de la cimentación se propongan de acuerdo con la experiencia del encargado de la obra, con todos los riesgos que esto implica. Un estudio completo de mecánica de suelos incluye resultados que sirven para su identificación, además de valores que definen el comportamiento mecánico del suelo, es decir, su capacidad de carga.

Por otra parte, la estadística proporciona herramientas con las cuales, a partir de muestras recolectadas, se pueden definir no solo valores representativos de ellas, sino también parámetros poblacionales, siempre y cuando se tenga el cuidado de revisar las características de la muestra. De acuerdo con García Elías [1], la zona sureste de la ciudad de Poza Rica Ver., representa una de las reservas territoriales del municipio, ya que tiene considerables terrenos sin construir; el objetivo de esta investigación es, a partir del análisis estadístico de las características de los suelos encontradas en estudios que se han hecho en esta región, identificar las propiedades mecánicas de los suelos predominantes y sus límites de Atterberg, para posteriormente poder, con solo pruebas de identificación, proponer estos parámetros de diseño.

A. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la región sureste del municipio de Poza Rica Ver., forma parte de la provincia geológica Miogeoclinal del Golfo de México, fisiográficamente es considerada sierra baja y está formada por suelos de tipo sedimentarios. El Cuerpo Académico de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil ha realizado múltiples sondeos a cielo abierto para analizar las características geotécnicas de este lugar, encontrando que, en su mayoría, existen suelos de tipo arcilloso, particularmente de alta y baja compresibilidad, CH y CL por sus siglas en inglés. Esta zona representa la reserva territorial de la ciudad, lo cual se puede observar en la Figura 1, donde las zonas sombreadas en color ocre representan los espacios donde existen construcciones y las regiones en blanco los lugares existentes para desarrollo habitacional.



Fig. 1. Municipio de Poza Rica Ver.

B. Planteamiento del problema

Las condiciones económicas del país ocasionan que muchas personas, al no contar con los recursos suficientes, opten por la autoconstrucción. Conforme a investigaciones realizadas por García [2] el 60% de las viviendas construidas en algunas ciudades de América Latina son construidas por el sector informal, mientras que en México este porcentaje llega al 70% en zonas urbanas; con la consecuencia lógica de no contar con apoyo técnico. Por su parte Palafox [3], en un reportaje para la Gaceta Universitaria de la Universidad de Guadalajara, comenta que el 96% de las viviendas familiares son construidas por sus habitantes, puntualizando que esto significa que el dueño dirige la obra y emplea albañiles o se ocupa personalmente de la construcción. Lo anterior trae como consecuencia que el proceso de diseño se limite a duplicar las características estructurales de las construcciones cercanas, con las consecuencias lógicas.

En el tema particular de las cimentaciones es habitual, que para edificaciones de nivel medio y bajo, no se realice un estudio de mecánica de suelos y mucho menos un diseño geotécnico; siendo el motivo económico, la razón principal para su omisión. Un estudio de mecánica de suelos implica la extracción de una muestra inalterada de suelo, una batería de ensayos de laboratorio y cálculos que permitan: identificar el tipo de suelo, definir sus características físicas y la determinación de las características

mecánicas de capacidad de carga. Todo esto tiene un peso económico que impacta en el costo de la edificación. Por ello es que en la mayoría de los casos se opta por no realizar estos estudios. Esta investigación planteará mediante el análisis estadístico inferencial, de resultados de laboratorio previos, parámetros para evaluar la capacidad de carga de los suelos CH y CL de la zona de estudio; definiendo su aplicación a partir de pruebas de identificación, las cuales son sencillas y de bajo costo.

II. MARCO TEÓRICO

A. Extracción de muestras y estudios de laboratorio.

Las muestras de suelo fueron obtenidas por medio de excavaciones a cielo abierto y los ensayos realizados para obtener las características del suelo se realizaron conforme a lo indicado en la Normatividad para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes:

- Extracción e muestra inalterada. M MMP 1 01/03 [4]
- Límites de consistencia: Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP). M MMP 1 07 07 [5]
- Peso volumétrico natural (γ). M MMP 1 08/03 [6].
- Contenido de humedad (w). M MMP 1 04/03 [7].
- Densidad de sólidos (S_s). M MMP 1 05/03 [8].

Con los datos obtenidos fue posible establecer las relaciones volumétricas y gravimétricas y obtener el peso volumétrico seco (γ_s), el peso volumétrico saturado (γ_{sat}), la relación de vacíos (e), la porosidad (n) y el grado de saturación (G_w), como lo indica Das [9].

Las pruebas triaxiales fueron realizadas en su versión no consolidada y no drenada (uu), de acuerdo con lo señalado en la Norma ASTM D 2850 [10], a partir de estos resultados se obtuvieron la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ).

B. Determinación de capacidad de carga.

Las Normas Técnicas Complementarias [11] (Normas técnicas complementarias, S/A) determinan que la capacidad de carga última de un suelo cohesivo friccionante se determina con la siguiente expresión:

$$q_u = cN_cF_R + \left[\bar{P}_V(N_q - 1) + \gamma^B N_\gamma / 2 \right] F_R + p_V \quad (1)$$

Donde:

- q_u : Capacidad de carga última del suelo (t/m^2)
 - c : Cohesión (t/m^2)
 - \bar{P}_V : Presión vertical total efectiva a la profundidad de desplante, dependiendo de la profundidad del nivel freático
 - γ : Peso volumétrico del suelo (t/m^3)
 - B : Ancho de la cimentación (m)
 - p_V : Presión vertical total a la profundidad de desplante alrededor de la zapata (t/m^2)
- N_c : Factor de capacidad de carga, dado por:
- $$N_c = 5.14(1 + 0.25 D_f/B + 0.25 B/L) \quad (2)$$
- cuando $D_f/B < 2$ y $B/L < 1$.

donde D_f es la profundidad de desplante y L es la longitud del cimiento; si D_f/B y B/L no cumplen con lo anterior, se considerará entonces: $D_f/B = 2$ y $B/L = 1$.

N_q : Factor de capacidad de carga, dado por:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (3)$$

donde ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

El N_q se multiplicará por:

$1 + (B/L) \tan \phi$, cuando se trate de cimientos rectangulares.

$1 + \tan \phi$, para cimientos circulares y cuadrados.

N_γ : Factor de capacidad de carga, dado por:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (4)$$

El N_γ se multiplicará por:

$1 + 0.4(B/L)$, cuando se trate de cimientos rectangulares.

0.6, para cimientos circulares y cuadrados.

F_R : Factor de resistencia.

Para zapatas en suelos heterogéneos susceptibles de contener grietas y oquedades

$F_R = 0.35$ según CFE [12].

C. Análisis estadístico.

Uno de los objetivos de la estadística inferencial es estimar parámetros, es decir definir, a partir de una muestra, valores representativos de la población en estudio; partiendo del supuesto que el comportamiento de un fenómeno aleatorio es regido por uno o varios parámetros que se pueden considerar constante y desconocidos. En algunos casos la proyección que se busca hacer es, a partir de las medias muestrales (\bar{x}), obtener el valor de la media poblacional (μ). El proceso para encontrar parámetros poblacionales a partir de los valores de una muestra se realiza con los métodos estadísticos paramétricos; siendo condición obligatoria, para su correcta aplicación, que los datos cumplan con la condición de tener un comportamiento normal, desde el punto de vista estadístico; con esto se asegura que desviación estándar muestral (s) tendrá un valor cercano al de la desviación estándar poblacional (σ). El método estadístico paramétrico que se utilizó en esta investigación fue el de Intervalos de Confianza.

Las características que servirán para identificar si el suelo es apto para aplicar lo aquí expuesto son el LL y el LP. Además, los parámetros para determinar la capacidad de carga son γ_n , c y ϕ .

Prueba de normalidad. Para verificar la normalidad de una muestra pequeña (>50) se utiliza el test de Shapiro-Wilk; su aplicación consiste en seguir los siguientes pasos:

- Definir las Hipótesis.

H_0 : La variable aleatoria no tiene una distribución normal

H_1 : La variable aleatoria tiene una distribución normal

- Se ordenan los datos de la muestra en forma ascendente.

- Se aplica el estadístico de prueba W_c .

$$W_c = \frac{(\sum_{i=1}^k a_i [x_{(n-i+1)} - x_i])^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{5}$$

donde:

a_i = es un valor que se encuentra tabulado, por tamaño de muestra y posición de cada observación.

$[x_{(n-i+1)} - x_i]$ = la secuencia de diferencias entre el primer y el último valor, el segundo y el antepenúltimo y así hasta llegar a substraer el último valor al primero.

$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ = el cuadrado de la sumatoria de la diferencia entre cada valor menos la media de la muestra.

- Se define la zona de aceptación para H_0 , utilizando una tabla estadística de coeficientes a_i para el contraste de Shapiro Wilk. Se toma como referencia el nivel de significancia, en este caso 0.05, y el número de elementos que componen la muestra, obteniendo un valor que denotaremos como valor crítico o $W_{Tabulado}$.
- Si $W_c > W_{Tabulado}$, se rechaza H_0 y se concluye que se tiene una confianza del 95% de que las muestra tiene un comportamiento normal. En caso contrario se acepta H_0 .

Cabe mencionar que este test se corrió para todas las variables que se mencionan en el apartado anterior, con la finalidad de verificar la confiabilidad de los estudios de laboratorio realizados.

Intervalos de confianza. Se define como un par de valores entre los que se estima que se encuentra el valor un parámetro de una población con cierta posibilidad de éxito; esta probabilidad de éxito se denomina nivel de confianza y está representado por: $1-\alpha$; donde α es llamado nivel de significación y representa una medida de las posibilidades de fallar. Por tratarse de muestras pequeñas con varianza poblacional desconocida y tener una distribución aproximadamente normal se utiliza la distribución t de Student. De tal forma, que para este caso, el intervalo de confianza de nivel $100(1 - \alpha)\%$ para μ es:

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \tag{6}$$

donde:

\bar{x} = media muestral.

$t_{\alpha/2}$ = se obtiene de la tabla donde se tabulan valores críticos de la distribución de Student.

s = desviación estándar muestral.

n = número de elementos de la muestra.

Para reducir los tiempos de procesamiento de datos, el análisis estadístico de esta investigación fue realizado con la ayuda del software Statistica. Además con esto se elimina cualquier error de cálculo que pudiera presentarse.

Diagrama de flujo del proceso estadístico. A continuación con la finalidad de clarificar lo relatado en este apartado, en la Figura 2 se muestra en forma gráfica el proceso de análisis estadístico

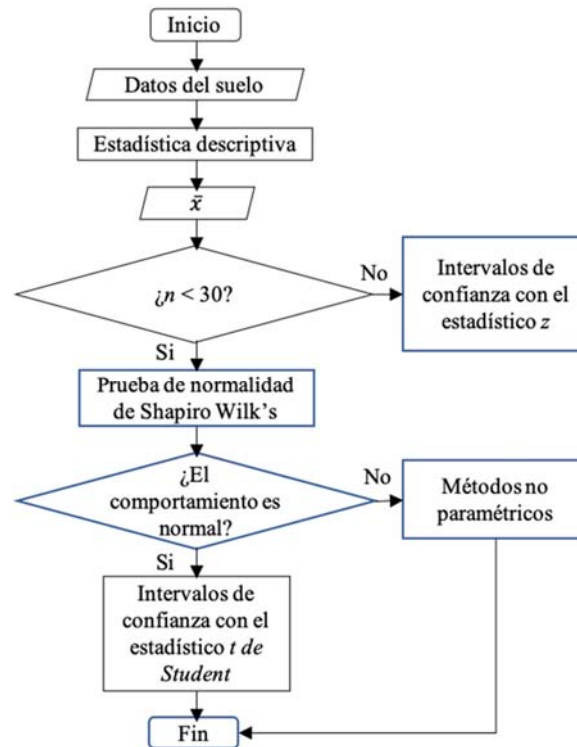


Fig. 2. Proceso estadístico.

Determinación de parámetros de identificación y de capacidad de carga. Los intervalos de confianza contienen el valor del parámetro poblacional, con un nivel de confianza del 95%, para esta investigación.

De identificación. Para el caso de la forma en que se identificará el suelo, serán el LP y el LL los que servirán de guía, de tal forma que se verificará estos valores de una muestra de suelo mediante el ensaye correspondiente y si los resultados están dentro de los intervalos propuestos, se podrá decir que son válidos para aplicar los parámetros de capacidad de carga.

De capacidad de carga. De acuerdo a la expresión utilizada y mencionada anteriormente para capacidad de carga, los parámetros necesarios son c , ϕ y γ_n . Para este caso se utilizará el valor inferior del intervalo, con la finalidad de ser prudentes y así obtener resultados con cierto factor de seguridad. Lo anterior debido a que estos valores son directamente proporcionales a la resistencia última del suelo.

III. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA SUELOS DE ALTA COMPRESIBILIDAD (CH)

A. Estadística descriptiva.

Para el caso de suelos identificados como CH se recolectaron 8 muestras. Después de la realización de los ensayes de laboratorio y del procesamiento de resultados relacionados con las relaciones gravimétricas y volumétricas, se consiguieron datos que definen las características de cada tipo de suelo. En la tabla 1 se pueden observar las 13 características que se obtuvieron de los ensayos de laboratorio aplicados a las ocho muestras de suelo CH; el tipo de suelo fue definido conforme al método del Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS)

Tabla I. Resultados de estudios de laboratorio de suelos CH.

Muestra	W %	γ_n gr/cm^3	e %	G_w %	γ_m gr/cm^3	γ_{sat} gr/cm^3	n %	S_s	LL %	LP %	IP %	c gr/cm^2	ϕ °
1	22.43	1.94	0.72	84.80	1.58	2.00	41.99	2.73	55.49	16.86	38.63	0.69	23.38
2	21.95	1.9	0.76	80.08	1.56	1.99	43.02	2.74	52.04	22.12	29.92	1.73	16.14
3	19.14	2.09	0.55	97.35	1.76	2.11	35.16	2.71	56.67	12.93	43.74	2.43	18.85
4	17.22	2.00	0.49	89.25	1.70	2.03	32.94	2.54	53.72	13.13	36.58	0.23	14.59
5	26.80	1.93	0.72	97.18	1.52	1.94	41.90	2.62	63.57	18.99	44.58	0.40	4.81
6	23.48	1.86	0.81	78.70	1.50	1.95	44.89	2.73	57.49	23.44	34.05	0.68	10.01
7	26.42	1.90	0.80	88.57	1.51	1.95	44.45	2.71	78.03	21.76	56.27	0.91	16.32
8	23.72	1.97	0.64	96.25	1.59	1.98	39.14	2.61	68.92	32.38	36.54	0.88	20.50

Con estos datos se procedió, en primer lugar, a realizar un análisis estadístico descriptivo. Los estadísticos que se rescataron fueron la media y la desviación de cada característica del suelo, necesarios para la aplicación de la prueba de normalidad y la estadística inferencial.

Como se mencionó anteriormente, todo el análisis estadístico, fue realizado con el software Statística. La Tabla II muestra los valores de la media y desviación típica de las muestras de cada rasgo del suelo.

Tabla II. Resultados de media y desviación estándar muestral se los suelos CH.

Arcillas de alta compresibilidad	\bar{x}	σ
W (Contenido de humedad)	22.65	3.29
γ (Peso volumétrico natural)	1.95	0.07
e (Relación de vacíos)	0.69	0.12
G_w (Grado de saturación)	89.02	7.49
γ_s (Peso volumétrico seco)	1.59	0.09
γ_{sat} (Peso volumétrico saturado)	1.99	0.06
n (Relación de vacíos)	40.44	4.36
S_s (Densidad de sólidos)	2.67	0.07
LL (Límite líquido)	60.74	8.89
LP (Límite plástico)	20.20	6.33
IP (Índice plástico)	40.04	8.13
c (Cohesión)	0.99	0.73
ϕ (Ángulo de fricción interna)	15.58	5.91

B. Prueba de normalidad.

Como se sabe, para aplicar la estadística inferencial, es necesario que estos tenga un comportamiento normal, por ello se procedió a realizar la prueba de normalidad de Shapiro Wilk’s, para muestras pequeñas, es decir, de menos de 50 datos; aún cuando este trabajo esta enfocado a obtener valores de diseño de solo 5 datos del suelo, se tomó la decisión de examinar todos, con la finalidad de averiguar sobre la fortaleza estadística de la obtención de la muestra y de la realización de las pruebas de laboratorio.

En primer lugar se definieron las hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1):

H_0 : La variable aleatoria no tiene una distribución normal

H_1 : La variable aleatoria tiene una distribución normal

Utilizando el software Statistica se determinaron los valores de los estadísticos de prueba W_c y de los valores críticos o tabulados (W_T) de cada característica del suelo, con el fin de compararlos y verificar la condición de normalidad.

Los resultados que se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Resultados de Test de Normalidad con Shapiro –Wilk’s para suelos CH.

	n	W_c	W_T
W	8	0.9484	0.6955
γ	8	0.9343	0.5556
e	8	0.9063	0.3285
G_W	8	0.8939	0.2542
γ_m	8	0.8676	0.1427
γ_{sat}	8	0.8676	0.1427
n	8	0.8864	0.2166
S_s	8	0.8318	0.0620
LL	8	0.8740	0.1647
LP	8	0.9251	0.4730
IP	8	0.9226	0.4514
c	8	0.8664	0.1389
ϕ	8	0.9583	0.7938

El siguiente paso fue contrastar W_c y W_T y comprobar si $W_c > W_T$, condición que permite rechazar H_0 . En la misma Tabla III se observa que en todos los casos se cumple la condición, es decir, W_c es mayor que W_T ; por lo tanto, para todas las variables se rechaza la hipótesis nula que dice que la variable aleatoria no tiene una distribución normal; por lo que se puede afirmar con evidencia cuantitativa y un nivel de confianza del 95% que los datos de cada variable tienen un comportamiento normal.

C. *Intervalos de confianza.*

Enseguida se procedió a aplicar la inferencia estadística, con el método de intervalos de confianza, aplicando la expresión [6]. Solo se muestran a las variables necesarias para esta investigación, es decir, las que permitirán identificar el tipo de suelo y los parámetros de diseño. Los resultados se muestran en la Tabla IV.

Tabla IV. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA SUELOS CH.

	<i>n</i>	Intervalos de confianza	
		-95%	+95%
LL	8	53.31	68.18
LP	8	14.91	25.49
γ_n	8	1.89	2.01
<i>c</i>	8	0.38	1.61
ϕ	8	10.63	20.52

D. *Parámetros de identificación y capacidad de carga.*

Los intervalos definidos para los **LL** y **LP** son los que identificarán el suelo susceptible de aplicar los parámetros de diseño, es decir, si una muestra de suelo tiene valores comprendidos dentro de estos límites (Tabla V), entonces, se podrá afirmar con un nivel de confianza del 95% que ese trata de un suelo CH al que se pueden aplicar los parámetros de diseño que se definirán enseguida.

Tabla V. INTERVALOS PARA IDENTIFICACIÓN DEL SUELO.

LL	(53.31-68.18)
LP	(14.91-25.49)

Como se puede observar en la expresión 6, los valores de γ_n , *c* y ϕ son directamente proporcionales a la capacidad de carga del suelo que se obtiene con esta expresión, por lo que con la finalidad de ser cautos, para estos parámetros de diseño se utilizarán los valores mínimos de cada intervalo de confianza, Tabla VI.

Tabla VI. PARÁMETROS DE DISEÑO.

γ_n	1.89 gr/cm ³
<i>c</i>	0.38 gr/cm ³
ϕ	10.63°

Nota: estos valores pueden ser modificados de acuerdo al criterio del diseñador, siempre bajo su responsabilidad y sin exceder el límite superior del intervalo correspondiente.

IV. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA ARCILLAS CL

A. Estadística descriptiva.

Para el suelo CL se recolectaron 15 muestras, de la misma forma que en el caso anterior se realizaron los ensayos de laboratorio y se obtuvieron las relaciones gravimétricas y volumétricas, obteniendo los resultados mostrados en la tabla VII.

Tabla VII. Resultados de estudios de laboratorio de suelos CL.

Muestra	w %	γ gr/cm ³	e	G _w %	γ_m gr/cm ³	γ_{sat} gr/cm ³	n	S _s	LL %	LP %	IP %	c gr/cm ²	ϕ °
1	20.36	2.03	0.58	93.89	1.69	2.05	36.61	2.66	49.27	20.11	29.16	0.37	5.35
2	19.92	1.96	0.62	85.49	1.63	2.01	38.11	2.64	41.72	19.89	21.82	0.35	7.29
3	18.13	2.02	0.61	82.23	1.71	2.09	37.76	2.75	46.61	19.65	26.96	0.13	26.52
4	16.84	2.06	0.55	83.16	1.76	2.12	35.67	2.74	46.92	16.13	30.79	0.51	18.63
5	20.17	1.95	0.64	84.20	1.62	2.01	39.00	2.66	42.43	17.01	25.42	0.56	5.91
6	19.36	1.93	0.74	73.42	1.61	2.04	42.56	2.81	49.13	14.30	38.43	0.68	2.82
7	19.72	2.12	0.61	92.40	1.77	2.15	37.91	2.85	43.86	15.95	27.91	0.17	22.10
8	19.41	1.93	0.56	87.52	1.62	1.98	35.99	2.53	39.95	11.94	28.01	0.75	12.84
9	21.17	1.92	0.68	83.21	1.59	1.99	40.54	2.67	38.74	15.43	23.31	0.30	16.32
10	17.13	1.99	0.61	77.75	1.70	2.08	37.59	2.73	40.61	19.52	21.09	1.19	6.01
11	16.78	2.07	0.48	92.34	1.77	2.10	32.28	2.62	44.59	18.89	25.70	1.15	0.21
12	19.41	2.01	0.60	87.44	1.68	2.05	37.33	2.68	42.67	18.12	24.55	0.56	4.43
13	17.07	2.03	0.52	90.10	1.73	2.07	34.19	2.63	41.26	13.94	27.32	0.90	1.53
14	20.64	1.91	0.75	76.68	1.59	2.01	42.72	2.77	49.90	21.16	28.74	0.41	10.49
15	25.11	1.89	0.90	80.10	1.51	1.98	46.96	2.85	47.75	21.45	26.3	0.40	0.75

De manera semejante al caso anterior se aplicó la estadística descriptiva a cada serie de resultados, obteniendo los valores de media y desviación estándar de todas las variables del suelo CL. Los resultados se pueden observar en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Resultados de media y desviación estándar muestral para suelos CL.

Arcillas de alta compresibilidad	\tilde{x}	σ
W (Contenido de humedad)	19.41	2.15
γ (Peso volumétrico natural)	1.99	0.07
e (Relación de vacíos)	0.63	0.10
G_w (Grado de saturación)	84.66	6.09
γ_s (Peso volumétrico seco)	1.67	0.08
γ_{sat} (Peso volumétrico saturado)	2.05	0.05
n (Relación de vacíos)	38.35	3.67
S_s (Densidad de sólidos)	2.71	0.09
LL (Límite líquido)	44.36	3.68
LP (Límite plástico)	17.57	2.87
IP (Índice plástico)	26.79	3.49
c (Cohesión)	0.56	0.32
ϕ (Ángulo de fricción interna)	9.41	8.17

B. Prueba de normalidad.

Con los valores obtenidos de media y la desviación estándar se revisa si el comportamiento de los datos es normal.

Acorde con la metodología planteada se definen las hipótesis

H₀: La variable aleatoria no tiene una distribución normal

H₁: La variable aleatoria tiene una distribución normal

De manera semejante se determinan los estadísticos de prueba W_c y los valores críticos o tabulados W_T de cada particularidad del suelo mediante la prueba de Shapiro Wilk's. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla VII.

Tabla IX. Resultados de Test de Normalidad con Shapiro –Wilk’s para suelos CL.

	n	W_c	W_T
W	15	0.881772	0.050427
γ	15	0.958093	0.659291
e	15	0.907511	0.124020
G_W	15	0.970333	0.862960
γ_m	15	0.946102	0.465273
γ_{sat}	15	0.950702	0.535571
n	15	0.947680	0.488674
S_s	15	0.960434	0.699936
LL	15	0.938815	0.367701
LP	15	0.929224	0.512310
IP	15	0.971291	0.876689
c	15	0.926000	0.237603
ϕ	15	0.903950	0.109378

De nuevo se compara los valores obtenidos para determinar si se cumple la condición que $W_c > W_T$. En cada uno de los casos se cumple, por lo tanto, se puede afirmar con un 95% de nivel de confianza, que los datos tienen un comportamiento normal.

C. Intervalos de confianza para suelos CL.

Para precisar los intervalos de confianza se aplica nuevamente la expresión 6, teniendo como resultado lo mostrado en la tabla X.

Tabla X. Intervalos de confianza para suelos CL.

	n	Intervalos de confianza	
		-95%	+95%
LL	15	42.32	46.40
LP	15	15.98	19.15
γ_n	15	1.95	2.03
c	15	0.38	0.74
ϕ	15	4.89	13.94

D. Parámetros de identificación y capacidad de carga.

De manera análoga al caso anterior, los intervalos del **LL** y **LP** se utilizarán para identificar el suelo al que puede aplicarse lo que se aquí se propone. La Tabla XI muestra estos intervalos.

Tabla XI. INTERVALOS PARA IDENTIFICACIÓN DEL SUELO *CL*.

<i>LL</i>	(52.32 – 46.40)
<i>LP</i>	(15.98 – 19.15)

En consonancia con lo propuesto en el caso anterior, los autores recomiendan que los valores propuestos para los parámetros de diseño sean los límites inferiores de cada intervalo, por lo que para el suelo identificado como CL y cuyos valores de LL y LP están dentro de los intervalos señalados en el punto anterior se utilizarán los parámetros de diseño mostrados en la Tabla XII.

Tabla XII. PARÁMETROS DE DISEÑO.

γ_n	1.95 gr/cm ³
<i>c</i>	0.38 gr/cm ³
ϕ	4.89°

Nota: estos valores pueden ser modificados de acuerdo al criterio del diseñador, siempre bajo su responsabilidad y siempre dentro del intervalo correspondiente.

V. APLICACIÓN DE RESULTADOS

La finalidad de este documento es determinar los parámetros de capacidad de carga de un suelo con cierto grado de confiabilidad. Esta confiabilidad la proporciona la forma en que se procesan en el laboratorio las muestras de suelo y a su vez los resultados en el análisis estadístico. Más la utilidad de lo aquí propuesto se verá reflejado en la aplicación que se haga de estos parámetros en la determinación de la capacidad de carga de uno de estos tipos de suelo. Para lo cual se analizará un caso hipotético.

Supongamos que se identifica un suelo que cumple con el intervalo de valores para el ***LL*** y ***LP*** de tal forma que podemos catalogarlo como CH, por lo que tenemos los siguientes parámetros de carga:

$$c = 0.38 \text{ ton/m}^2 \qquad \phi = 10.63^\circ \qquad \gamma_n = 1.89 \text{ ton/m}^3$$

Para el caso de una zapata cuadrada de 1 metro por lado y desplantada a 1.5 metros de profundidad, como se muestra en la Figura 3, determinemos la capacidad de carga del suelo.

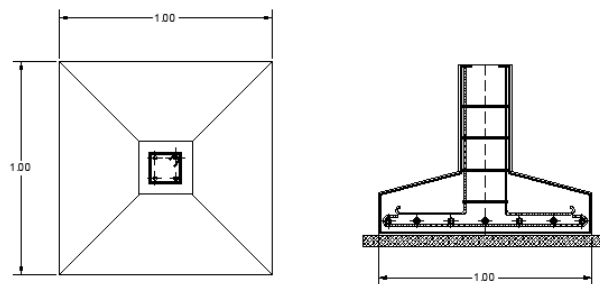


Fig. 3. Croquis de zapata cuadrada.

$$B = 1.00 \text{ m}$$

$$L = 1.00 \text{ m}$$

$$D_f = 1.50 \text{ m}$$

Primero se calculan los factores de capacidad de carga con las ecuaciones indicadas en el apartado II.

N_c se determina con la Ecuación (2); y de acuerdo a las condiciones, tenemos que:

$$\text{Como } D_f/B = 1.50 \text{ m}/1.00 \text{ m} = 1.50 \text{ y } B/L = 1.00 \text{ m}/1.00 \text{ m} = 1.00$$

Entonces: $D_f/B = 2$ y $B/L = 1$.

Por lo que sustituyendo:

$$N_c = 5.14(1 + 0.25(2) + 0.25(1))$$

$$\underline{N_c = 9.00}$$

N_q se establece con la Ecuación (3)

Por lo que sustituyendo:

$$N_q = e^{\pi \tan 10.63^\circ} \tan(45^\circ + 10.63^\circ/2)$$

$$N_q = 2.62$$

para cimientos cuadrados se hace la siguiente corrección:

$$N_q = N_q(1 + \tan \phi)$$

Sustituyendo:

$$N_q = 2.62(1 + \tan 10.63^\circ)$$

$$\underline{N_q = 3.11}$$

N_γ se calcula con la Ecuación (4)

Por lo que sustituyendo:

$$N_\gamma = 2(3.11 + 1) \tan 10.63^\circ$$

$$N_\gamma = 1.55$$

para cimientos cuadrados se multiplica por 0.6:

$$N_\gamma = 1.55(0.60)$$

$$\underline{N_\gamma = 0.93}$$

Finalmente se sustituyen todos los valores obtenidos en la Ecuación (1)

$$q_{ad} = \left(3.8 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) (9.00)(0.35) + \left[2.84 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} (3.11 - 1) + \frac{(1.89 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3})(1.00 \text{ m})(0.93)}{2} \right] 0.35 + 2.84 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

$$q_{ad} = 17.21 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

El área de la zapata con la que se calculó esta capacidad de carga es de 1 m^2 . El siguiente paso sería compararlo contra la carga que esté actuando sobre la zapata y si difiere significativamente, entonces deberá modificarse las dimensiones de la zapata cuadrada.

VI. CONCLUSIONES

Este análisis muestra una aplicación práctica de la estadística en el área de la ingeniería, cumpliendo la finalidad de ofrecer una solución rápida, pero sobre todo económica para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales en casas habitación de hasta dos niveles. Como se mostró en el ejemplo de aplicación, para un suelo CH la capacidad de carga es de 17.21 ton/m^2 , valor relativamente bueno para las cargas que llega a transmitir una estructura de este tipo.

Sería recomendable que se identificaran y analizaran los parámetros para el diseño por asentamientos, caso que puede presentar muchas variantes de acuerdo con la configuración de las cargas, por lo que requiere un estudio muy exhaustivo para proponer una metodología de aplicación.

Deben seguir realizándose estudios de suelo en la región sureste de Poza Rica con fines académicos y de investigación, con el propósito de aumentar el número de datos disponibles y de esta forma ampliar la confiabilidad de los resultados.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto fue realizado con el apoyo del Cuerpo Académico Estructuras UC-CA-215 de la Facultad de Ingeniería Civil de Poza Rica.

REFERENCIAS

- [1] García, A. (2017). Estimación de la succión total en arcilla expansiva Revista Iberoamericana de Ciencias, Vol. 4 Núm. 2, pp. 105-119. Recuperado el 8 de febrero de 2019 de <http://www.reibci.org>.
- [2] García, A. (2005). Vivienda, familia, identidad. La casa como prolongación de las relaciones humanas. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe. Vol. VII Núm. 17, pp. 43-56. Recuperado el 8 de febrero de 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/607/60722197006.pdf>.
- [3] Plafox, N. Autoconstrucción de vivienda en México. La Gasetta de la Universidad de Guadalajara, pp. 11. Recuperado el 5 de febrero de 2019 de <http://148.202.105.20/dgmgac/Hemeroteca/paginas/162/11-162.pdf>.
- [4] Norma M-MMP-1-01/03. (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, Normatividad para la infraestructura del transporte, 11 de diciembre de 2003: Recuperado el 29 de enero de 2019 de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-01-03.pdf>.
- [5] Norma M-MMP-1-07-07. (2007). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, Normatividad para la infraestructura del transporte, 29 de noviembre de 2007. Recuperado el 29 de enero de 2019 de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>.
- [6] Norma M-MMP-1-08/03. (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, Normatividad para la infraestructura del transporte, 11 de diciembre de 2003. Recuperado el 29 de enero de 2019 de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-08-03.pdf>.
- [7] Norma M-MMP-1-04-03. (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, Normatividad para la infraestructura del transporte, 11 de diciembre de 2003. Recuperado el 27 de enero de 2019 de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-04-03.pdf>.
- [8] M-MMP-1-05-03. (2003). Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, Normatividad para la infraestructura del transporte, 11 de diciembre de 2003. Recuperado el 27 de enero de 2019 de <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-05-03.pdf>.
- [9] Das, B. and Cervantes González, S. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (4a. ed.). México, D.F.: CENGAGE Learning.
- [10] Norma ASTM D 2850. (2007). Standar test method for unconsolidated-undrainet triaxial compression test on cohesive soils. West Conshohocken, EUA. ASTM.
- [11] Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones (2017). México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios. Recuperado el 21 de enero de 2019 de <https://www.isc.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/590/147/676/590147676200f254127182.pdf>.
- [12] Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones (2015). México, Infraestructura Educativa. Recuperado el 22 de enero de 2019 de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/normateca/INIFED/03_Normatividad_Técnica/02_Normas_y_Especificaciones_para_Estudios/02_Volumen_2_Estudios_Preliminares/Volumen_2_Tomo_II.pdf

